

# Экспериментальное исследование широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне

А.С. Зуев, А.П. Фокин, А.А. Ананичев, Е.С. Семенов, А.Н. Куфтин, А.В. Чирков, В.Е. Запевалов, М.Ю. Глявин

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в работе представлены результаты экспериментальных исследований широкополосной, практически октавной, дискретной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне. На основе выполненных ранее оценок разработана методика управления параметрами винтового электронного пучка путем коррекции распределения магнитного поля в области электронной пушки. Для десяти мод с коэффициентом отражения от выходного окна по мощности менее 10% продемонстрирована их генерация с уровнем выходной мощности более 35 кВт в диапазоне частот 133-250 ГГц.

**Ключевые слова:** гиротрон, микроволновое излучение, терагерцовое излучение, электронная пушка, перестройка частоты

## 1. Введение

Для многих перспективных приложений требуются мощные источники излучения субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот с возможностью широкополосной перестройки частоты [1]. Такими источниками могут стать наиболее мощные и эффективные приборы вакуумной микроволновой электроники – гиротроны [2], в которых возможна как дискретная, так непрерывная перестройка частоты. Непрерывная перестройка реализуется за счет последовательного возбуждения колебаний с одинаковыми поперечными индексами (квазикритических мод  $TE_{m,p}$  цилиндрического резонатора), но различными продольными индексами. Однако, так как резонаторы гиротронов имеют относительно высокую добротность ( $Q \sim 1000 - 5000$ ), то диапазон плавной перестройки редко превышает 5% от начальной частоты [3].

Существенно больший частотный диапазон может быть получен при рассмотрении дискретной перестройки частоты при помощи возбуждения последовательности мод с различными поперечными индексами [4]. Такой метод особенно актуален в мощных гиротронах, которые, как правило, имеют сверхразмерные резонаторы и работают на моде с высокими поперечными индексами. Высокая плотность спектра мод резонатора в мощных гиротронах позволяет плотнее освоить рабочий диапазон частот путем возбуждения большего числа мод.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования широкополосной дискретной перестройки частоты на основе имеющегося в ИПФ РАН гиротронного комплекса с частотой генерации 250 ГГц и мощностью выходного излучения до 330 кВт [5], предназначенного для нагрева плазмы и исследования томсоновского рассеяния в установках управляемого термоядерного синтеза. Исследование проводилось с использованием выполненных ранее теоретических оценок и численного моделирования [6].

## 2. Экспериментальная установка

Эксперимент выполнен на базе существующего в ИПФ РАН гиротронного

комплекса с сухим криомагнитом Jastec JMТD 10T100 с максимальным магнитным полем 10 Тл. В криомагнит был установлен указанный прототип гиротрона с расчетной рабочей частотой 250 ГГц. Общий вид исследуемого гиротрона показан на фото на рисунке 1. Магнетронно-инжекторная электронная пушка данного гиротрона выполнена по диодной схеме. На катод гиротрона подавалось полное ускоряющее напряжение от импульсного модулятора с длительностью импульсов 40 мкс и частотой повторения 10 Гц. Измерение тока электронного пучка производилось при помощи пояса Роговского 50 мВ/А, измерение ускоряющего напряжения – высоковольтным делителем NorthStar PVM-5. Измерение мощности выходного излучения выполнялось водяным калориметром, частоты излучения – спектроанализатором Agilent N9010A с гармоническим смесителем производства НИИПП, г. Томск.

В соответствии с предварительными оценками, выполненными в рамках адиабатической теории магнетронно-инжекторных пушек [7], для коррекции распределения магнитного поля была разработана и изготовлена дополнительная катушка, размещенная в области катода. Катушка намотана медным проводом диаметром 1,7 мм, имеет 22x18 витков с внутренним проходным диаметром 110 мм для возможности технического обеспечения высоковольтной изоляции. Максимальное поле в центре катушки составляет 0,03 Тл при токе  $I_{cc} = 10$  А и потребляемой мощности 170 Вт. Относительно малая мощность позволила обеспечить достаточное охлаждение при помощи обдува катушки потоком воздуха посредством вентилятора.

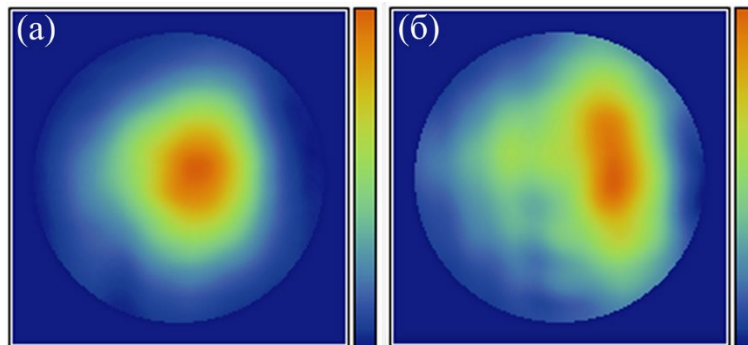


**Рисунок 1.** Общий вид гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц, установленного в криомагните.

Система вывода излучения гиротрона состоит из профилированного квазиоптического преобразователя и однодискового выходного окна из нитрида бора с толщиной 3,13 мм. Данное выходное окно согласовано по минимальному уровню отражений лишь при работе гиротрона на определенных частотах. В остальных случаях окно не согласовано, а наличие отражений от выходного окна может приводить к различным нежелательным эффектам. Среди таких эффектов следует отметить снижение мощного выходного излучения, обострение конкуренции мод,

появление нестационарного режима генерации [8].

Для эксперимента были выбраны 10 перспективных рабочих мод с коэффициентом отражения от окна по мощности  $|R|^2 < 10\%$ . Профиль и положение зеркал квазиоптического преобразователя были оптимизированы для рабочей моды  $TE_{19,8}$ , и в процессе эксперимента не изменялись. Для корректного вывода излучения мод с различным направлением азимутального вращения полярность поля криомагнита и катодной катушки менялись на противоположные. Отличие каустик различных мод, выбранных для экспериментального исследования, от каустики рабочей моды  $TE_{19,8}$  приводило к ухудшению их прохождения через преобразователь и отличию профиля пучка на окне от Гауссова распределения. Расчётный профиль пучка на выходном окне для мод  $TE_{18,7}$  и  $TE_{12,4}$  представлен на рисунке 2. Расчётные потери в преобразователе волнового пучка для некоторых мод достигали 20%.



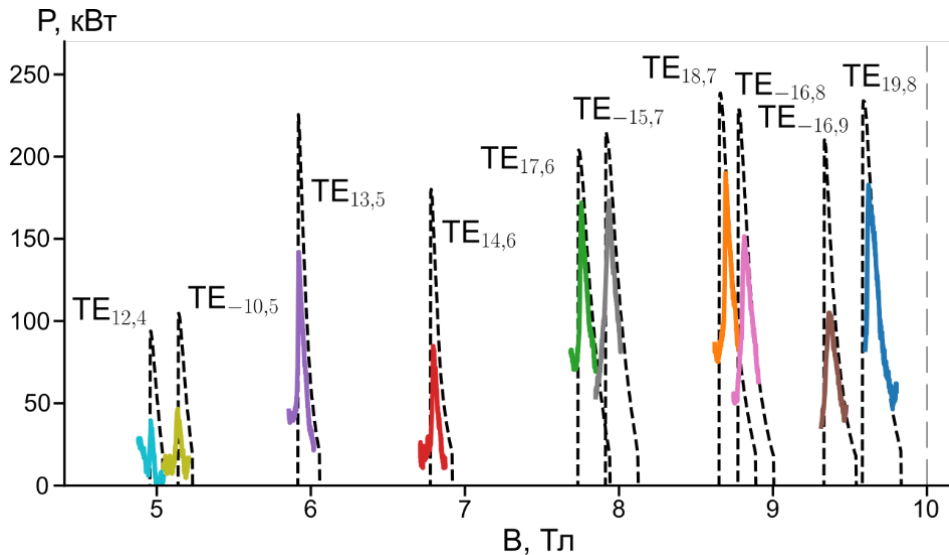
**Рисунок 2.** Профиль пучка излучения на выходном окне гиротрона диаметром 66 мм для моды  $TE_{18,7}$  с рабочей частотой 225,56 ГГц (а) и моды  $TE_{12,4}$  с рабочей частотой 133,89 ГГц (б).

### 3. Результаты экспериментов

В проведенных экспериментах были продемонстрированы возбуждение и устойчивая генерация всех выбранных мод. Для достижения максимальной мощности для каждой моды выполнялась оптимизация тока дополнительной катодной катушки: для интервала токов  $I_{cc}$  от -10 А до +10 А с шагом в 1 А. В каждом из режимов проводилось сканирование по ведущему магнитному полю  $B_0$  со скоростью 0,024 Тл/мин, и определялась максимальная мощность для данной конфигурации. После оптимизации достигнутая максимальная мощность выходного излучения для выбранных мод составила от 38 до 190 кВт. Полученные результаты представлены в таблице 1. На рисунке 3 показаны записи зависимостей мощности выходного излучения от основного магнитного поля.

**Таблица 1.** Экспериментальные результаты

Мода	Частота, ГГц	$B_0$ , Тл	$U_0$ , кВ	$I_{cc}$ , А	Мощность, кВт
$TE_{19,8}$	249,45	9,63	55	-3	183
$TE_{-16,9}$	246,90	9,37	45	-6	105
$TE_{-16,8}$	229,78	8,86	55	2	150
$TE_{18,7}$	225,56	8,70	55	1	190
$TE_{-15,7}$	205,98	7,93	55	5	173
$TE_{17,6}$	201,35	7,76	55	6	168
$TE_{14,6}$	182,24	6,80	35	3	83
$TE_{13,5}$	158,10	5,93	40	7	140
$TE_{-10,5}$	138,50	5,13	30	6	45
$TE_{12,4}$	133,89	4,97	30	6	38



**Рисунок 3.** Полученные в эксперименте зависимости выходной мощности для выбранных мод (сплошные линии) и результаты численного моделирования мощности излучения на выходе из резонатора (пунктирные линии).

#### 4. Заключение

Экспериментально исследована возможность широкополосной ступенчатой перестройки частоты в мощном гиротроне для перспективных плазменных приложений. Продемонстрирован уровень мощности выходного излучения от 38 кВт до 190 кВт в широкой полосе частот 133 – 250 ГГц. Мощность выходного излучения в некоторых режимах может быть значительно увеличена путем оптимизации квазиоптического преобразователя мод и использования широкополосного выходного окна. Необходимо отметить, что уже и в существующем состоянии исследуемый гиротрон работает с длительностью импульса до сотен миллисекунд, что является вполне достаточным для многих приложений. При этом конструктивные особенности гиротрона позволяют ему работать и в непрерывном режиме после замены выходного окна из нитрида бора на окно из синтетического алмаза.

Работа поддержана **грантом Президента РФ (номер гранта МК-3413.2021.1.2).**

#### Список литературы

1. Dhillon S.S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2017. Vol. 50, № 4. P. 043001.
2. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The Gyrotron at 50: Historical Overview // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves.* 2014. Vol. 35, № 4. P. 325–381.
3. Глявин М.Ю. et al. Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2018. Vol. 61, № 11. P. 895–899.
4. Запвалов В.Е. et al. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105-156 ГГц // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2004. Vol. 47, № 5/6. P. 443–452.
5. Denisov G.G. et al. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. Vol. 89, № 8. P. 084702.
6. Зуев А.С., Фокин А.П., Запвалов В.Е. Анализ возможности широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* 2021. Vol. 1. P. 215–219.
7. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. 576 p.
8. Dumbrajs O. et al. Influence of reflections on mode competition in gyrotrons // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. Vol. 28, № 3. P. 588–596.