

Гиротрон на высокой циклотронной гармонике со сложной продольной структурой рабочей волны

Ю.К. Калынов, Д.В. Лазарев, И.В. Ошарин, А.В. Савилов

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

Аннотация: в работе предложен гиротронный резонатор с прямоугольной нерегулярностью, представляющей собой прямоугольное сужение стенки. Проведенное исследование схемы на параметрах умеренно-релятивистского гиротрона показывает, что значительное снижение дифракционной добротности дает возможность более эффективной (с повышенным волновым КПД) работы таких приборов.

Ключевые слова: гиротроны, терагерцовое излучение, резонаторы, селекция мод

1. Введение

К настоящему моменту наиболее перспективными источниками излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн с относительно высокой мощностью выходного излучения являются гиротроны [1-7]. Главным препятствием для продвижения гиротронов в более высокие частоты является сложность создания достаточно мощных криомагнитов, вследствие чего практически неизбежной является работа на высоких гармониках гирочастоты. Для решения возникающей в этом случае проблемы модовой селективности эффективной схемой является конфигурация гиротрона с большой орбитой (ГБО) [5, 6].

Данная работа посвящена исследованию возможностей дальнейшего повышения эффективности импульсного терагерцового ГБО на третьей циклотронной гармонике, ранее успешно реализованного в эксперименте [5]. Важной проблемой в этом гиротроне (как и в других коротковолновых гиротронах, работающих на высоких циклотронных гармониках) является большая доля (в данном генераторе – около 90%) омических потерь мощности, отбираемой волной у электронного пучка. Это объясняется низкой интенсивностью электронно-волнового взаимодействия на высоких циклотронных гармониках и, как следствие, необходимостью использовать протяженные рабочие резонаторы, обладающие дифракционными добротностями, существенно превышающими омические. В последних экспериментах [7] упомянутый выше терагерцовый ГБО был испытан с тем же электронным пучком (80 кВ / 0,7 А / 10 мкс), но с модифицированной электродинамической системой. Дифракционная добротность и, следовательно, доля омических потерь, была уменьшена за счёт более плавной выходной секции. Также новый резонатор содержал короткую нерегулярность в форме прямоугольного расширения стенки, обеспечивающую повышенную селективность возбуждения рабочей моды $TE_{3,7}$. В новом эксперименте выходная мощность была увеличена с 0,4 кВт до 1,3 кВт, диапазон параметров селективного возбуждения рабочей волны был значительно расширен. В настоящей работе обсуждается возможный механизм, обеспечивающий существенное снижение дифракционной добротности в таком резонаторе за счёт влияния короткого расширения стенки на продольную структуру рабочей волны. Обсуждается также и модификация этого подхода за счёт использования короткого сужения стенки резонатора. На параметрах умеренно-релятивистских гиротронов терагерцового частотного диапазона показано, что применение таких схем делает возможным двукратное повышение выходной мощности за счёт снижения доли омических потерь.

2. Терагерцовый ГБО с нерегулярным резонатором

Возможное объяснение положительного влияния нерегулярности в эксперименте [7] состоит в том, что дополнительный прирост выходной мощности был обеспечен за счет воздействия селективной канавки на продольную структуру рабочей волны. Согласно теории, если канавка имеет резонансный характер (радиус и длина выбраны так, чтобы обеспечить внутри полную трансформацию рабочей поперечной моды $TE_{3,7}$ в следующую радиальную моду $TE_{3,8}$), то наличие такой канавки не должно нарушать продольную структуру рабочей волны [8,9]. Предположительно, в использованном в эксперименте резонаторе радиус нерегулярности был несколько меньше расчетного резонансного значения. В этой ситуации канавка работала не как идеальный преобразователь мод, а как неоднородность для рабочей волны. Таким образом, канавка возмущает продольную структуру волны.

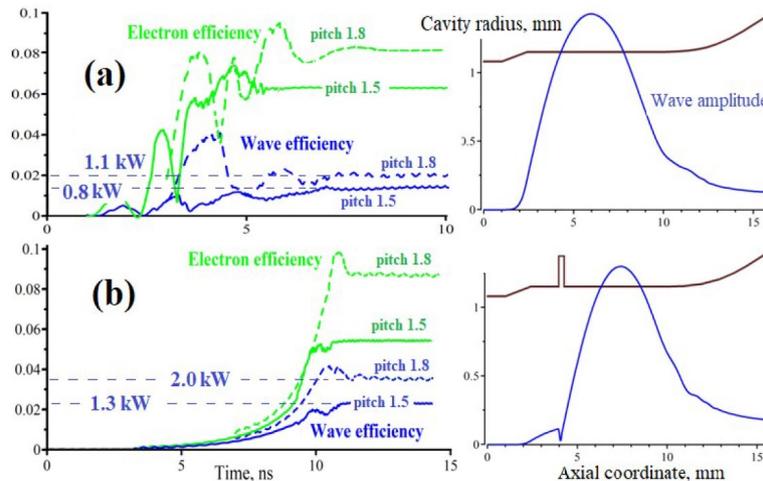


Рисунок 1. Результаты численных расчетов. Электронный и волновой КПД гиротрона, а также продольные структуры волны внутри рабочего резонатора в стационарном режиме. Случай регулярного (а) резонатора со сглаженным дифракционным выводом излучения, а также тот же резонатор с возмущающей продольную структуру нерегулярностью (b).

Мы провели моделирование системы с использованием кода, основанного на пространственно-временном подходе описания взаимодействия электронного пучка с волной с фиксированной поперечной структурой, но с нефиксированной пространственно-временной структурой [10,11]. Рассматривался приосевой электронный пучок 0,7 А со средним питч-фактором 1,5 и разбросом по скорости 35% (ширина функции распределения Гаусса). Исследовались случаи двух резонаторов: квазирегулярного резонатора (закругленная выходная секция), показанного на рис. 1 а, но без селективной канавки, и квазирегулярного с селективной канавкой (рис. 1 б). Для случая на рис. 1 а, моделирование предсказывает электронный и волновой КПД соответственно 6.2 % и 1.5 %. Соответствующая выходная мощность составляет около 0,8 кВт, а омические потери составляют $\approx 75\%$. Однако если учесть влияние нерезонансной канавки на продольную структуру волны (рис. 1 б), то, несмотря на небольшое снижение электронного КПД (до 5.5 %), волновой КПД возрастает до 2.4 % (соответствующая выходная мощность около 1,3 кВт) за счет снижения омических потерь до $\approx 60\%$. Очевидно, этот эффект вызван уменьшением дифракционной добротности из-за уменьшения эффективного размера продольного поля волны внутри резонатора. В то же время укорочение не приводит к уменьшению эффективной длины электронно-волнового взаимодействия, поскольку слабое волновое поле, присутствующее в области перед канавкой (рис.1 б), по-видимому, все еще работает как модулятор электронного пучка.

3. Модифицированный нерегулярный резонатор

В качестве развития описанного выше подхода был исследован резонатор, в котором вместо короткого расширения стенок внутри рабочего пространство использовалась нерегулярность, представляющая собой сужение стенки (рис. 2). Наиболее оптимальные результаты (существенное снижение дифракционной добротности рабочей моды при небольшом увеличении стартового тока) достигаются при радиусе нерегулярности $r = 0.995R_0$ (здесь R_0 – радиус рабочей части резонатора). В нестационарных пространственно-временных расчетах исследовался именно этот случай, при этом рассматривались три разные координаты центра неоднородности $\zeta_0/L = 0.34, 0.38$ и 0.42 . Моделирование показало, что в широкой области рабочих токов обеспечивается установление режима стационарной одноволновой генерации рабочей моды.

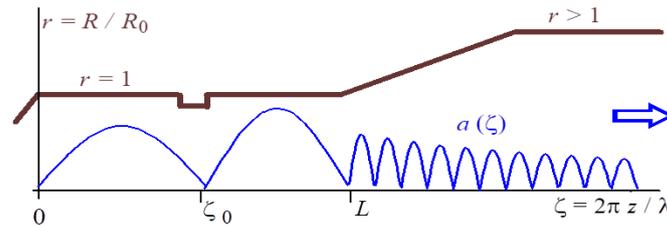


Рисунок 2. Модель гиротронного резонатора с коротким сужением стенки.

Как видно из результатов численных расчетов (рис. 3), при увеличении тока (нормированного на стартовый ток гиротрона с регулярным резонатором I_{st0}), максимальные (максимизированные по расстройке синхронизма Δ) электронный и волновой КПД увеличиваются. Хотя электронные КПД в гиротронах с регулярным резонатором и с резонаторами, содержащими нерегулярности, примерно одинаковы (рис. 3 а), при достаточно больших рабочих токах волновой КПД в гиротронах с нерегулярными резонаторами примерно в два раза превышает КПД в гиротроне с регулярным резонатором (рис. 3 б). При этом снижение добротности не приводит к заметному росту стартового тока (при рассмотренных координатах нерегулярностей он увеличивается лишь примерно на 20%).

При этом, однако, конкуренция рабочей и паразитной продольных мод оказывается важным фактором в нерегулярных системах. Рисунок 3 иллюстрирует работу гиротрона в режиме стационарной одноволновой генерации рабочей моды. При этом на рис. 3 кривые, описывающие гиротроны с нерегулярными резонаторами, обрываются при больших токах ($I/I_{st0} = 5 - 6$). Такой обрыв соответствует тому, что при больших токах расчеты, проведенные при расстройках синхронизма, оптимальных с точки зрения возбуждения рабочей моды, предсказывают неустойчивость одномодовой генерации рабочей моды и переход к совместной генерации рабочей и паразитной волн.

Заметим, что при относительно низких токах проблема конкуренции рабочей и паразитной моды решается просто – они возбуждаются при разных расстройках синхронизма (фазах пролета $\phi = \Delta L$). На рис. 4 показаны зоны генерации рабочей и паразитных волн и соответствующие нормированные электронный и волновой КПД в случае координаты неоднородности $\zeta_0/L = 0,38$. При небольшом превышении током стартового порога ($I/I_{st0} = 2,6$) паразитная мода возбуждается при углах пролета ϕ , приблизительно вдвое превышающих оптимальные угла пролета рабочей моды, причем зоны генерации рабочей и паразитной мод сильно разнесены по ϕ . С ростом соотношения I/I_{st0} зона генерации рабочей моды увеличивается, и при $I/I_{st0} = 3$ наступает перекрытие зон генерации двух мод.

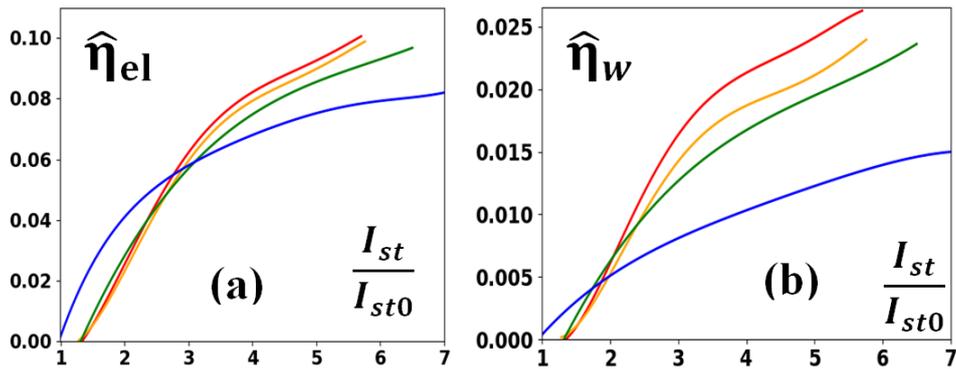


Рисунок 3. Зависимость (а) электронного и (б) волнового КПД от нормированного тока пучка. Синяя кривая соответствует регулярному случаю (нет неоднородности). Зеленая, красная и оранжевая кривая соответствуют координатам нерегулярности 0,34, 0,38, 0,42

Рисунок 5 иллюстрирует динамику конкуренции двух мод при разных фазах пролета $\phi = \Delta L$ в случае $I_{st}/I_{st0} = 4$, когда перекрытие зон генерации двух мод велико (см. рис. 4). В случае $\phi = 5$ паразитная мода не возбуждается. Значение $\phi = 6,4$ соответствует близкому к минимуму стартовому току паразитной моды (см. рис. 4). В этом случае сначала стартует именно паразитная мода, но ее стационарный режим оказывается неустойчивым по отношению к генерации рабочей моды. В результате паразитная мода «помогает» стартовать рабочей волне при расстройках, близких к оптимальным с точки зрения генерации рабочей моды. Соответственно, переход от генерации паразитной моды к рабочей приводит к росту как электронного, так и волнового КПД (последний растет и за счет того, что рабочая мода обладает гораздо меньшими омическими потерями). С дальнейшим ростом ϕ увеличивается длительность квазистационарной генерации паразитной моды, однако далее все же происходит срыв этой генерации с переходом к генерации рабочей моды. Похожие сценарии возбуждения генераторов, когда на начальной стадии стартует мода с более низким стартовым током, а на нелинейной стадии ее сменяет мода, обладающая большей эффективностью электронно-волнового взаимодействия, известны в теориях гиротронов [4, 12-14] и других разновидностей электронных мазеров.

При еще больших углах пролета ($\phi = 9$ на рис. 5) динамика системы меняется. По-прежнему сначала стартует паразитная мода, и режим ее одноволновой генерации по-прежнему нестабилен. Однако он сменяется не генерацией рабочей волны, а режимом совместной генерации двух волн. Именно этот эффект ограничивает рост электронного и волнового КПД с ростом тока (обрыв кривых на рис. 5 при больших токах соответствует именно переходу в автомодуляционному режиму генерации).

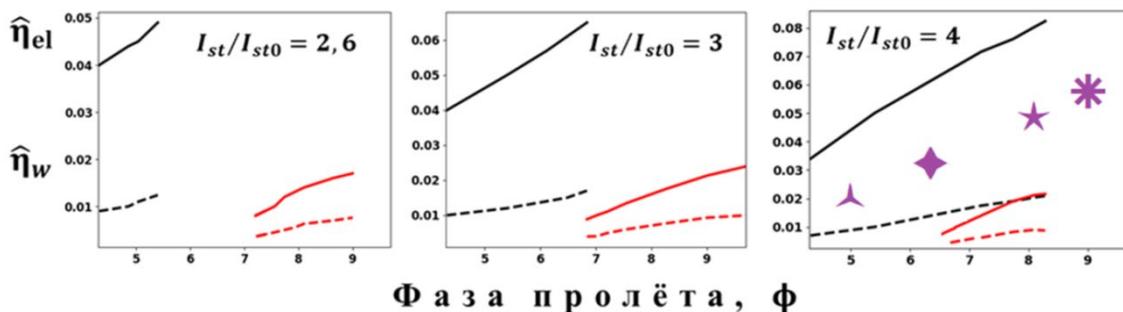


Рисунок 4. Зависимость электронного и волнового КПД от фазы пролёта при разных нормированных токах пучка при $\zeta_0/L = 0.42$ Черные и красные кривые соответствуют генерации рабочей и паразитной мод.

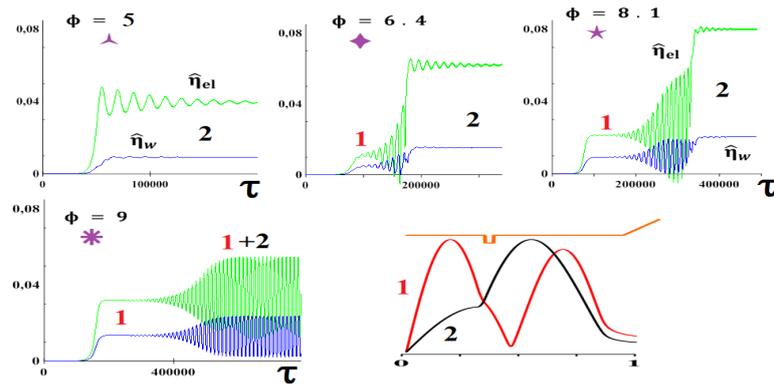


Рисунок 5. Зависимость электронного (зеленая кривая) и волнового КПД (синяя кривая) от нормированного времени $\tau = \omega_0 t$ при $I_{st}/I_{st0} = 4$ и разных фазах пролета (см. рис. 6). Показаны также характерные продольные структуры рабочей и паразитной мод.

3. Заключение

В работе предложена схема гиротронного резонатора, основанная на модификации за счет нанесения на стенку нерегулярности, эффективно влияющей на возбуждение рабочей волны. На параметрах умеренно-релятивистских гиротронов терагерцового частотного диапазона показано, что за счет использования такого подхода возможно двукратное повышение выходной мощности.

Исследование выполнено при поддержке **гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10116).**

Список литературы

1. Hornstein M. et al. Second harmonic operation at 460 GHz and broadband continuous frequency tuning of a gyrotron oscillator // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – Т. 52. – №. 5. – С. 798-807.
2. Idehara T. et al. The first experiment of a THz gyrotron with a pulse magnet // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2006. – Т. 27. – № 4. – С. 319–331.
3. Hornstein M. et al. Continuous-wave operation of a 460-GHz second harmonic gyrotron oscillator // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2006. – Т. 34. - № 3. – С. 524–533.
4. Glyavin M. et al. On the feasibility of a pulsed gyrotron with a peak rf power exceeding the power of the operating electron beam // Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – № 7.
5. Bratman V. et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range // Physical Review Letters. – 2009. – Т. 102. – № 24. – С. 245101.
6. Kalynov Yu. et al. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic // Applied Physics Letters – 2019. – Т. 114. – С. 213502.
7. Kalynov, Y. et al. Third-Harmonic 1 THz Large-Orbit Gyrotron with an Improved Quasi-Regular Cavity // IEEE Electron Device Letters. – 2023. – Т. 44. – № 10. – С. 1740–1743.
8. Bandurkin I. et al. Method of providing the high cyclotron harmonic operation selectivity in a gyrotron with a spatially developed operating mode // IEEE Trans. Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 9.
9. Bandurkin I. et al. Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 1. – С. 300-305.
10. Kalynov Y. et al. Competition of Oscillations at Different Cyclotron Harmonics in the Subterahertz Large-Orbit Gyrotron // IEEE Transactions an Electron Devices. – 2020. – Т. 67. – С. 3795.
11. Bandurkin I. et al. Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 1. – С. 300-305.
12. Kalynov Y. et al. Stability of excitation of traveling waves in gyrotrons with low-relativistic electron beams // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 11. – С. 4693-4699.
13. Kalynov Y. et al. Stable excitation of higher axial modes in the traveling-wave-tube regime in gyrotron cavities with additional loss elements // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – Т. 68. – № 9.
14. Peskov N. et al. Mode splitting effect in FEMs with oversized Bragg resonators// Physics of Plasmas. – 2016. – Т. 23. – № 7.