

УДК 621.372.8; 621.385.69

## ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЕ СВЕРХРАЗМЕРНЫЕ ЩЕЛЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ГИРОТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2022 г. Ю. Ю. Данилов<sup>1</sup>, А. Н. Леонтьев<sup>1</sup>, А. М. Малкин<sup>1,2</sup>, Р. М. Розенталь<sup>1,\*</sup>,  
Д. Ю. Щегольков<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН Н. С. Гинзбург<sup>1</sup>

Поступило 07.12.2021 г.

После доработки 13.12.2021 г.

Принято к публикации 25.03.2022 г.

На основе аналитического подхода и численного моделирования показано, что в сверхразмерном цилиндрическом резонаторе с  $M$  продольно-щелевыми разрезами связь парциальных мод регулярного волновода с  $M$  и  $2M$  азимутальными индексами может приводить к формированию высокодобротных мод с малыми радиальными потерями на квазикритических частотах. Это обеспечивает возможность селективного возбуждения подобных мод винтовыми электронными пучками в релятивистских гиротронах миллиметрового диапазона.

*Ключевые слова:* щелевые резонаторы, гиротроны, миллиметровое излучение

DOI: 10.31857/S2686740022030051

В настоящее время гиротроны являются самыми мощными источниками излучения в диапазоне до 1 ТГц [1]. Дальнейшее увеличение мощности и частоты генерации в значительной степени ограничивается сложностью селекции рабочего колебания. Одним из путей решения данной проблемы является модификация резонатора гиротрона, который обычно представляет собой отрезок слабонерегулярного волновода, возбуждаемый винтовым электронным потоком [2]. На этом направлении можно выделить два основных подхода. Первый связан с изменением геометрии поперечного сечения резонатора, например, введения коаксиального стержня [3] или нарушения азимутальной симметрии [4]. Второй подход ориентирован на создание резонаторов, открытых в поперечном направлении. Достаточно широко распространенным подходом является прорезание продольных щелей для подавления паразитных мод [5]. Другими примерами могут служить резонаторы на основе фотонных кристаллов [6], конфокальные [7] и планарные резонаторы [8].

В данной работе предлагается новый тип продольно-щелевых резонаторов, открытых в поперечном направлении, основанных на связи мод с кратными азимутальными индексами. В первой части работы обсуждается принцип работы подобного резонатора, представлена его упрощенная теория и выполнены результаты расчета с использованием программы CST Microwave Studio. Во второй части работы выполнено трехмерное РЭС-моделирование сильноточного релятивистского гиротрона диапазона 100 ГГц с выходной мощностью около 100 МВт, в котором используется комбинация мод  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$ .

### 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 поверх-

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: rrz@ipfran.ru

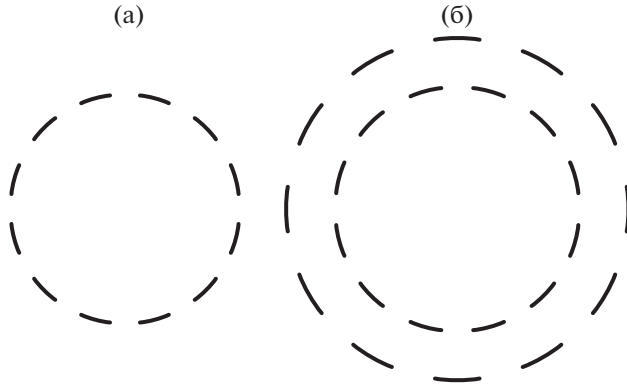


Рис. 1. Поперечное сечение резонатора гиротрона с продольными щелями в отсутствие (а) и при наличии (б) дополнительной внешней структуры.

ность 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

$$m_2 - m_1 = qM, \quad (1)$$

где  $q$  – натуральное нечетное 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 определенным 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-й 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. Паразитные осесимметричные  $H$ -моды не войдут в рабочее колебание посредством связи на 1-й гармонике гофра только при существенном отличии их корней производной функции Бесселя от корней связанных  $H$ -мод.

Ограничимся анализом продольно-щелевого резонатора в рамках дипольного приближения [9]. Это приближение позволяет оценить добротность резонаторной  $H$ -моды  $Q_{slit}$ , обусловленную излучением через щели продольной компоненты магнитного поля  $H_z$ . Значение добротности найдется посредством решения самосогласованной

системы уравнений для резонаторной моды и волноводных мод в щелях и имеет вид

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

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,  $\mu_{mp}$  –  $p$ -й корень производной функции Бесселя 1-го рода  $m$ -го порядка,  $F(z)$  – нормированное распределение продольной компоненты поля собственной моды регулярного резонатора. Коэффициент магнитной поляризуемости  $\kappa$  для прямоугольных щелей с поперечными размерами  $b/a \ll 1$  составляет [10]:

$$\kappa = \frac{\pi a^3}{24 \left( \ln \left( \frac{4a}{b} \right) - 1 \right)}. \quad (3)$$

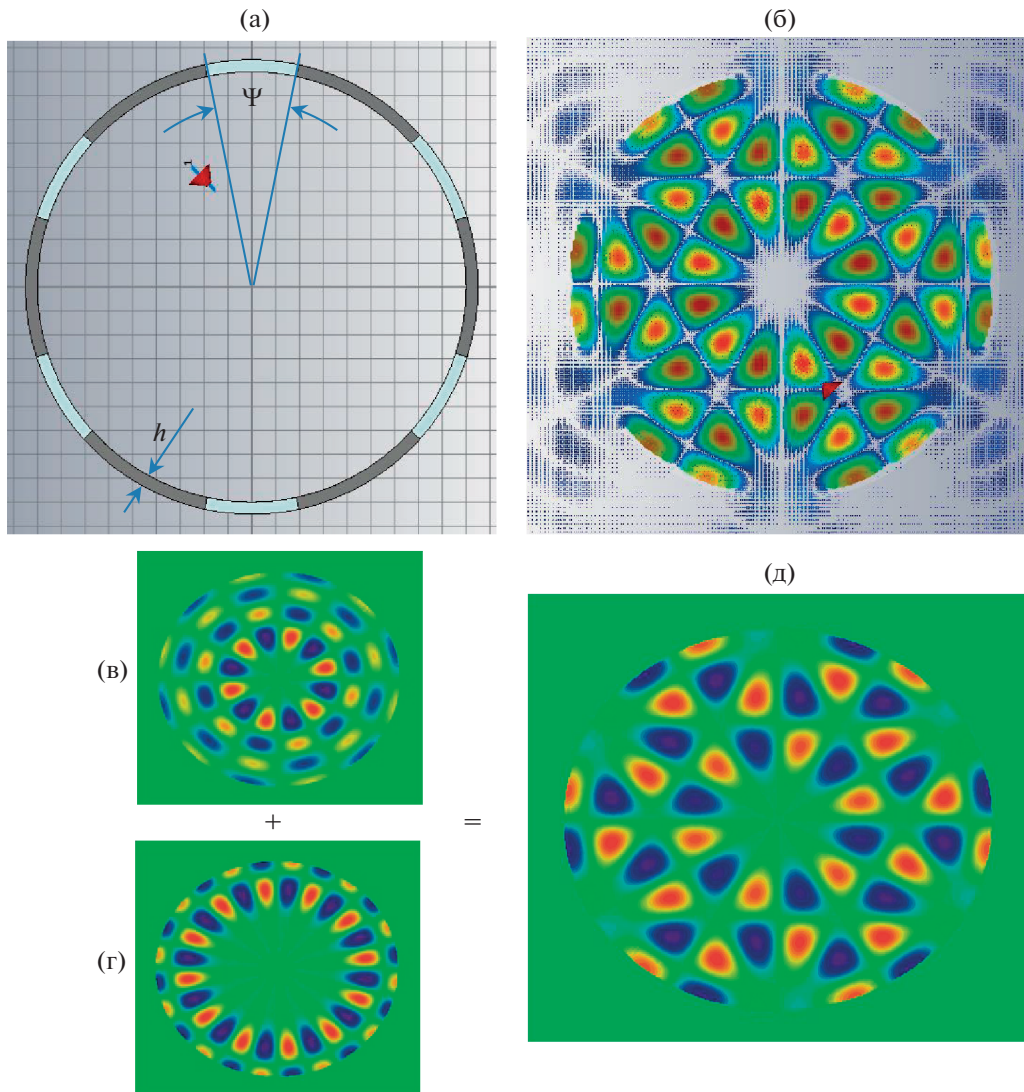
Для осесимметричных или вращающихся по азимутальной координате мод множитель  $f(M)$ , описывающий поляризацию рабочей моды резонатора, принимает значение  $f(M) = M$  [11]. В свою очередь, для комбинации двух стоячих мод с кратными азимутальными индексами  $m$  и  $2m$  и близкими по значению корнями производной функции Бесселя данный множитель запишется в следующем виде:

$$f(M) = 2 \sum_{p=1}^M (\cos(m\varphi_p) + \cos(2m\varphi_p))^2 = = 8 \sum_{p=1}^M \left( \cos\left(\frac{m\varphi_p}{2}\right) \cos\left(\frac{3m\varphi_p}{2}\right) \right)^2, \quad (4)$$

где  $\varphi_p$  – азимутальная координата щели на боковой стенке.

Легко видеть, что в последнем случае при прорезании  $M = m$  продольных щелей в боковой стенке резонатора фактор  $f(M)$  принимает нулевое значение. В свою очередь, добротность  $Q_{slit}$  при этом 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  $\mu_{mp}$ :  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$  (различие значений  $\mu_{mp}$  составляет 0.6%),  $H_{8,7}$  и  $H_{16,4}$  (0.8%),  $H_{11,9}$  и  $H_{22,5}$  (0.6%) и т.д.

Точный расчет добротности одной из “супермод”, состоящей из комбинации стоячих мод  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$ , был произведен с использованием программы CST Microwave Studio. В моделировании



**Рис. 2.** Результаты моделирования в программе CST Microwave Studio: поперечное сечение щелевого резонатора (а) и пространственная структура продольной компоненты высокочастотного магнитного поля (б). Поперечная структура мод  $H_{6,4}$  (в) и  $H_{12,2}$  (г) в резонаторе со сплошной стенкой и результат их арифметического сложения (д).

исследовался резонатор на длине волны  $\lambda \approx 3$  мм с шестью щелями с угловым размером  $\Psi$  и толщиной стенки  $h$  (рис. 2а). Известно, что в гиротроне продольное волновое число рабочего колебания близко к нулевому значению. Это позволило фактически решать двумерную задачу, в которой область моделирования вдоль оси резонатора представляла собой тонкий цилиндрический слой. Граничные условия на торцах слоя были заданы в виде идеальной магнитопроводящей поверхности. В радиальном направлении были использованы граничные условия в виде “открытой границы”.

Поле внутри резонатора возбуждалось диполем в виде тонкой нити, на который подавался импульсный сигнал, по окончании которого поле свободно затухало. Поскольку рабочее колеба-

ние является самым высокодобротным, на конечном этапе процесса затухания вклад остальных мод в общее поле внутри резонатора становился пренебрежимо малым. В результате в резонаторе устанавливалась структура поля, соответствующая рабочему колебанию. В свою очередь, поскольку затухание приобретало экспоненциальный характер, появлялась возможность расчета добротности колебания. Омические потери при моделировании не учитывались, поэтому полная добротность найденного колебания определялась добротностью, связанной с излучением из щелей.

На первом этапе толщина стенки была выбрана равной длине волны, и свойства резонатора исследовались при различных значениях углового размера щелей  $\Psi$ . Пространственная структура наиболее высокодобротного колебания показана

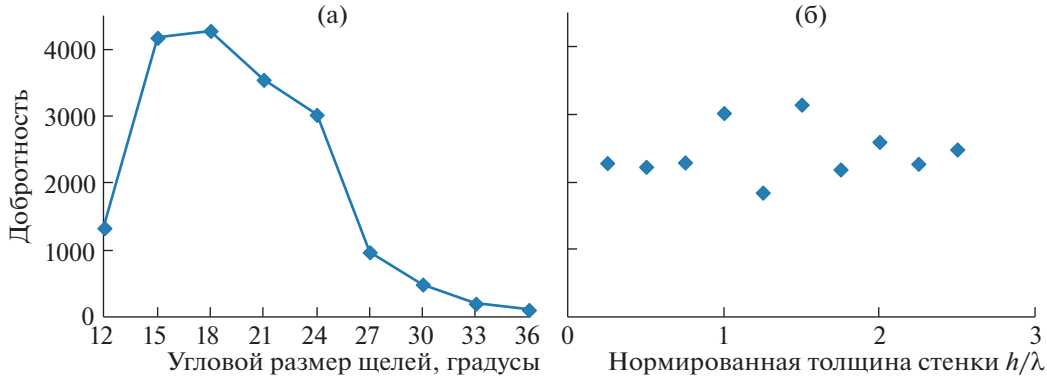


Рис. 3. Зависимость добротности “супермоды” от углового размера щели для случая  $h/\lambda = 1$  (а) и от относительной толщины стенки для случая  $\Psi = 24^\circ$  (б).

на рис. 2б. Сравнение данной структуры с результатом арифметического сложения полей мод  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$  (рис. 2в, г, д) позволяет сделать вывод, что действительно имеет место возбуждение “супермоды”, состоящей из указанных парциальных мод.

При значениях  $\Psi > 30^\circ$  добротность моды уменьшается до значений менее 500 (рис. 3а), что делает подобный резонатор малоприменимым для практического использования в силу значительных дифракционных потерь. При уменьшении размера щелей добротность естественным образом растет, однако при этом следует ожидать и нарастания добротности соседних мод, что может привести к их самовозбуждению при взаимодействии с электронным пучком. Отметим, что добротность моды меняется не слишком сильно при изменении толщины стенки (рис. 3б). Таким образом, это позволяет использовать предложенный резонатор и на более высоких частотах.

### ТРЕХМЕРНОЕ PIC-МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ГИРОТРОНА ДИАПАЗОНА 100 ГГц

Рассмотрим возможность одновременного возбуждения релятивистским сильноточным винтовым электронным пучком комбинации из четырех мод  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$  прямого и обратного вращения. В гиротронах коэффициент связи электронного пучка с рабочей модой имеет следующий вид [12]:

$$G = \frac{J_{m\pm 1}^2 (\mu_{mp} R_{beam} / R_0)}{(\mu_{mp}^2 - m^2) J_m^2 (\mu_{mp})}, \quad (5)$$

где  $R_{beam}$  — радиус ведущих центров винтового электронного потока, знак “+” относится к случаю, когда направление вращения моды совпадает с направлением вращения электронов, знак “−” — в случае противоположного вращения. Анализируя зависимости коэффициентов связи от радиуса,

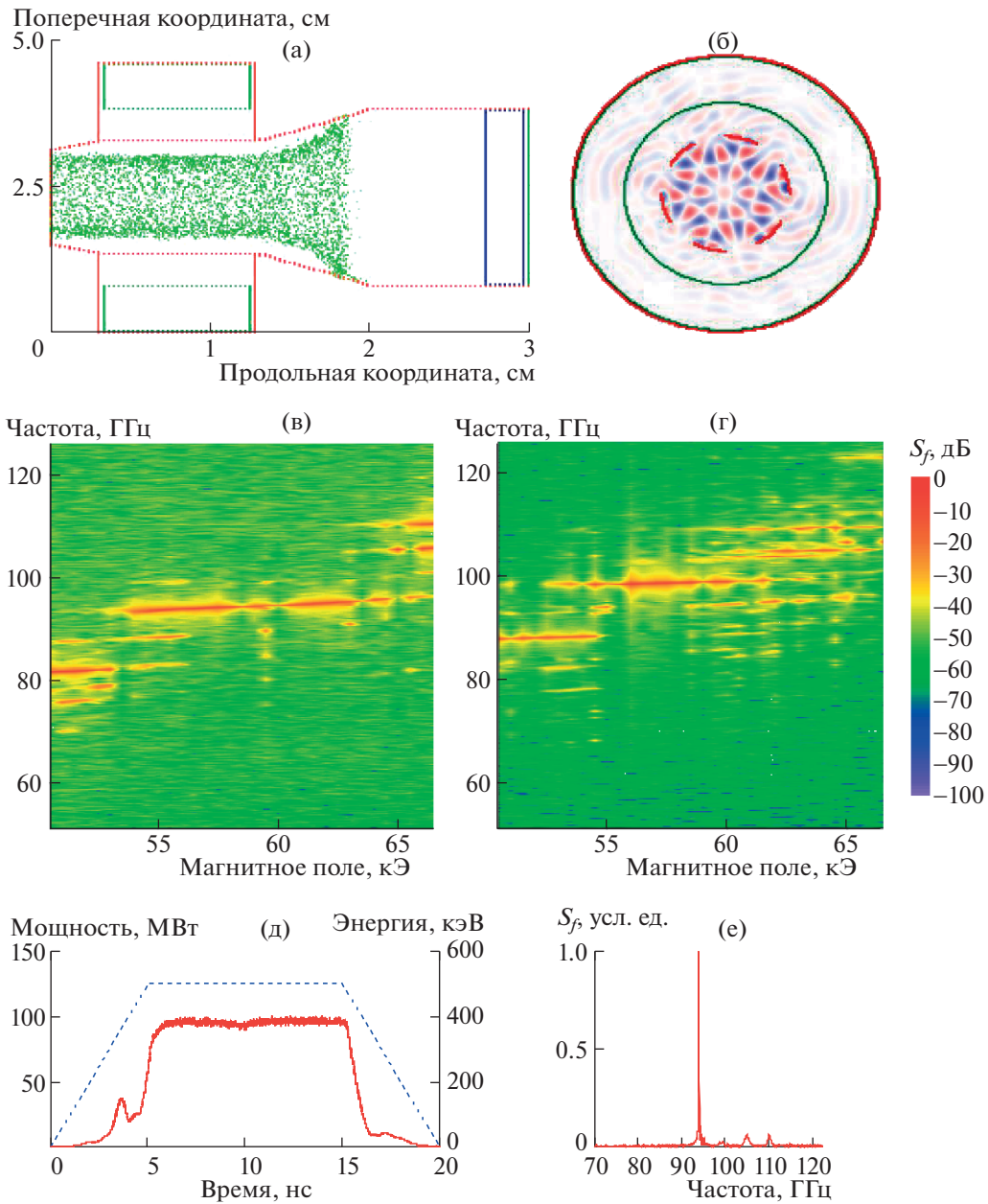
можно выделить две области с соразмерными значениями коэффициентов связи:  $0.7 \leq R_0/R_{beam} \leq 0.75$  и  $0.87 \leq R_0/R_{beam} \leq 0.9$ . Второй диапазон является менее предпочтительным, поскольку при его использовании возникает проблема транспортировки пучка через закритическое сужение на катодном конце резонатора. Для случая сильноточного гиротрона необходимо принимать во внимание провисание потенциала пучка [13]:

$$\Delta U = \frac{2J_{beam} [A]}{\beta_{||}} Z_0 \ln \left( \frac{R_0}{R_{beam}} \right), \quad (6)$$

где  $J_{beam}$  — ток пучка,  $Z_0 = (4\pi\epsilon_0 c)^{-1} \approx 30\Omega$ ,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума. Рассматривая случай релятивистского электронного пучка с энергией 500 кэВ и питч-фактором  $g = 1.0$ , для которого  $\beta_{||} \approx 0.6$ , и ограничивая падение потенциала пучка величиной в 50–70 кэВ, из (8) можно вычислить допустимый ток пучка, который составляет величину 1.5–2 кА.

Численное моделирование гиротрона проводилось методом крупных частиц с использованием трехмерной версии PIC-кода KARAT [14]. На рис. 4 а,б показана геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц. В моделировании винтовой электронный пучок (1) с энергией 500 кэВ, током 2 кА, питч-фактором 1.0, радиусом инжекции 7 мм и начальным разбросом по поперечным скоростям около 40% возбуждал резонатор (2) с радиусом 9.5 мм с шестью продольными щелями.

Электронный импульс задавался в форме трапеции с длительностью переднего и заднего фронта 5 нс и длительностью однородного участка 10 нс (рис. 4д). На выходе электроны высаживались на стенку электродинамической системы за счет введения спадающего участка магнитного поля. Для моделирования условий излучения на коллекторном конце пространства взаимодействия был размещен поглощающий слой (3) с пе-



**Рис. 4.** Результаты моделирования сильноточного гиротрона диапазона 3 мм: а – продольное сечение пространства взаимодействия, б – поперечное сечение и структура рабочей моды, в – зависимость спектра излучения от величины магнитного поля для случая открытых поперечных щелей, г – то же для случая регулярного цилиндрического волновода, д, е – форма выходного сигнала и полный спектр СВЧ-импульса при магнитном поле 56 кЭ.

ременной проводимостью, коэффициент отражения от которого не превышал 1% от мощности падающей волны. Аналогичный слой был размещен вокруг резонатора для поглощения излучения, проникающего через щели.

Моделирование показало, что электронный пучок устойчиво возбуждает связку мод  $H_{6,4}$  и  $H_{12,2}$ , что подтверждается поперечной структурой ВЧ-поля (рис. 4б), идентичной собственной моде холодного щелевого резонатора, полученной в

рамках метода конечных элементов (рис. 2д). При этом полоса одномодового возбуждения такой “супермоды” при изменении ведущего магнитного поля составляет около 12% (рис. 4в). Это более чем в два раза превышает ширину полосы одномодового возбуждения для случая регулярного резонатора (закрытого в поперечном направлении) такого же поперечного сечения, которая составляет величину около 5% (рис. 4г). Максимальная мощность излучения достигает уровня в

100 МВт, что соответствует КПД 10%. Это заметно меньше максимального КПД в регулярной системе, который может превышать 20%, что связано с довольно значительными дифракционными потерями в поперечном направлении, а также со стоячей по азимуту структурой рабочей моды.

Вместе с тем, путем уменьшения размеров щелей можно обеспечить повышение эффективности электронно-волнового взаимодействия. Однако при этом происходит сокращение области одномодовой генерации, что в реальном эксперименте, в условиях нестабильности энергетических параметров электронного потока, может оказаться недопустимым.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительно низкая добротность колебаний предложенного резонатора не позволяет использовать его напрямую в традиционных гиротронах со слабoreлятивистскими электронными пучками. Это связано с тем, что оптимальная длина резонатора таких гиротронов в несколько раз больше, по сравнению с сильноточными гиротронами. В результате значение дифракционной добротности будет сравнимо с величиной добротности, связанной с потерями излучения через щели.

Щели, прорезанные в боковой стенке резонатора, имеют конечную ширину, поэтому для селективного возбуждения рабочей комбинации мод может потребоваться внесение дополнительных элементов, увеличивающих ее внешнюю добротность. С этой целью вокруг основного резонатора следует разместить аналогичную ему структуру, смещенную по угловой координате на  $\pi/M$  (рис. 1б). Очевидно, что оптимальное радиальное расстояние между ними составляет  $\approx n\lambda/4$ , когда дополнительная структура представляет собой согласующий шлейф.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена 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. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Кошелев М.А., Третьяков М.Ю., Цветков А.И. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред // УФН. 2016. Т. 186. № 6. С. 667–677. <https://doi.org/10.3367/UFN.2016.02.037801>
2. Гольденберг А.Л., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Литвак А.Г., Флягин В.А. Мазеры на циклотронном ре-

зонансе: состояние и проблемы // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 6. С. 635–669.

3. Shcherbinin V.I., Moskvitina Y.K., Avramidis K.A., Jelonnek J. Improved Mode Selection in Coaxial Cavities for Subterahertz Second-Harmonic Gyrotrons // IEEE Trans. Electron Dev. 2020. V. 67. № 7. P. 2933–2939. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2996179>
4. Bandurkin I.V., Kalynova G.I., Kalynov Y.K., Osharin I.V., Savilov A.V., Shchegolkov D.Y. Mode Selective Azimuthally Asymmetric Cavity for Terahertz Gyrotrons // IEEE Trans. Electron Dev. 2021. V. 68. № 1. P. 347–352. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3039209>
5. Гинзбург Н.С., Кременцов В.И., Петелин М.И., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. Экспериментальное исследование мазера на циклотронном резонансе с релятивистским сильноточным электронным пучком // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 2. С. 378–385.
6. Sirigiri J.R., Kreisler K.E., Machuzak J., Mastovsky I., Shapiro M.A., Temkin R.J. Photonic-Band-Gap Resonator Gyrotron // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. № 24. P. 5628–5631. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.5628>
7. Fu W., Guan X., Yan Y. Generating High-Power Continuous-Frequency Tunable Sub-Terahertz Radiation From a Quasi-Optical Gyrotron With Confocal Waveguide // IEEE Electron Dev. Lett. 2020. V. 41. № 4. P. 613–616. <https://doi.org/10.1109/LED.2020.2972380>
8. Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu., Zhelezov I.V. High-Power Terahertz-Range Planar Gyrotrons with Transverse Energy Extraction // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. № 10. Art.no.105101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.105101>
9. Danilov Y.Y., Leontyev A.N., Leontyev N.V., Rozental R.M., Tarakanov V.P., Zhelezov I.V., and Abubakirov E.B. Slit-Type Cavities for Cyclotron Resonance Masers Operating at TM Modes // IEEE Trans. Electron Dev. 2021. V. 68. № 4. P. 2130–2132. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3055162>
10. Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. Пер с англ. М.: Советское радио, 1965. Т. 1. 784 с.
11. Ваганов Р.Б., Матвеев Р.Ф., Мериакри В.В. Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. М.: Советское радио, 1972. 232 с.
12. Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. К нелинейной теории релятивистского гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 6. С. 754–763.
13. Tsimring S.E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. John Wiley & Sons, Inc. 2007.
14. Tarakanov V.P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // Proc. EPJ Web Conf. 2017. V. 149. Art.no. 04024. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20171490>

## HIGHLY SELECTIVE OVERSIZED SLITED CAVITIES FOR RELATIVISTIC GYROTRONS OPERATING IN THE MILLIMETER WAVEBAND

**Y. Y. Danilov<sup>a</sup>, A. N. Leontyev<sup>a</sup>, A. M. Malkin<sup>a,b</sup>, R. M. Rozentel<sup>a</sup>, D. Y. Shchegolkov<sup>a</sup>,  
and Corresponding Member of the RAS N. S. Ginzburg<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhni Novgorod, Russia*

<sup>b</sup>*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russia*

Based on the analytical approach and numerical simulations, we show that in an oversized cylindrical cavity with  $M$  longitudinal slits, coupling of the partial modes of a regular waveguide with  $M$  and  $2M$  azimuthal indexes leads to formation of high-Q modes at quasi-critical frequencies. This provides a possibility for selective excitation of such modes by helical electron beams in millimeter-waveband relativistic gyrotrons.

*Keywords:* slit-type cavities, gyrotrons, millimeter radiation