

# Исследование дискриминации паразитных мод в азимутально-асимметричном резонаторе гиротрона с большой орбитой на третьей циклотронной гармонике.

Ю.К. Калынов, Г.И. Калынова, И.В. Ошарин, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в данной работе предложен и исследован метод повышения селективности рабочей моды открытого резонатора гиротрона с большой орбитой (ГБО), работающего на третьей циклотронной гармонике в терагерцовом диапазоне частот. Метод основан на применении продольной деформации стенки резонатора в виде прямоугольных канавок. Предлагаемый подход может быть использован для повышения селективности открытых резонаторов в других приложениях.

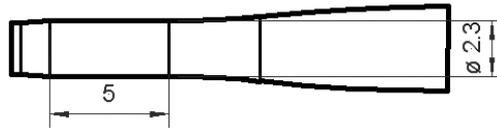
**Ключевые слова:** селективность, открытый резонатор, гиротрон, третья циклотронная гармоника

## 1. Введение

В настоящее время гиротроны [1] являются наиболее мощными источниками когерентного излучения на субтерагерцовых частотах [2-7]. Гиротрон с большой орбитой (ГБО) представляет собой разновидность гиротрона, в котором используется тонкий пучок электронов движущихся по винтовым траекториям вокруг оси резонатора. Это обеспечивает взаимодействие электронов только с модой резонатора, чей азимутальный индекс совпадает с номером резонансной циклотронной гармоники. Этот подход позволил реализовать ГБО, работающий на частоте 1 ТГц на третьей циклотронной гармонике [5]. В этом генераторе рабочая мода селективно возбуждалась на высокой гармонике при использовании простого регулярного аксиально-симметричного резонатора. В эксперименте 80 кВ/0.7 А была получена выходная мощность излучения 400 Вт. Теперь мы планируем использовать этот ГБО для получения ТГц-разряда в плотной плазме для создания мощного точечного источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения. Это приложение требует увеличения мощности до уровня нескольких киловатт [8]. Оценки показывают, что увеличение напряжения/тока электронного пучка до 100 кВ/1.2 А решает эту проблему. Однако попытка увеличить мощность генерации за счет увеличения мощности электронного пучка столкнулась с естественными ограничениями, связанными с проблемой недостаточной дискриминации паразитных мод. В такой ситуации для обеспечения селективности гиротрона необходимо использовать электродинамические методы селекции связанные с использованием резонаторов сложной формы. Мы предлагаем использовать резонатор, поперечное сечение которого обладает несколькими азимутальными неоднородностями (канавками) занимающими всю длину его цилиндрической части [9].

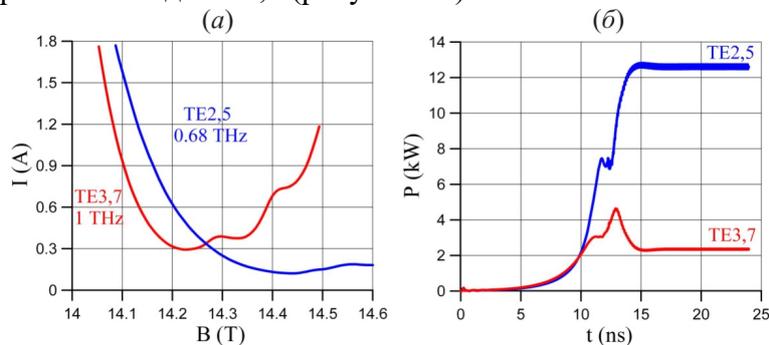
## 2. Моделирование азимутально-ассимметричных резонаторов с продольными канавками

При моделировании рассматривался резонатор с цилиндрической частью имеющей длину 5 мм и радиус 1.15 мм, рассчитанный для рабочей моды TE<sub>3,7</sub> на частоте 1 ТГц (рисунок 1).



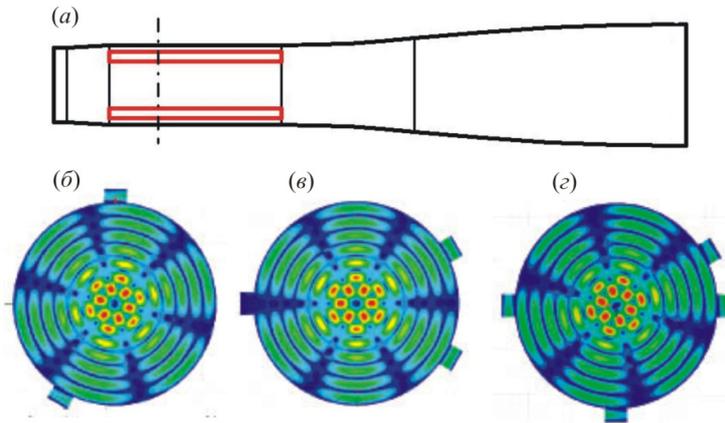
**Рисунок 1.** Профиль слабонерегулярного резонатора со скругленным дифракционным выводом излучения рассчитанный для рабочей моды  $TE_{3,7}$  на частоте 1 ТГц.

Согласно моделированию, в аксиально-симметричном варианте область генерации рабочей моды значительно перекрывается областью генерации близкой паразитной моды на второй гармонике  $TE_{2,5}$  в результате ее расширения, вызванного увеличением ускоряющего напряжения (рисунок 2а). Моделирование на основе двухволнового пространственно-временного числового кода процесса установления колебаний в слабонерегулярном резонаторе в режиме магнитного поля 14.09 Тл и тока пучка 1.2 А показало, что даже в этом оптимальном для рабочей моды режиме доминирует паразитная мода  $TE_{2,5}$  (рисунок 2б).



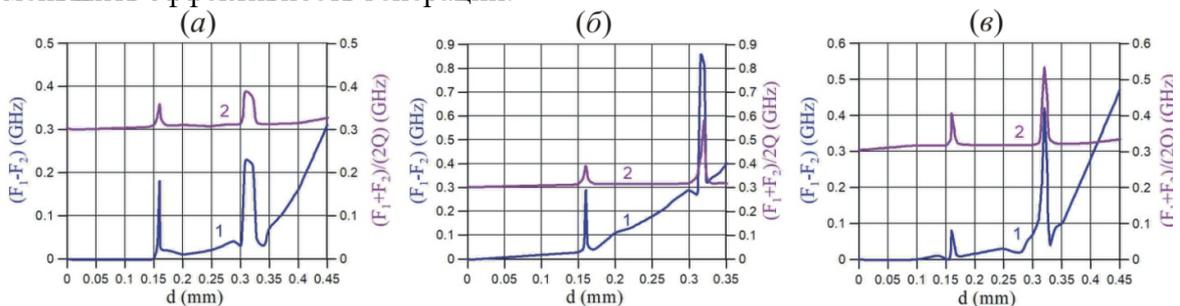
**Рисунок 2.** Расчетные стартовые токи для рабочей  $TE_{3,7}$  моды на третьей и паразитной  $TE_{2,5}$  моды на второй циклотронных гармониках (а) и нестационарное моделирование двухмодового взаимодействия  $TE_{3,7}$  и  $TE_{2,5}$  с электронным пучком в режиме 100кВ/1.2А с питч-фактором 1.5 в магнитном поле 14.09 Тл (б) в аксиально-симметричном резонаторе.

Для решения проблемы предлагается использовать резонатор с азимутальными неоднородностями в виде канавок (рисунок 3а). Канавки имеют прямоугольное сечение, занимают всю длину цилиндрической части резонатора и разнесены по азимуту. Глубина канавок 0.15 мм составляет примерно половину длины волны рабочей моды  $TE_{3,7}$ , а их ширина  $d$  является параметром, по которому выполняется оптимизация. Рассматривались аксиально-асимметричные резонаторы с двумя (угол  $150^\circ$ ) (рисунок 3 б), с тремя (углы  $150^\circ$  и  $60^\circ$ ) (рисунок 3 в) и четырьмя (углы  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $150^\circ$ ) (рисунок 3 г) канавками. Азимутальное расположение канавок подбиралось согласно поперечной структуре рабочей моды и обеспечения ее вращения. В расчетах мы рассматриваем “холодную” поперечную двумерную задачу с помощью программы ANSYS HFSS для электродинамического моделирования СВЧ структур [10]. Согласно моделированию, в азимутально-асимметричном резонаторе рабочая мода  $TE_{3,7}$  расщепляется на две волны с той же структурой, отличающиеся собственными частотами и омическими добротностями.



**Рисунок 3.** Продольный профиль резонатора с продольными канавками (а), а также расчетные поперечные структуры рабочей моды ТЕ3,7 в сечении, отмеченном штрихпунктирной линией с двумя (б) тремя (в) и четырьмя (г) канавками шириной 0.25 мм.

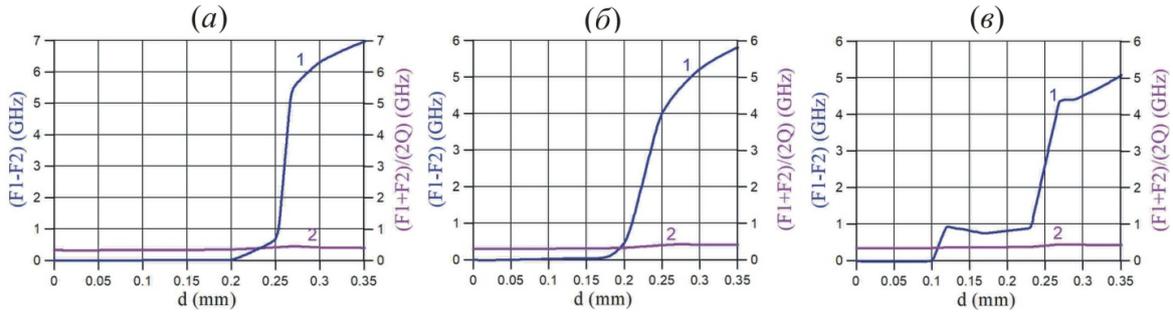
При этом для сохранения вращения рабочей моды различие в частотах этих волн не должно выходить за пределы полосы резонанса во всем рассматриваемом диапазоне ширин канавок (рисунок 4). Полоса резонанса оценивалась с учетом дифракционной добротности резонатора и средней омической добротности волн расщепления. Когда ширина канавки становится близка полудлине ( $d=0.16\text{мм}$ ) и длине волны ( $d=0.31\text{мм}$ ) рабочей моды, создаются условия связи с ближайшей по частоте модой ТЕ22,1. В результате разница частот волн расщепления резко увеличивается, что может привести к остановке вращения рабочей моды. Также, разница частот волн расщепления быстро увеличивается при превышении шириной канавок значения  $0.35\text{мм}$  (рисунок 4 а, в). В качестве рабочей ширины канавки для азимутальной неоднородности в виде двух и четырех канавок естественно выбрать ширину  $0.27\text{ мм}$ . Такая ширина канавок обеспечивает близость частот волн расщепления рабочей моды и, в тоже время, широкая канавка более заметна для сравнительно низкочастотной паразитной волны. В случае трех канавок частоты начинают разбегаться уже при превышении  $0.2\text{ мм}$  (рисунок 4 б). Поэтому использование такой азимутальной неоднородности может остановить вращение рабочей моды, вдвое увеличить стартовый ток и значительно уменьшить эффективность генерации.



**Рисунок 4.** Зависимости разности частот волн расщепления рабочей моды ТЕ3,7 (линия 1) и ширины полосы резонанса азимутально-асимметричного резонатора (линия 2) от ширины канавок для случаев двух (а), трех (б) и четырех (в) канавок.

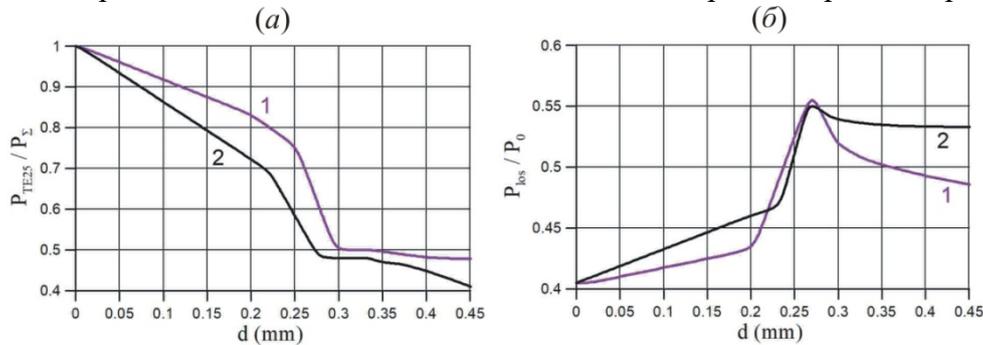
Что касается паразитной моды ТЕ2,5, то канавки, ввиду их нерезонансных для данной моды размеров, оказывают на нее три негативных воздействия. Во-первых, происходит остановка вращения волн, возникающих при расщеплении паразитной моды на азимутальной неоднородности, когда разница их частот, становится больше, чем ширина резонанса (рисунок 5). Во-вторых, неоднородность изменяет поперечную структуру паразитной волны, связывая ее с другими невозмущенными поперечными

модами. Это также уменьшает величину взаимодействующего с электронным пучком электрического поля паразитной моды (рисунок 6 а). В-третьих, изменение поперечной структуры паразитной волны увеличивает ее омические потери (рисунок 6 б).



**Рисунок 5.** Зависимости разности частот волн расщепления паразитной моды TE<sub>2,5</sub> (линия 1) и ширины полосы резонанса азимутально-асимметричного резонатора (линия 2) от ширины канавок для случаев 2-х (а), 3-х (б) и 4-х канавок (в).

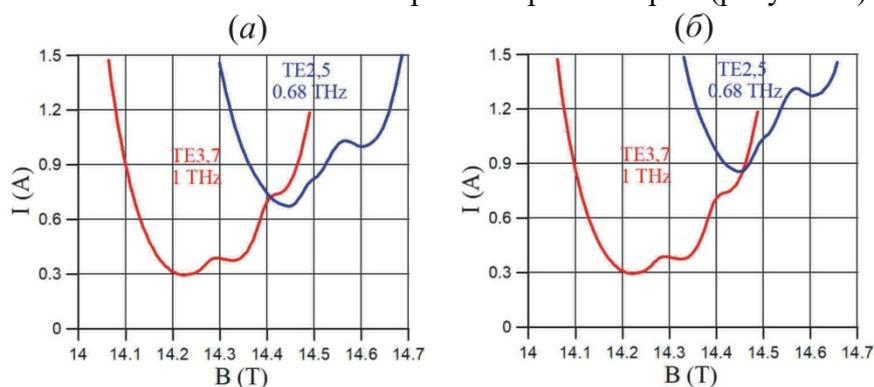
Расчеты показали, что с увеличением числа канавок остановка вращения волн расщепления паразитной моды происходит при меньшей их ширине. В случае четырех канавок разница частот волн, образуемых при трансформации паразитной моды, превышает полосу резонатора уже при ширине канавки около четверти длины волны моды TE<sub>2,5</sub> (0.11 мм). В то же время, в случае двух канавок остановка вращения наступает лишь при ширине близкой половине длины волны паразитной моды. Тем не менее во всех рассмотренных случаях при ширине канавки 0.27 мм паразитная мода TE<sub>2,5</sub> останавливает свое вращение, что соответствует увеличению ее стартового тока в два раза по сравнению с аналогичным аксиально-симметричным резонатором.



**Рисунок 6.** Доля мощности моды TE<sub>2,5</sub> в мощности совокупной структуры поля для резонатора с двумя (линия 1) и четырьмя (линия 2) канавками (а) и усредненные омические потери волн, возникающих при трансформации моды TE<sub>2,5</sub>, в резонаторе с двумя (линия 1) и четырьмя (линия 2) канавками (б) в зависимости от их ширины.

Азимутальная неоднородность в виде четырех канавок разрушает структуру паразитной моды TE<sub>2,5</sub> эффективнее неоднородности в виде двух канавок (рисунок 6 а). Неоднородность из четырех канавок шириной 0.27 мм оставляет лишь половину мощности электрической составляющей поля моды TE<sub>2,5</sub> в совокупной полевой структуре, что соответствует величине коэффициента увеличения стартового тока паразитной моды равной 2. Для неоднородности из двух канавок соответствующие значения составляют 0.65 и 1.54. Что касается омических потерь, то при ширине канавки 0.27 мм, согласно расчетам, их величина близка и максимальна для любого из рассмотренных числа канавок и составляет порядка 0.55 (рисунок 6 б), что соответствует коэффициенту увеличения стартового тока паразитной моды около

1.8. В результате, умножая полученные коэффициенты, получаем, что применение аксиально-асимметричного резонатора с двумя и четырьмя канавками шириной 0.27 мм увеличивает пусковой ток паразитной моды TE<sub>2,5</sub> соответственно в 5.5 и в 7 раз по сравнению с аналогичным симметричным резонатором (рисунок 7).



**Рисунок 7.** Расчетные стартовые токи для рабочей TE<sub>3,7</sub> моды на третьей и паразитной TE<sub>2,5</sub> моды на второй циклотронных гармониках в азимутально-асимметричном резонаторе с двумя (а) и четырьмя (б) канавками шириной 0.27 мм.

### 3. Заключение

Таким образом, продемонстрирован подход, позволяющий реализовать резонатор гиротрона с азимутальными неоднородностями, не влияющими на выбранную рабочую моду, но существенно ухудшающими условия возбуждения паразитной волны. Поскольку параметры неоднородностей не связаны с характеристиками паразитной волны, ясно, что этот метод должен работать и в том случае, когда необходимо подавить сразу несколько таких волн.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00599)**.

#### Список литературы

1. Gaponov A.V. et al. The induced radiation of excited classical oscillators and its use in high-frequency electronics // Radiophysics Quantum Electron. – 1971. – Т. 10. – №. 9-10. – С. 794-813.
2. Idehara T. et al. The first experiment of a THz gyrotron with a pulse magnet // Int. J. Infr. Millim. Waves – 2004. – Т. 27. – №. 3. – С. 319-331.
3. Hornstein M. K. et al. Continuous-wave operation of a 460-GHz second harmonic gyrotron oscillator // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2006. – Т. 34. – №. 3. – С. 524–533.
4. Glyavin M.Y. et al. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // Phys. Rev. Lett – 2008. – Т. 100. – №. 1. – С. 015101.
5. Bratman V.L. et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range // Phys. Rev. Lett – 2009. – Т. 102. – №. 24. – С. 245101.
6. Temkin R. J. Development of terahertz gyrotrons for spectroscopy at MIT // THz Sci. Technol – 2014. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-9.
7. Kalynov Y.K. et al. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic // Appl. Phys. Lett – 2019. – Т. 114. – №. 21. – С. 213502.
8. Abramov I.S. et al. Extremeultraviolet light source for lithography based on an expanding jet of dense xenon plasma supported by microwaves // Phys. Rev. A, Gen. Phys. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 034065.
9. Bandurkin I.V. et al. Mode Selective Azimuthally Asymmetric Cavity for Terahertz Gyrotrons // IEEE Transactions on Electron Devices – 2021. – Т. 68. – №. 1. – С. 347-352.
10. ANSYS HFSS as a part of the ANSYS Electromagnetics Suite 2022R1, license of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, customer #280108.