

## Резонаторы с повышенной селективностью для терагерцового гиротрона с большой орбитой

И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов

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

**Аннотация:** исследована новая схема импульсного гиротрона с большой орбитой, работающего в терагерцовом частотном диапазоне на третьей циклотронной гармонике, основанная на использовании модифицированного резонатора с пониженной дифракционной добротностью и улучшенной модовой селективностью. Ранее этот прибор был успешно экспериментально реализован с регулярным резонатором, мощность выходного излучения составляла 0.4 кВт на частоте 1 ТГц. Использование модифицированного резонатора позволяет увеличить выходную мощность до 1.3 кВт при увеличении диапазона параметров устойчивого селективного возбуждения моды на высокой циклотронной гармонике.

**Ключевые слова:** гиротроны, терагерцовое излучение, резонаторы, гармоники гирочастоты

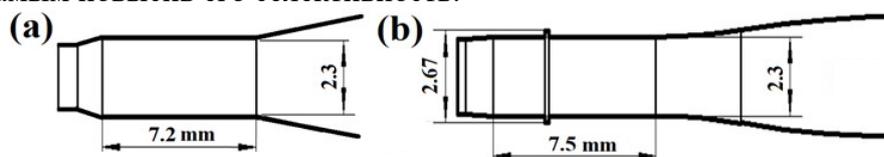
### 1. Введение

Гиротроны в настоящее время рассматриваются в качестве одних из наиболее перспективных источников когерентного излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов с относительно высокой средней мощностью и активно разрабатываются в ряде лабораторий мирового уровня [1-7]. Однако доступность криомагнитов является основным ограничивающим фактором для создания терагерцовых гиротронов, работающих на основном циклотронном резонансе. Это означает практически неизбежный переход к работе на высоких гармониках циклотронной частоты. В этом случае конфигурация гиротрона с большой орбитой (ГБО), основанная на использовании приосевого электронного пучка, может быть использована для повышения модовой селективности [5,6]. В 2008 г. успешно реализован импульсный 1 ТГц ГБО, в котором получена мощность 0,4 кВт при работе на третьей циклотронной гармонике при ускоряющем напряжении 80 кВ в магнитном поле 13,7 Тл [5]. Сейчас работы по увеличению мощности этого ГБО до уровня нескольких кВт [8]. В новом эксперименте был испытан ГБО с тем же электронным пучком (80 кВ/0,7 А/10 мкс), но при использовании модифицированного рабочего резонатора, что позволило уменьшить дифракционную добротность и, следовательно, долю омических потерь, за счёт плавного закругленного выхода. Кроме того, для повышения селективности генерации рабочей моды  $TE_{3,7}$  новый резонатор содержал нерегулярный элемент в виде осесимметричной прямоугольной канавки на стенке. Такой селектирующий элемент был предложен в [8,9] и ранее успешно использовался для улучшения модовой селективности в гиротроне на второй гармонике традиционной конфигурация [7]. Кроме того, был немного улучшен рабочий электронный пучок. В результате этих усовершенствований мощность выходного излучения была увеличена с 0.4 кВт до 1.3 кВт, а также значительно расширена зона генерации рабочей моды на третьей циклотронной гармонике.

### 2. Терагерцовый ГБО с модифицированным резонатором

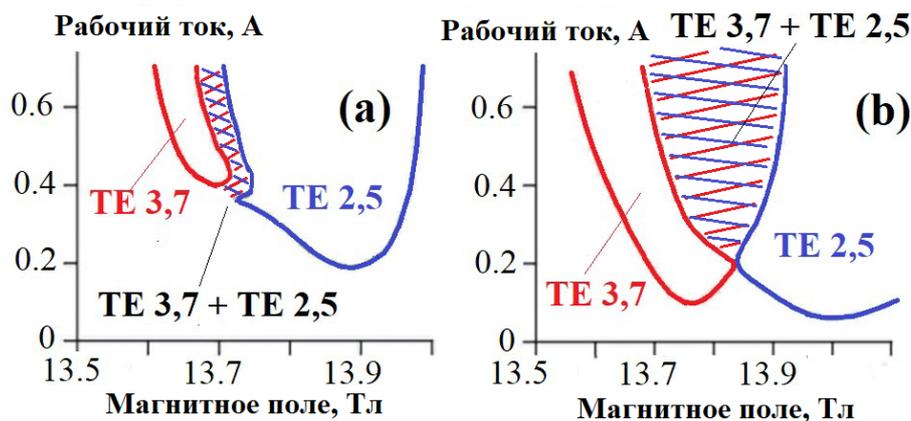
Увеличение мощности излучения упомянутого гиротрона может быть достигнуто за счет увеличения мощности электронного пучка и уменьшения доли омических

потерь в резонаторе. На первом этапе модификации ГБО использовалась такая же (как и в эксперименте [5]) электронная пушка с каспом магнитного поля, формирующим приосевой электронный пучок 80 кВ / 0,7 А / 10 мкс. Однако в этом случае использовавшийся в ранее регулярный резонатор (рис. 1 а), был заменен на резонатор с гладким закругленным дифракционным выходом излучения (рис. 1. б). За счет снижения дифракционной добротности это позволило, по расчетам, снизить долю омических потерь рабочего режима  $TE_{3,7}$  с 85-90% до 70-75%. Кроме того, цилиндрическая часть новой электродинамической системы содержала элемент в виде аксиально-симметричной канавки [7-9] с радиусом внутри, близким к радиусу отсечки для моды  $TE_{3,8}$ . Ширина такой неоднородности должна была обеспечивать практически полное отсутствие рассеяния рабочей волны. По предварительным расчетам, наличие этой канавки должно позволить расширить зону генерации рабочей моды, тем самым повысив его селективность.



**Рисунок 1.** (а) Профиль резонатора простейшей формы, использовавшийся в эксперименте [5]. (б) Профиль квазирегулярного резонатора со сглаженным дифракционным выводом излучения и с селективирующей канавкой, рассчитанной на моду  $TE_{3,7}$  на частоте около 1 ТГц, использовавшийся в новом эксперименте.

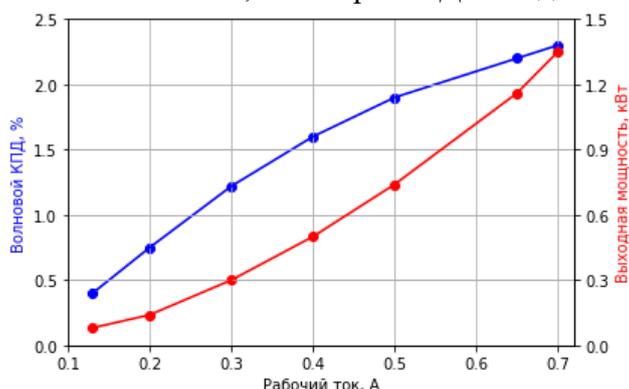
В эксперименте при энергии частиц 80 кэВ и в диапазоне рабочих магнитных полей 13,6-14,1 Тл на плоскости параметров «электронный ток - магнитное поле» обнаружены области устойчивой селективной генерации на моде  $TE_{3,7}$  на 3-й циклотронной гармонике и на моде  $TE_{2,5}$  на 2-й гармонике, а также область двухчастотной совместной генерации этих мод. Эти результаты сравнивались с такой же диаграммой, найденной ранее в первом эксперименте [5] (рис. 2). Моды идентифицировались по частоте излучения и по величине резонансного магнитного поля. Для определения частоты генерации выходной волновой сигнал исследовался набором волноводных фильтров с частотами отсечки от 0,8 ТГц до 0,4 ТГц.



**Рисунок 2.** Полученные в эксперименте зоны генерации мод  $TE_{3,7}$  на  $TE_{2,5}$  на плоскости параметров «ток электронного пучка - рабочее магнитное поле» в ГБО с традиционным регулярным резонатором (а), а также с модифицированным резонатором (б). Заштрихована область совместной генерации двух мод.

Согласно рис. 2, в новом эксперименте стартовые токи обоих конкурирующих мод уменьшились. Возможными причинами являются больший усредненный питч-фактор используемого в новом эксперименте электронного пучка, а также его улучшенная

юстировка. Согласно моделированию электронно-оптической системы, питч-фактор был увеличен с 1,4 до 1,5. Тем не менее, даже в этой ситуации (т.е. когда превышение рабочего тока стартовых порогов обеих волн стало больше) использование нового резонатора привело к увеличению области одночастотной генерации рабочей моды, а также области двухчастотной генерации. Также наблюдалось значительное снижение эффективности генерации паразитной моды в ее оптимальном режиме. Выходная мощность ГБО измерялась калориметром. Длительность импульсов генерации равнялась 8 мкс. Максимальная выходная мощность излучения при работе ГБО на 3-й циклотронной гармонике составила 1,3 кВт при КПД выходной волны 2,4 %.



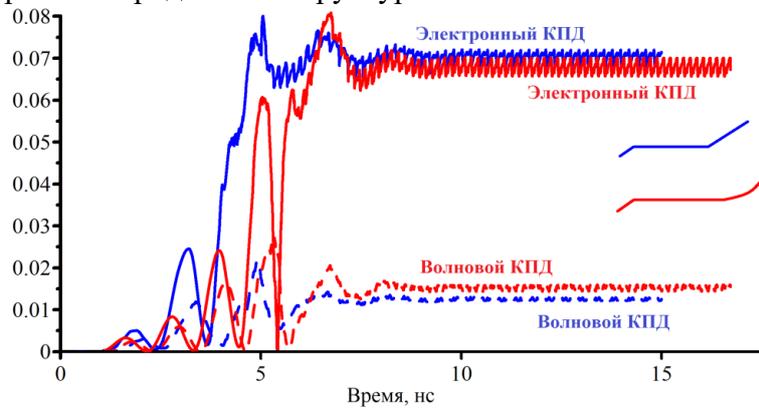
**Рисунок 3.** Измеренная мощность выходного излучения и соответствующий волновой КПД в зависимости от рабочего тока.

Описанное выше значительное (более чем в три раза по сравнению с предыдущим экспериментом [5]) увеличение выходной мощности требует дополнительных пояснений. По предварительным расчетам, использование в новом резонаторе специального закругленного конуса должно привести к снижению доли омических потерь рабочей моды с 85-90% до 70-75%. Это, в свою очередь, должно привести к увеличению мощности выходной волны лишь примерно в 2 раза (т.е. до 0,8 кВт вместо полученных в эксперименте 1,3 кВт).

Возможное объяснение состоит в том, что дополнительный рост выходной мощности был обеспечен за счет влияния селективирующей канавки на продольную структуру рабочей волны. Если канавка имеет резонансный характер (а именно ее радиус и длина выбраны так, чтобы обеспечить полную трансформацию рабочей поперечной моды  $TE_{3,7}$  в следующую радиальную моду  $TE_{3,8}$  внутри этой неоднородности), то наличие такого элемента не должно нарушать продольную структуру рабочей волны [8,9]. Предположительно, в резонаторе, использованном в эксперименте, радиус канавки был несколько меньше резонансного радиуса. В этой ситуации канавка работала скорее не как трансформатор мод  $TE_{3,7}$ ,  $TE_{3,8}$ ,  $TE_{3,7}$ , а как неоднородность для моды  $TE_{3,7}$ , возмущая ее продольную структуру.

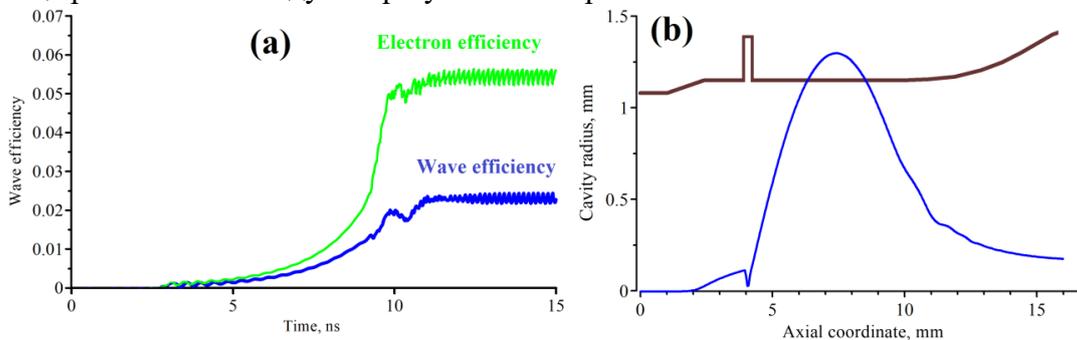
Расчеты электронно-волнового взаимодействия проводились на основе пространственно-временной модели взаимодействия между электронным пучком и волной с фиксированной поперечной структурой, но с нефиксированной продольной структурой; этот подход подробно описан в [11, 12]. В этих расчетах рассматривается приосевой электронный пучок с током 0,7 А, со средним питч-фактором 1,5 и с разбросом скоростей 35% (ширина гауссовой функции распределения). Учитывались случаи двух резонаторов, а именно квазирегулярного с закругленной выходной секцией (рис. 1, б), но без селективной канавки, и квазирегулярный резонатор со скругленным верхним конусом и с селективной канавкой, показанный на рис. 1, б (рис. 5 б). В последнем случае использовалась простейшая модель, когда канавка работает только как неоднородность для рабочей поперечной моды  $TE_{3,7}$  без трансформации

этой моды в другие моды. Однако стационарное «холодное» моделирование этого резонатора (основанное на подходе, учитывающем влияние трансформации мод на нерезонансную канавку [9,13]) также предсказывает существование волны с показанной на рис. 5 b продольной структурой.



**Рисунок 4.** Результаты моделирования терагерцового ГБО на третьей гармонике. Электронный (сплошные линии) и волновой КПД (пунктирные линии) для случая использования традиционного регулярного резонатора с коническим выходом (синие кривые), а также оптимизированного резонатора с плавным дифракционным выводом излучения (красные кривые).

Сначала исследовалось влияние оптимизированной сглаженной выходной секции резонатора на мощность излучения. В регулярном резонаторе с прямым коническим выходом (аналогичным «старому» резонатору, показанному на рис. 1, а) моделирование предсказывает выходную мощность волны 0,6 кВт и омические потери около 85 % (рис. 4). Сглаженный вывод несколько увеличивает (примерно на четверть) волновой КПД, однако и в этом случае выходная мощность значительно ниже полученной в эксперименте. Однако если учесть влияние нерезонансной канавки на продольную структуру волны (рис. 5), то, несмотря на некоторое снижение электронного КПД, волновой КПД возрастает до 2,4 % (соответствующая выходная мощность около 1,3 кВт) за счет снижения омических потерь до 60%. Это вызвано снижением дифракционной добротности из-за уменьшения эффективной протяженности поля волны внутри резонатора. В то же время укорочение не приводит к уменьшению эффективной длины электронно-волнового взаимодействия, так как слабое волновое поле, имеющееся в области перед канавкой (рис. 5 b), по-видимому, все еще работает как модулятор пучков электронов.



**Рисунок 5.** Посчитанные электронный и волновой КПД терагерцового ГБО на третьей гармонике в зависимости от времени (а), а также профиль резонатора с селективирующей канавкой и продольная структура поля рабочей волны в стационарном режиме (b).

Изначально целью использования канавки было улучшить селективность резонатора, и такое положительное влияние канавки на снижение омических потерь

не ожидалось. По-видимому, этот эффект заслуживает детального теоретического анализа и может стать основой метода снижения омических потерь в гиротронах с длинными резонаторами.

### 3. Заключение

Моделирование, проведенное для случая усредненного питч-фактора электронов, равного 1,5, предсказывает выходную мощность 1,3 кВт. Однако, естественно, измеренная в эксперименте мощность 1.3 кВт представляет из себя мощность в волновом пучке, прошедшем через выходное окно ГБО. С учетом потерь в волновом преобразователе и в окне гиротрона (на уровне 30-40%), можно сказать, что в эксперименте мощность волнового пучка на выходе из рабочего резонатора должна была быть около  $\approx 2$  кВт. Это означает, что, по-видимому, питч-фактор в электронном пучке был выше. По проведенным расчетам, для резонатора с канавкой (рис. 5 б) выходная мощность 2 кВт (и соответствующий выходной волновой КПД 3,5%) обеспечивается при усредненном питч-факторе, близком к 1,8. Такой большой питч-фактор, предусмотренный в новом эксперименте, объясняет значительное уменьшение стартовых токов как рабочего, так и паразитного режимов (по сравнению со старыми экспериментами [5], см. рис. 2). Отметим, что в проведенных расчетах увеличение питч-фактора с 1,5 до 1,8 не меняет долю омических потерь в случаях резонаторов без канавки и с ней. В результате даже при столь большом питч-факторе высокий уровень мощности выходной волны нельзя объяснить без учета положительного эффекта влияния канавки на долю омических потерь.

Исследование выполнено при поддержке **гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00599)**.

#### 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. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field // *Physical Review Letters*. – 2008. – Т. 100. - № 1. – С. 015101.
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. Bandurkin I. et al. Demonstration of a selective oversized cavity in a terahertz second-harmonic gyrotron // *IEEE Electron Device Letters*. – 2020. – Т. 41. № 9. – С. 1412-1415.
8. Kalynov Yu, et al. High-Power Pulsed Terahertz-Wave Large-Orbit Gyrotron for a Promising Source of Extreme Ultraviolet Radiation // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2020. – Т. 63. – С. 354.
9. Bandurkin I. et al. Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode // *IEEE Transactions Electron Devices*. – 2017. – Т. 64. – № 9. – С. 3893-3897.
10. Zarudneva G. et al. Radiation mode composition of open resonators in the form of axisymmetric, weakly irregular waveguides // *Radiophysics Quantum Electronics*. – 1988. – Т. 31. - № 3. – С. 254-257.
11. 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.
12. 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.
13. Bandurkin I. et al. Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2017. – Т. 64. – № 1. – С. 300-305.