

# Гиротроны для плазменных приложений с резонаторами сложного профиля

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

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

**Аннотация:** для гиротронов терагерцового частотного диапазона предложены схемы нерегулярных резонаторов, в которых достигается повышенная селективность генерации рабочей моды на высоких гармониках циклотронной частоты. Использование метода позволяет значительно повысить эффективность гиротронов, предназначенных для плазменных приложений.

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

## 1. Введение

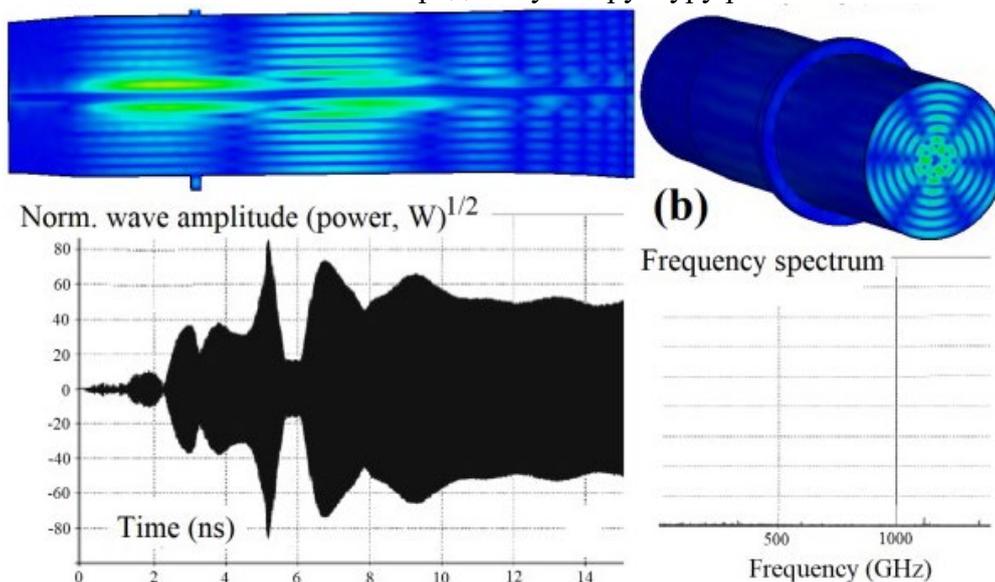
В настоящее время в ИПФ РАН исследуется возможность создания гиротронов, работающих на частоте 1 ТГц с выходной мощностью на уровне нескольких киловатт [1]. Такие гиротроны предполагается использовать для получения газоразрядной плазмы с целью создания стабильного точечного источника экстремального ультрафиолетового излучения. Для обеспечения излучения с частотой 1 ТГц при работе на основном циклотронном резонансе в слаборелятивистском гиротроне требуется магнитное поле около 38 Тл. Это обстоятельство делает традиционные гиротроны, работающие на основной циклотронной гармонике и использующие трубчатые электронные пучки, непривлекательными для применения в приложениях.

В такой ситуации целесообразна работа на высоких гармониках циклотронной частоты, то есть переход к конфигурации гиротрона с большой орбитой (ГБО), основанной на использовании приосевых электронных пучков и обеспечивающей улучшенную модовую селективность. В 2008 году был успешно реализован импульсный ГБО, в котором при работе на 3-й циклотронной гармонике на моде  $TE_{3,7}$  при ускоряющем напряжении 80 кВ и магнитном поле 13,7 Тл было получено излучение на частоте 1 ТГц с мощностью 0,4 кВт [2]. В настоящее время ведутся работы по модификации этого гиротрона с целью увеличения мощности излучения на частоте 1 ТГц до уровня нескольких кВт [1]. Дальнейшие улучшения связаны с использованием двух подходов. Первый основан на применении короткой селективной кольцевой нерегулярности. Второй метод предполагает использование протяжённых канавок, параллельных оси резонатора. Этот метод также исследуется и для случая традиционной гиротронной схемы с трубчатым пучком для реализации гиротрона W-диапазона на третьей гармонике.

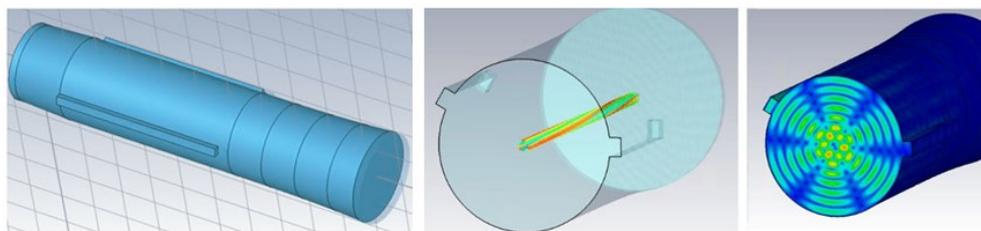
## 2. Терагерцовый ГБО на третьей гармонике со сложным резонатором

Как было сказано выше, первым методом модификации резонатора является использование резонансной канавки. Согласно теории, если канавка имеет резонансный характер (ее 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 [3,4]. 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. На первом этапе модификации в варианте 80 кВ / 0,7 А /10 мкс в новом эксперименте резонаторная схема с короткой селективной неоднородностью (рис. 1) позволила расширить диапазон параметров селективного возбуждения рабочей волны на высокой гармонике, а также увеличить мощность выходного излучения до 1,3 кВт за счет существенного снижения омических потерь [5]. Согласно CST-моделированию, это стало возможным благодаря переходу к работе на двухвариационной продольной моде, имеющей пониженную дифракционную добротность. Положительное влияние нерегулярности в эксперименте [5] состоит в том, что дополнительный прирост выходной мощности был обеспечен за счет воздействия селективной канавки на продольную структуру рабочей волны.



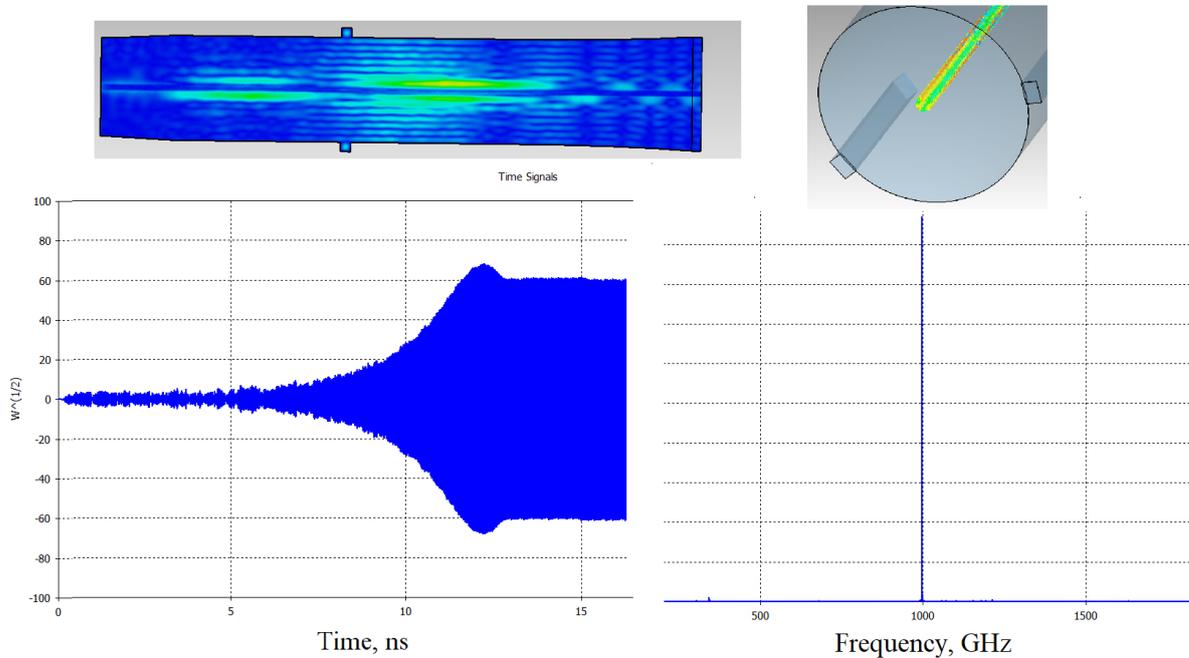
**Рисунок 1.** CST-моделирование гиротрона со слегка нерезонансной канавкой. Продольная и поперечная структуры волнового поля в установившемся режиме, зависимость амплитуды выходной волны от времени и частотный спектр выходного сигнала.



**Рисунок 2.** CST-моделирование гиротрона с резонатором с двумя продольными канавками, показана вакуумная часть, модуляция энергии электронов в электронном пучке (наблюдаются 3 вариации по углу), а также структура поля в поперечном сечении.

В качестве пути дальнейшего увеличения выходной мощности рассматривается переход от электронного пучка 80 кВ/0,7 А к 100 кВ/1,2 А. Моделирование CST предсказало возможность достижения выходной мощности около 4 кВт в этом случае за счет, во-первых, удвоения мощности электронного пучка, во-вторых, увеличения электронно-волновой связи в случае более высокой энергии электронов, в-третьих, уменьшения омических потерь. Однако в этом случае необходимо использовать специальный резонатор, обеспечивающий селективное возбуждение третьей циклотронной гармоники. Как вариант, это может быть резонатор с двумя продольными селективными канавками [6] (рис. 2). Дальнейшего увеличения

мощности генерации можно добиться, комбинируя подходы, представленные на рис. 1 и 2. Предварительные результаты горячего PIC-моделирования этого же ГБО 100 кВ/1,2 А показывают, что использование в резонаторе с двумя осевыми канавками еще и короткой азимутальной канавки (рис. 3) должно обеспечить переход к работе на двухвариационной продольной моде (аналогично случаю, показанному на рис. 1), что позволяет несколько улучшить эффективность работы этого прибора.

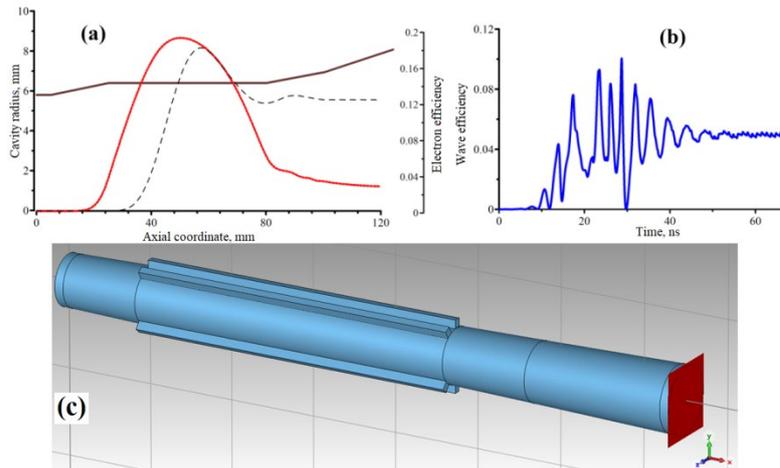


**Рисунок 3.** CST-моделирование гиротрона с резонатором с кольцевой канавкой и двумя продольными канавками, продольная структура поля, модуляция энергии электронов в электронном пучке, зависимость амплитуды выходной волны от времени и частотный спектр выходного сигнала.

### 3. Гиротрон W-диапазона с нерегулярным резонатором

Изложенный выше подход, основанный на использовании азимутально несимметричных резонаторов с продольными селективирующими элементами, исследовался для повышения частоты релятивистского гиротрона, ранее экспериментально реализованного на первой гармонике на частоте около 30 ГГц (напряжение – 280 кВ, ток – до 80 А, средний питч-фактор электронов – 1,5) [7]. Для обеспечения возбуждения в этом гиротроне был разработан предварительный проект селективирующего резонатора с несимметричным поперечным сечением, призванного обеспечить переход к работе в W-диапазоне за счёт возбуждения третьей циклотронной гармоники на рабочей моде  $TE_{9,1}$ . Проблема селективности решалась за счёт добавления в резонатор радиусом 6.39 мм четырёх азимутальных канавок глубиной 1.87 мм и шириной 1.6 мм (см. рисунок ниже). Такие канавки не возмущали поперечную структуру рабочей волны  $TE_{9,1}$  (и не останавливали ее вращения), однако существенным образом влияли на структуры наиболее опасных паразитных мод  $TE_{2,2}$  и  $TE_{6,1}$ . «Холодное» моделирование возбуждения моды  $TE_{9,1}$  в резонаторе с четырьмя канавками продемонстрировало существование практически невозмущенной нерегулярностями рабочей волны. Добротность колебания составила приблизительно 10 000. Далее был проведен анализ возбуждения третьей гармоники на основе нестационарного моделирования с помощью усредненных уравнений. Численная модель, подробно описанная в [4], была обобщена для того, чтобы конкуренцию между двумя волнами в процессе возбуждения: рабочей  $TE_{9,1}$  и наиболее

опасной паразитной. В данном случае модель была модифицирована с учетом данных, полученных в ходе решения 2D задачи. В уравнениях были учтены факторы, описывающие увеличение омических потерь, искажение поперечной структуры и остановку вращения. «Горячие» расчеты предсказывают установление в резонаторе волновой структуры, близкой к структуре в «холодных» расчетах. Нестационарное моделирование показало селективное возбуждение моды  $TE_{9,1}$  на третьей циклотронной гармонике с мощностью выходного излучения  $\sim 300$  кВт.



**Рисунок 3.** (а) Продольный профиль резонатора, продольное распределение поля ( $TE_{9,1}$ ), а также зависимость электронного КПД от продольной координаты (пунктирная кривая). (б) Волновой КПД как функция времени.

Следующим шагом стала попытка «горячего» численного моделирования электронно-волнового взаимодействия в таком гиротроне. трёхмерного моделирование системы с помощью PIC кода программы Particle Studio пакета CST Studio, однако в ходе «горячего» моделирования системы стабильная одномодовая генерация наблюдалась лишь при относительно низких токах. В то же время, при токах выше 15 А наблюдалась двухмодовая совместная генерация третьей и второй гармоник. Такое поведение системы говорит о том, что в этом случае имеют место нелинейные эффекты взаимодействия двух мод, связанные с влиянием поля каждой из волн на электронный пучок. Дальнейшие исследования гиротрона связаны с дополнительными расчетами, направленными на исследование и устранение этого эффекта, с тем чтобы реализовать относительно сильноточный (и, соответственно, мощный) гиротрон, селективно возбуждающий третью циклотронную гармонику.

### 3. Заключение

В работе предложены схемы гиротронного резонатора, основанные на модификации за счет нанесения на стенку нерегулярности, эффективно влияющей на структуру рабочей волны, на использовании продольных селективирующих нерегулярностей, а также на комбинации подходов. На основе подхода разработаны резонаторы для терагерцового умеренно релятивистского ГБО на третьей гармонике (0.7 А/80кВ). Для использования этого прибора для получения ТГц разряда в плотной плазме для создания мощного точечного источника жесткого ультрафиолетового излучения необходим переход к работе с более высокоэнергетичным электронным пучком. Показано, что использование модифицированных резонаторных схем позволяет значительно облегчить проблемы селективности возбуждения высоких гармоник.

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

#### Список литературы

1. Kalynov, Y. K., et al. High-Power pulsed terahertz-wave large-orbit gyrotron for a promising source of extreme ultraviolet radiation // Radiophys. Quantum Electron. – 2020. – Т. 63. – С. 554–562.
2. Bratman V. et al. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range // Physical Review Letters. – 2009. – Т. 102. – № 24. – С. 245101.
3. 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.
4. Bandurkin I. et al. Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – № 1. – С. 300-305.
5. 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.
6. Bandurkin I.V. et al. Mode selective azimuthally asymmetric cavity for terahertz gyrotrons // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – Т. 68. – № 1. – С. 347-352.
7. Zaitsev N.I. et al., X-band high-efficiency relativistic gyrotron // IEEE Trans. Plasma Science – 2002. – Т. 30. – № 3. – С. 840-845.