

Создание мощных источников электромагнитного излучения для установок управляемого термоядерного синтеза

Г.Г. Денисов¹, А.Г. Литвак^{1,2}, Е.М. Тай^{1,2}, М.Ю. Глявин¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²ЗАО «НПП «ГИКОМ»

Аннотация: представлены основные результаты, связанные с разработкой гиротронов для различных перспективных приложений. В гиротронах, предназначенных для нагрева и управления током плазмы в перспективных токамаках ИТЭР и ТРТ, продемонстрированы мощность, эффективность и частота излучения, определяющие современный уровень развития гирприборов.

Ключевые слова: гиротрон, мощность, эффективность, частота генерации, квазиоптический преобразователь, спектральный состав излучения, магнитные системы

1. Введение

Проведение работ в рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии» по теме «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» направлено на создание микроволновых (гиротронных) комплексов электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы для строящихся в России токамаков Т15-МД и токамака с реакторными технологиями (ТРТ). Для достижения необходимых плотности, температуры и времени существования термоядерной плазмы в системах ЭЦР нагрева требуется обеспечить соответствующие частоту, мощность и длительность СВЧ импульса [1,2]. При этом магнитное поле токамака ТРТ с высокотемпературной магнитной системой заметно выше, чем в существующих реакторах (около 8 Тл по сравнению с 5.5 Тл в ИТЭР), что обуславливает необходимость разработки гиротронов мегаваттного уровня мощности на частотах около 230 ГГц, не имеющих мировых аналогов.

В странах Европейского союза, США, Японии и России в течение достаточно продолжительного времени проводились работы по созданию гиротронов для проекта ИТЭР. Российский вариант гиротрона для ИТЭР успешно продемонстрировал работу в режиме импульсов длительностью сотни секунд с КПД 50% при мощности 1 МВт на частоте 170 ГГц и в настоящее время ведется монтаж гиротронных комплексов во Франции.

Следует отметить, что приложения мощного микроволнового излучения не ограничиваются только нагревом и диагностикой плазмы. Гиротроны терагерцового диапазона частот (от сотен ГГц до 1.3 ТГц) обеспечивают киловаттный уровень мощности и могут использоваться для медицинских целей (селективное воздействие на раковые клетки), для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения, получения локализованного газового разряда в интересах проектов по нанолитографии и других [3]. Низкочастотные непрерывные гиротроны (десятки ГГц) используются для реализации технологических процессов, таких как скоростное выращивание алмазов плазмо-химическим методом и даже обсуждаются возможности скоростного микроволнового бурения скальных пород. Для всех перечисленных задач является актуальной «вечная проблема СВЧ электроники» – повышение частоты,

мощности и эффективности генерируемого излучения.

Необходимо отметить, существует тенденция к увеличению мощности ЭЦР систем на установках УТС. В частности, на токамаке ИТЭР принято решение увеличить энергетику электронно-циклотронного нагрева с 24 МВт до 56 МВт и, в перспективе, до 80 МВт. Разработка комплексов ЭЦР нагрева плазмы наряду с созданием источников излучения предусматривает и создание широкого круга подсистем, включая магнитные системы, систему управления, сбора данных, блокировок и защит, системы охлаждения и электропитания, линию транспортировки излучения. Неочевидной, но актуальной задачей является анализ магнитной обстановки в области расположения гироприборов – рассеянные поля токамака и взаимное влияние криомагнитов могут существенным образом влиять на траектории электронов в области формирования электронного потока и коллектора гиротрона.

В докладе приводятся основные результаты работ 2025 года.

2. Короткоимпульсный прототип гиротрона для ЭЦРН плазмы в токамаке ТРТ

Создан прототип гиротрона нового поколения, предназначенный для электронно-циклотронного резонансного нагрева плазмы в перспективном российском токамаке ТРТ. На частоте 230 ГГц в режиме импульсов длительностью 100 мкс при частоте повторения 10 Гц на окне гиротрона продемонстрирована мощность 940 кВт. В режиме без рекуперации энергии это соответствует КПД 29% [4]. Встроенный квазиоптический преобразователь нового типа [5] позволяет с высокой эффективностью выводить моды обоих вращений (поляризаций), что подтверждается высоким содержанием гауссовой компоненты – более 99% в обеих поляризациях, так и осуществить ввод внешнего сигнала для работы в режиме захвата частоты гиротрона.

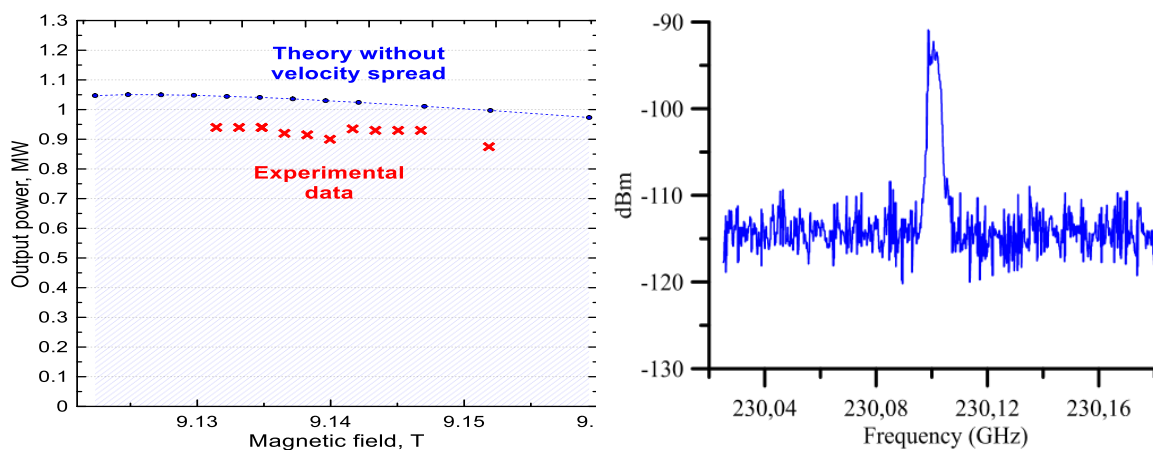


Рис.1. Расчетные и экспериментальные значения выходной мощности гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц (слева) и спектральный состав выходного излучения.

4. Высокоэффективный гиротронный выпрямитель для систем беспроводной передачи энергии

Был получен ряд новых результатов по различным направлениям данной тематики. Предложена и теоретически обоснована концепция инвертированного гиротрона (гиротрона-выпрямителя) [9], позволяющего преобразовывать принимаемое СВЧ излучение на частоте 95 ГГц мощностью до 1 МВт в мощность постоянного тока с рекордной эффективностью до 80%.

В эксперименте излучение на частоте 33.85 ГГц с мощностью 13 кВт в виде гауссова пучка попадает на входное/выходное окно прибора и преобразуется им в мощность 15 кВт постоянного тока, протекающего через резистор 51.4 кОм, соединяющий коллектор с землей. В приборе используется тонкий сплошной прямолинейный электронный пучок с энергией частиц 8.4 кэВ, током 0.54 А и длительностью импульса около 70 мкс, который ускоряется до энергий около 30 кэВ под воздействием СВЧ поля вращающейся $TE_{1,1}$ волны в резонаторе находящемся в статическом магнитном поле около 1.3 Тл, создаваемом соленоидом с жидкостным охлаждением. Достигнутый КПД преобразования СВЧ в DC мощность с учетом мощности, расходуемой на поддержание электронного пучка, составил 80%.

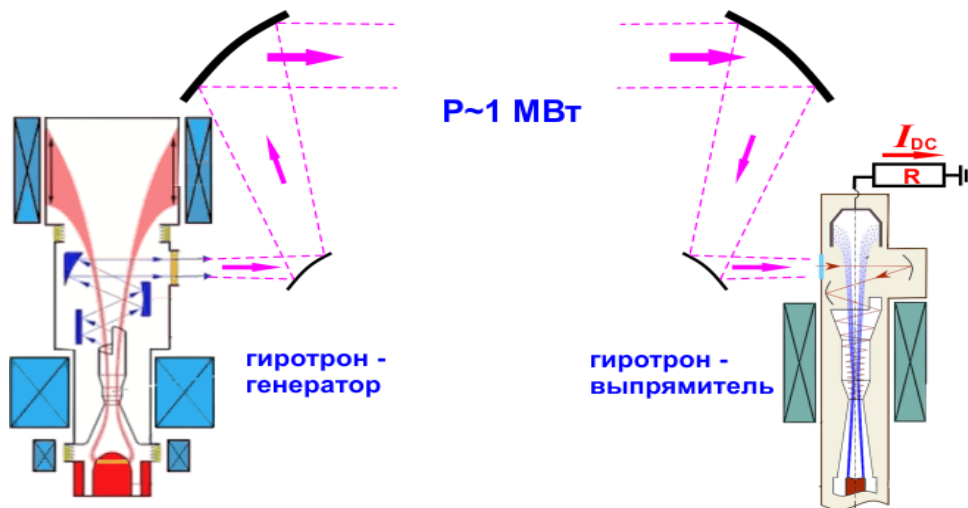


Рис.4. Схема беспроводной передачи энергии

3. Заключение

Совершенствование гироприборов остается важной задачей для ученых и инженеров, специализирующихся на вакуумной электронике больших мощностей. Выполненные ИПФ РАН и АО НПП ГИКОМ разработки и полученные результаты во многом определяют современный уровень исследований и являются ориентиром для мирового сообщества. Продемонстрированная гиротронами совокупность параметров генерируемого излучения (частота, мощность, ширина линии излучения, перестройка частоты, эффективность) позволяет рассчитывать как на развитие существующих, так и на появление новых приложений гироприборов как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

Работы по разработке гиротронов поддержаны проектом **ИПФ РАН FFUF-2022-0007**.

Список литературы.

1. Thumm M. *J Infrared Milli Terahz Waves* **41**, 1–140 (2020). DOI:10.1007/s10762-019-00631-y
2. Litvak A.G, et.al. *IEEE Journal of Microwaves*, **1**, 1, 260-268 (2021), DOI:10.1109/JMW.2020.3030917
3. Sabchevski S., Glyavin M. *Photonics*, **10**(2), 189 (2023) DOI:10.3390/photonics10020189

4. Ananichev A., et al. *IEEE Electron Device Letters* 46, 11, 2142-2144 (2025)
DOI:10.1109/LED.2025.3604060
5. Denisov G.G., et al. *Applied Physics Letters*. **106**(26) (2015) DOI:10.1063/1.5040242
6. Kirsanov A.V. et al. *IEEE Transaction of Electron Devices*, 72(10), 5759-5762 (2025)
DOI:10.1109/TED.2025.3602037
7. Denisov G., et al. *Microwave and optical technology letters*, 62(6), 2137-2143 (2020) DOI:
10.1002/mop.32330
8. Fokin A., et al. *IEEE Transaction of Electron Devices*, 72 (11) 6288-6292 (2025)
DOI:10.1109/TED.2025.3613296
9. Samsonov S. et al. *IEEE Electron Device Letters*, 46 (11), 2142-2144 (2025)
DOI:10.1109/LED.2025.3610912