

# Автомодуляционные колебания в гиротроне со сложным резонатором

И.В. Ошарин, Р.М. Розенталь, А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в данной работе исследовалась возможность получения двухчастотного выходного сигнала в мощном гиротроне для плазменных приложений. Автомодуляция выходной мощности может быть обеспечена в высокоэффективном (десятки процентов) режиме гиротронного типа при использовании специальных сложных рабочих резонаторов с азимутально симметричной нерегулярностью.

**Ключевые слова:** гиротрон, автомодуляции, резонаторы, многочастотные источники СВЧ излучения

## 1. Введение

Для ряда важных приложений, таких как высокочастотный нагрев плазмы, важной задачей является разработка источников мощного коротковолнового излучения [1,2]. Наиболее перспективным из таких источников является гиротрон. Реализация устойчивой одночастотной генерации в мощных коротковолновых гиротронах является уже решенной задачей. Однако получение режимов автомодуляции (например, за счет заметного превышения рабочего тока электронного пучка над стартовым значением) в традиционной гиротронной схеме весьма затруднено.

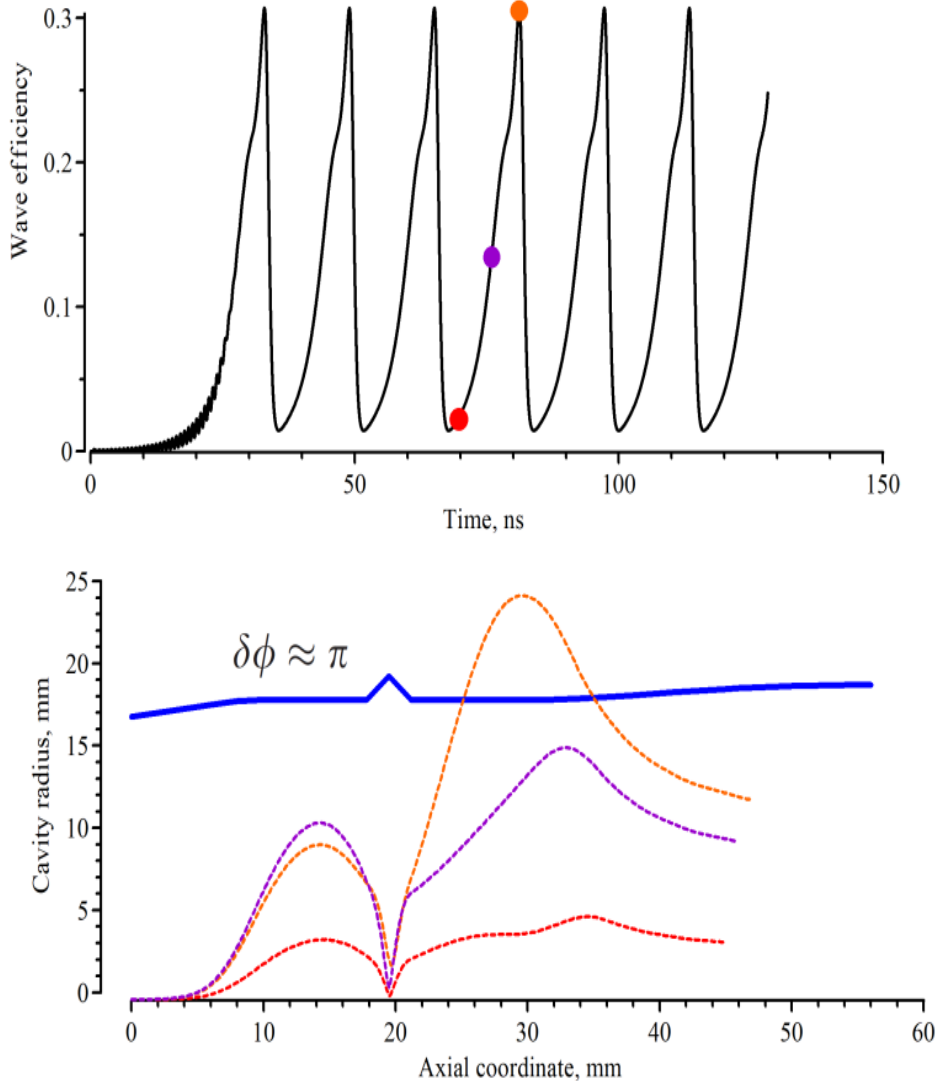
Хорошо известным путем получения многочастотного выходного сигнала в гиротроне является переход к работе на высоких аксиальных модах в режиме лампы обратной волны (ЛОВ) [3]. В этом случае для получения автомодуляции выходной мощности нет необходимости в значительном превышении рабочего тока над порогом возбуждения. Однако этот метод имеет ряд недостатков. Во-первых, возбуждение высоких продольных мод в режиме ЛОВ может быть недоступно из-за конкуренции со стороны других поперечных мод в условиях густого спектра. Во-вторых, такие режимы характеризуются низкими эффективностями электронно-волнового взаимодействия и, следовательно, низкими уровнями средней выходной мощности. Что касается высокоэффективного режима типа лампы бегущей волны (ЛБВ), устойчивая генерация второй и более высоких продольных мод в нём возможна только в случае использования протяженных рабочих резонаторов при специфичных условиях [4], а для получения автомодуляционных режимов нужны дополнительные отражения [5].

## 2. Идея метода и результаты моделирования

В данной работе мы разрабатываем идею использования квазирегулярных резонаторов с короткими фазовыми корректорами как способ обеспечить возбуждение высоких аксиальных мод, имеющих пониженную дифракционную добротность в высокоэффективном режиме электронно-волнового взаимодействия гиротронного типа [6]. В простейшем случае это квазирегулярный резонатор с одной азимутально симметричной нерегулярностью, представляющей собой расширение стенки (рис.1). Предлагается рассмотреть такую схему для получения автомодуляции выходного сигнала в гиротроне с относительно коротким резонатором.

Моделирование на основе усредненных уравнений одномодового нестационарного гиротрона, показывает, что введение аксиальной нерегулярности

приводит к конкуренции между разными продольными модами резонатора, обеспечивая генерацию выходного сигнала со значительной глубиной модуляции по мощности. В работе мы рассматриваем традиционный гиротрон мегаваттного уровня мощности (70 кВ / 45 А / 170 ГГц) для плазменных приложений. Мы представляем результаты моделирования возбуждения такого гиротрона с резонатором с расположенной в центре аксиальной нерегулярностью.

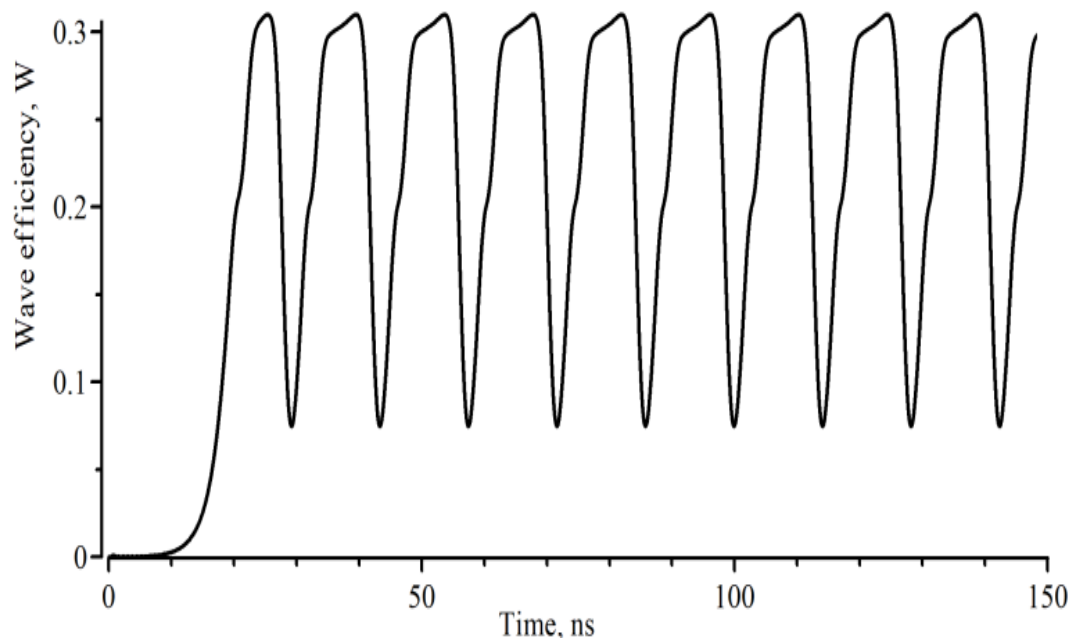


**Рисунок 1.** Моделирование мегаваттного гиротрона с резонатором, модифицированным неоднородностью с набегом фазы, равным  $\pi$ . Верхний график показывает зависимость волнового КПД от времени. На нижнем графике показан профиль резонатора (синяя кривая), а также посчитанные продольные структуры возбуждаемого поля в разные моменты времени (пунктирные линии) в соответствии точкам, показанным на верхнем графике.

В случае использования относительно короткого (7-8 длин волн) регулярного резонатора в этой системе возможна устойчивая одночастотная генерация низшей близкой к отсечке аксиальной моды с волновым КПД, превышающим 30%. В моделировании в центр удлиненного (10 длин волн) резонатора была добавлена короткая (2.5 длины волны) нерегулярность, обеспечивающая сдвиг фазы  $\pi$  для близкой к отсечке волны. При рабочем магнитном поле, близком к оптимальному для гиротрона с регулярным резонатором, моделирование предсказывает сильную модуляцию выходной мощности в процессе возбуждения (рисунок 1).

Стоит отметить, что для получения этого эффекта нет необходимости в точном

соответствии геометрических параметров нерегулярности фазовому сдвигу  $\delta\phi$ , равному  $\pi$ . Похожая модуляция мощности также имеет место в случае слегка меньшего сдвига, в этом случае глубина автомодуляции меняется при сохранении высокой пиковой мощности (рисунок 2). Таким образом, величина фазового сдвига может рассматриваться в качестве параметра, управляющего характеристиками (спектром) автомодулированного выходного сигнала.



**Рисунок 2.** Моделирование мегаваттного гиротрона с резонатором, модифицированным неоднородностью с набегом фазы, равным  $0.75\pi$ . Показана зависимость волнового КПД от времени.

Работа выполнена в рамках Государственной программы ИФ РАН 0030-2021-0027.

#### Список литературы

1. Guznov Yu. et al. Competition of spurious fundamental-harmonic oscillations in the horn section of a high-harmonic gyrotron // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2021. – Т. 69. – С. 325.
2. Bandurkin I. et al. Terahertz large-orbit high-harmonic gyrotrons at IAP RAS: recent experiments and new designs // *IEEE Transactions on Electron Devices* – 2018. – Т. 65. – С. 2287.
3. Skalyga V. et al. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Т. 22. – №. 8.
4. Laqua H. et al. Generation of electrostatic oscillations in the ion cyclotron frequency range by modulated ECRH // *Nuclear Fusion*. – 2018. – Т. 58. – №. 10.
5. Ginzburg N. et al. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // *International Journal. Electronics*. – 1986. – Т. 61. – №. 6. – С. 881–894.
6. 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.
7. Rozental R. et al. Nonstationary processes in an X-band relativistic gyrotron with delayed feedback // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2004. – Т. 32. – №. 2. – С. 418–421.
8. Bandurkin I. et al. Gyrotron with a sectioned cavity based on excitation of a far-from-cutoff operating mode // *Physics of Plasmas*. – 2016. – Т. 23. – №. 1.