УДК 621.385.69

Экспериментальное исследование прототипа мегаваттного гиротрона с частотой генерации 230 ГГц

А.П. Фокин¹, А.А. Ананичев¹, А.Н. Куфтин¹, М.В. Морозкин¹, А.В. Чирков¹, В.Н. Мануилов¹, Л.Г. Попов², Е.М. Тай^{1,2}, А.Г. Литвак¹, М.Ю. Глявин¹, Г.Г. Денисов¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород» ²ЗАО НПП «Гиком», г. Нижний Новгород»

Аннотация: в работе представлены результаты экспериментального исследования прототипа мегаваттного гиротрона с частотой генерации 230 ГГц для установок управляемого термоядерного синтеза нового поколения. Приведены особенности конструкции, а также полученные данные о мощности и частоте излучения, параметрах выходного волнового пучка.

Ключевые слова: гиротрон, управляемый термоядерный синтез, волновой пучок

1. Введение

Гиротроны являются единственными источниками излучения, удовлетворяющим требованиям для электронно-циклотронного (ЭЦР) нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) – токамаках и стеллараторах [1]. Учитывая тенденции развития современных систем УТС, переход к системам со все большим магнитным полем и большей плотностью плазмы требует увеличения частоты греющего излучения [2,3]. Однако для мощных гиротронов увеличение частоты ведет к обострению проблемы конкуренции мод. Одним из возможных решений является использование захвата генерации гиротрона слабым внешним сигналом [4,5], экспериментальное исследование которого в гиротроне с рабочей частотой 170 ГГц [6,7] подтвердило его эффективность. Более того, данный метод позволяет создать комплекс когерентно излучающих гиротронов, что может быть подавления неустойчивостей плазмы использовано в системах или высокоградиентных микроволновых ускорителях частиц [8].

В работе представлен прототип мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц. Отличительной особенностью данного гиротрона является использование двухканального квазиоптического преобразователя, обеспечивающего ввод внешнего сигнала через отдельное окно.

2. Особенности конструкции гиротрона

При разработке данного гиротрона основным ограничивающим фактором являлся диаметр проходного отверстия доступного криомагнита с полем 10 Тл Jastec JMTD10T150 – 150 мм. Это ограничивает максимальный размер катода гиротрона в отпаянном варианте исполнения, поэтому для первых экспериментов был разработан прототип с разборным корпусом. В качестве рабочей моды на частоте 230 ГГц была выбрана мода ТЕ_{33,13}, радиус резонатора составляет 17,38 мм, длина однородного участка – 9 мм. Для выбранной моды оптимальный радиус электронного пучка равен 7,2 мм, что с учетом характеристик магнита определяет диаметр катода равный 86 мм. Электронно-оптическая гиротрона представляет собой система триодную магнетронно-инжекторную пушку, обеспечивающую формирование электронного пучка с током до 40 А, энергией электронов 80 кэВ и питч-фактором (отношением вращательной и поступательной скоростей электронов) g = 1,2. В эксперименте гиротрон работал в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения до 10 Гц. Формирование импульсов обеспечивалось высоковольтным источником питания производства ООО «НПП ЛМ Инвертор»



Рисунок 1. Общий вид гиротрона в криомагните.

Основной особенностью гиротрона стал двухканальный квазиоптический преобразователь с выводом излучения в два окна, расположенных под углом 90° друг к другу. В прямом направлении, такой преобразователь позволяет вывести моды гиротрона с противоположными направлениями вращения в разные окна, а при использовании одного из каналов в обратном направлении – ввести внешнее излучение в резонатор гиротрона, обеспечив правильную структуру поля и направление вращения. Ввод внешнего сигнала малой (10-50 кВт) со стабилизированной частотой позволит подавить возбуждение конкурирующих мод и увеличить КПД генерации. Разделение каналов также позволяет снизить тепловые нагрузки на материал выходных окон (в эксперименте использовались окна из нитрида бора).

3. Результаты эксперимента

Представленные в работе эксперименты выполнялись без ввода внешнего сигнала. В ходе экспериментов при токе электронного пучка 40 А и ускоряющем напряжении 80 кВ была получена выходная мощность 800 кВт, что соответствует КПД генерации 25%. Измерение частоты излучения производилось при помощи гармонического смесителя производства АО НИИПП и спектроанализатора Keysight N9010A. Измеренная частота излучения в режиме максимальной мощности составила 230,1 ГГц, спектр излучения показан на Рис. 2.



Рисунок 2. Измеренный спектр излучения гиротрона.

Измерение параметров волнового пучка производилось при помощи измерения температурного распределения листа диэлектрика инфракрасной камерой [9]. Содержание Гауссова пучка в волновом пучке гиротрона составило 98,8%, восстановленные амплитуда и фаза пучка приведены на Рис.3.



Рисунок 3. Восстановленные амплитудное и фазовое распределение волнового пучка на расстоянии 1783 мм от окна гиротрона, апертура 195х195 мм.

4. Заключение

В работе приведены особенности конструкции прототипа мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц и возможностью ввода внешнего сигнала. В импульснопериодическом режиме работы с длительностью импульсов 100 мкс и частотой повторения 10 Гц была продемонстрирована мощность 800 кВт с КПД 25% на частоте 230,1 ГГц. Содержание Гауссова пучка в выходном волновом пучке превышает 98%. Следующим этапом испытаний станет работа с подачей внешнего сигнала, в качестве источника которого выступит другой гиротрон-драйвер с системой стабилизации частоты.

Исследование выполнено в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» (проект № FFUF-2022-0007).

Список литературы

- 1. Thumm M.K.A. и др. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. Institute of Physics Publishing, 2019. Т. 59, № 7. С. 073001.
- 2. Tran M.Q. и др. Status and future development of Heating and Current Drive for the EU DEMO // Fusion Eng. Des. North-Holland, 2022. T. 180. C. 113159.
- 3. Belousov V.I., Denisov G.G., Shmelev M.Y. System of Electron Cyclotron Heating at the TRT Tokamak // Plasma Phys. Reports. 2021. T. 47, № 11. C. 1158–1168.
- 4. Бакунин В.Л. и др. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 709–720.
- 5. Ergakov V.S., Moiseev M.A. Theory of synchronization of oscillations in a cyclotron-resonance maser monotron by an external signal // Radiophys. Quantum Electron. 1975. T. 18, № 1. C. 89–97.
- 6. Kuftin A.N. и др. Experimental Study of Extended Operating Zone of a 170-GHz/1-MW Gyrotron Locked by a Narrowband External Signal // IEEE Trans. Electron Devices. 2024. C. 1–5.
- 7. Kuftin A.N. и др. First Demonstration of Frequency-Locked Operation of a 170 GHz/1 MW Gyrotron // IEEE Electron Device Lett. 2023. Т. 44, № 9. С. 1563–1566.
- 8. Othman M.A.K. и др. Experimental demonstration of externally driven millimeter-wave particle accelerator structure // Appl. Phys. Lett. 2020. T. 117, № 7.
- 9. Chirkov A.V., Denisov G.G., Aleksandrov N.L. 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections // Opt. Commun. 1995. T. 115, № 5–6. C. 449–452.