

Настоящее и будущее giroприборов: наиболее яркие результаты и перспективные приложения

Г.Г. Денисов¹, А.Г. Литвак^{1,2}, Е.М. Тай^{1,2}, Е.А. Солуянова^{1,2}, С.В. Самсонов¹, М.Д. Проявин^{1,2}, А.В. Палицин¹, А.П. Фокин^{1,2}, М.Ю. Глявин¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

² ЗАО НПП ГИКОМ, Нижний Новгород

Аннотация: представлены наиболее яркие результаты, относящиеся к разработке источников излучения в диапазоне миллиметровых и суб-миллиметровых волн, полученные коллективами ИПФ РАН и ЗАО НПП ГИКОМ. Основное внимание уделяется гиротронам мегаваттного уровня мощности, предназначенным для нагрева плазмы и управления током в установках управляемого термоядерного синтеза, и источникам излучения для спектроскопии и диагностики различных сред. Обсуждаются перспективные приложения, которые могут быть развиты с использованием подобных источников излучения.

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

1. Введение

Гиротроны хорошо известны как перспективные и широко востребованные источники мощного когерентного электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн [1,3]. Ключевыми принципами эффективной работы гиротронов являются группировка фаз вращения за счет релятивистской циклотронной зависимости частоты; излучение электронов в волну с «близким к нулю» продольным волновым числом, что минимизирует эффект разброса скоростей электронов; эффективные методы селекции мод для устойчивой одномодовой работы; электродинамическая система с открытыми резонаторами с большим поперечным размером и эффективное преобразование моды высокого порядка в параксиальный микроволновый пучок.

Гиротронами, работающими в режиме с длительностью импульса десятки микросекунд, освоен субмиллиметровый диапазон (вплоть до 1 ТГц) на киловаттном уровне мощности. Тем не менее, ряд прикладных задач, включая визуализацию скрытых объектов, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения, исследование физики газового разряда и создание точечных источников экстремального ультрафиолетового излучения, требует значительного повышения мощности и длительности СВЧ импульса.

Помимо генераторов в указанных частотных диапазонах большой интерес представляет разработка сверхмощных усилителей. Реализация усилителей с рекордными уровнями мощности актуальна для создания нового поколения суперколлайдеров, или, возможно, систем обнаружения космического мусора и систем связи.

Необходимо отметить, что за последние годы важность перечисленных выше приложений существенно повысилась. На плазменных установках УТС проведены эксперименты, подтверждающие принципиальную необходимость использования гиротронов в системах нагрева и генерации токов. В начале работ по ЭЦР нагреву данный подход не считался основным, но радикальные изменения произошли по мере освоения промышленного производства гиротронов мегаваттного и по мере

выявления многочисленных сложностей по созданию альтернативных систем нагрева (нейтральная инжекция, нижнегибридный резонанс). ЭЦРН комплексы на базе квазинепрерывных мегаваттных гиротронов сегодня являются неотъемлемой частью установок УТС и используются на подавляющем большинстве токамаков и стеллараторов. Следует отметить, что гиротроны позволяют организовать локализованную нагрев плазмы в области с размером порядка нескольких длин волн, что позволяет селективно изменять температуру в некоторой области плазмы и тем самым подавлять возможные неустойчивости плазмы, либо создавать в ней определенные конфигурации тока. Международный проект ИТЭР находится в стадии интенсивного строительства и в 2024 году было принято решение увеличить мощность системы ЭЦР нагрева на первом этапе с 24 МВт до 56 МВт и, в перспективе, до 80 МВт, что потребует заметного увеличения числа гиротронных стендов. При анализе проекта ДЕМО предъявляются пожелания увеличить на 20-30% генерируемую СВЧ-мощность на один прибор, для соответствия частоты генерации магнитному полю токамака реализовать приборы с рабочей частотой около 230-250 ГГц, рассмотреть возможность повышения эффективности гиротронов до 60%. Такие требования, несомненно, требуют решения ряда научных и инженерных задач.



Рисунок 1. Монаж российских 1 МВт.170 ГГц гиротронов на площадке китайского института физики плазмы в городе Хэфей (токамаки EAST и установка CRAFT).

Несмотря на достаточно богатую историю и значимые результаты, гиротроны продолжают оставаться объектом интенсивных исследований. В качестве наиболее ярких достижений российских разработчиков гироприборов можно отметить следующие: на частотах от 80 ГГц до 170 ГГц реализован уровень мощности 1МВт в непрерывном (сотни секунд) режиме. На частотах 230-250 ГГц гиротронами в режиме частотно-повторяющихся импульсов с длительностью в десятки и сотни микросекунд получены близкие значения мощности, хотя при несколько более низком КПД генерации (25-27% против 32-36% в режимах без рекуперации энергии, что может быть связано как с увеличением омических потерь, так и с проблемами связанными с плотностью спектра конкурирующих мод) [3-5]; гиротронами с различными типами электронно-оптических и электродинамических систем освоен диапазон частот от 10 ГГц до 1.3 ТГц [6]; возможность захвата частоты/фазы (создание сверхмощных

комплексов на основе фазированных решеток) [7,8]; стабильность частоты лучше, чем $3 \cdot 10^{-12}$ [9]; широкая полоса мгновенного усиления (10%); непрерывная перестройка частоты – более октавы [10], реализацию различных методов управления спектром излучения [11-14], развитие методов селекции рабочего типа колебаний [15-20].

2. Ключевые достижения последних лет

Рассмотрим более подробно результатов, полученных сотрудниками ИПФ РАН – ГИКОМ за последнее время.

Разработан, изготовлен и экспериментально исследован новый оригинальный тип гироприборов, использующий квазиоптическую электродинамическую систему зигзагообразного типа. Принцип действия прибора можно представить как сочетание серии квазиоптических резонаторов и петляющего волновода, широко используемого в классических приборах вакуумной электроники. Прибор испытан в режиме генератора (лампа обратной волны), что позволило экспериментально наблюдать перестройку частоты генерации в полосе более одной октавы при мощности не менее 1 кВт. Заполнение полосы частот составляет 70%, что не имеет аналогов в указанном диапазоне для приборов сопоставимой и даже на порядок меньшей мощности. Эксперименты полностью согласуются с результатами развитой теории, согласно которым данный прибор должен стать уникальным источником излучения для задач спектроскопии и диагностики различных сред [10].

В компрессоре, использующим в качестве активного элемента полупроводниковую пластину (зеркало) с характерным размером, достаточным для пропускания мегаваттного уровня мощности реализована компрессия излучения на частоте 170 ГГц при уровне запитывающего сигнала в десятки кВт. Управление полупроводниковым элементом осуществляется за счет подсветки зеркала лазерным импульсом с длительность порядка пикосекунды. Частота генерации гиротрона стабилизировалась специально разработанной системой фазовой автоподстройки частоты, использующей оригинальный быстрый источник питания анода. Достигнут уровень скомпрессированной (коэффициент компрессии около 20) мощности 0.4 МВ, что на несколько порядков выше указанного для аналогичных схем в зарубежных работах, при длительности порядка наносекунды. Развитие указанного подхода представляет интерес для задач, связанных с высокоградиентным ускорением заряженных частиц [22].

В планарном релятивистском генераторе поверхностной волны на частоте 160 ГГц экспериментально продемонстрирован режим устойчивой одномодовой генерации с длительностью импульса до 5 нс и выходной мощностью выше 30 мегаватт [23].

Впервые экспериментально получен режим захвата частоты 170-ГГц мегаваттного гиротрона, разработанного для системы электронно-циклотронного нагрева токамака ИТЭР, сигналом малой (~20 кВт) мощности от стабилизированного гиротрона-драйвера. Внешний сигнал подавался в резонатор захватываемого гиротрона через комбинированную линию транспортировки излучения и двунаправленный квазиоптический преобразователь, позволяющий трансформировать входное излучение в рабочую моду. Продемонстрировано улучшение выходных характеристик излучения, включая существенное (~2.5), расширение полосы устойчивой одномодовой генерации рабочего типа колебаний, увеличение генерируемой мощности на 10%, а также возможность обужения спектра, ширина которого в режиме захвата определяется спектром драйвера. Полученные результаты открывают возможность создания сверхмощных комплексов, состоящих из большого числа сфазированных мегаваттных гиротронов [7].

Предложен метод эффективного преобразования параксиальных волн металлического волновода большого сечения в гауссов волновой пучок.

Синтезированная деформация поверхности волновода обеспечивает преобразование исходного параксиального пространственного спектра в спектр гауссова волнового пучка, распространяющегося под большим углом к оси волновода. Метод применен для преобразования моды TE_{1,2} гиротрона с частотой 28 ГГц и мощностью 20 кВт в волноводе диаметром 66 мм. Эффективность преобразования составила 98.5 %. Синтез поверхности волновода выполнен при использовании уникального итерационного алгоритма, разработанного в ИПФ РАН [24,25].

На высокой (третьей) гармонике гирочастоты создан импульсный гиротрон с оригинальным резонатором, в котором на частоте 1 ТГц, продемонстрирована как повышенная селективность возбуждения рабочей волны, так и существенное снижение ее омических потерь. Это позволило увеличить мощность выходного излучения в 3,5 раза (т.е. до 1,3 кВт по сравнению с 0,4 кВт в эксперименте с традиционным регулярным гиротронным резонатором), а также расширить область параметров, соответствующих селективной одномодовой генерации на третьей циклотронной гармонике [26,27].

В рамках теоретического моделирования продемонстрирована возможность существенного повышения КПД мегаваттных гиротронов за счет использования электронных пучков с увеличенной долей вращательной энергии частиц и малым разбросом электронных скоростей. Для формирования пучков с такими параметрами предлагается использовать неадиабатическую электронную оптику. Для мощного гиротрона, предназначенного, например, для установок ТРТ и ДЕМО, сделаны оценки позволяющие рассчитывать на получение пич-фактора около 2 и разбросе поперечных скоростей на уровне 10%. Результаты численного моделирования свидетельствуют, что в этом случае КПД электронно-волнового взаимодействия в гиротроне может быть увеличен до 45% (против типичных 30-35% для гиротронов с адиабатическими магнетронно-инжекторными пушками). После использования одноступенчатой системы рекуперации остаточной энергии КПД может составлять свыше 75% [28].

В разборном короткоимпульсном прототипе гиротрона для ТРТ/ДЕМО на частоте 230 ГГц в режиме импульсов длительностью 100 микросекунд и частоте следования импульсов 10 Гц получена мощность 0.95 МВт. Гиротрон оснащен модифицированным встроенным квазиоптическим преобразователем, что в перспективе, открывает возможность подачи в резонатор внешнего сигнала для повышения мощности и эффективности за счет подавления конкурирующих мод и продвижения в область оптимальных расстроек гирочастоты, стабилизации частоты генерации, увеличения числа генерируемых одним прибором частот при перестройке магнитного поля, за счет вывода излучения в согласованные окна различной толщины.

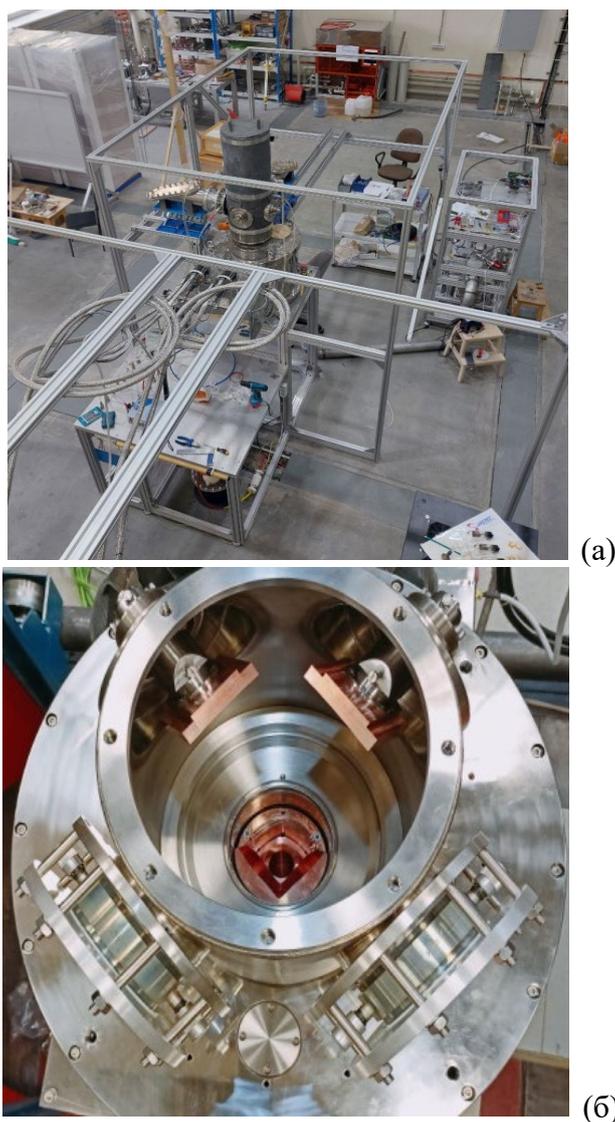


Рисунок 2. (а) Испытательный стенд разборного гиротрона мегаваттного уровня мощности (б) Встроенный двунаправленный преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок. В нижней части рисунка видны два расположенных под углом 90 градусов окна, предназначенных для вывода мод противоположного вращения или использования одного из окон для ввода управляющего сигнала от гиротрона малой мощности.

3. Заключение

Гиротроны продолжают оставаться объектом интенсивных исследований не только в России, но и за рубежом, при этом российским производителям удается сохранять лидирующие позиции в этой области. Создание приборов с не имеющим аналогов набором выходных характеристик (мощность, эффективность, частота и спектральный состав излучения) открывает новые перспективы как для прикладных, так и для фундаментальных приложений гироприборов.

Работы по разработке гиротронов для нагрева плазмы в установке ТРТ выполнены в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» ИПФ РАН (FFUF-2022-0007).

Список литературы

1. Nusinovich, G.S., et al. *J Infrared Milli Terahz Waves* **35**, 325–381 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0050-7>
2. Thumm, M. *J Infrared Milli Terahz Waves* **41**, 1–140 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00631-y>
3. Litvak A.G, et.al. *IEEE Journal of Microwaves*, **1**, 1, 260-268 (2021), <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
4. Gashturi A.P., et al. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **71**, 8, 5047-5052 (2024) <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3419764>
5. Denisov G.G., et al. *Rev.Sci.Instr.* **89**(8):084702 (2018) <https://doi.org/10.1063/1.5040242>
6. Glyavin M.Yu., et al., *Phys.Rev.Lett*, **100**, 1, 015101, (2008) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.015101>
7. Kuftin A.N., et al. *IEEE Electron Device Letters*, **44**, 9, 1563-1566 (2023) <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3294755>
8. Denisov G.G., et al. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **69**, 2, 754-758 <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3134187>
9. Fokin A., et al. *Scientific Reports*, **8**, 4317 (2018) <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1>
10. Samsonov S.V., et al. *IEEE Electron Device Letters*, **45**, 7, 1333-1336 (2024) <https://doi.org/10.1109/LED.2024.3400976>
11. Glyavin M.Y., et al. *Radiophys Quantum El* **61**, 797–800 (2019) <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09937-2>
12. Bogdashov A.A., et al. *Tech. Phys. Lett.* **44**, 221–224 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1063785018030069>
13. Glyavin, M.Y., et al. *Tech. Phys. Lett.* **41**, 628–631 (2015). <https://doi.org/10.1134/S106378501507007X>
14. Proyavin M.D., et al. *Electronics*, 2021, **10**(18), 2225; <https://doi.org/10.3390/electronics10182225>
15. Bandurkin I.V., et al. *Radiophys Quantum El* **59**, 655–666 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9732-z>
16. Glyavin M.Yu., et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **36**, 3, 591-596 (2008) <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.917530>
17. Sabchevski S. et al. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **23**, 675–692 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1015722301479>
18. Bandurkin I.V., et al. *Radiophys Quantum El*, **59**, 655–666 (2017) <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9732-z>
19. Lazarev D.V., et al. *IEEE Transactions on Electron Devices* (2025), <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3519059>
20. Proyavin M.D., et al. *AIP Conference Proceedings* **2803** (1), 030010 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0143490>
21. Novak E.M., et al. *IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials*, 1020-1023, Altai, Russian Federation, 2024, <https://doi.org/10.1109/EDM61683.2024.10615144>
22. Denisov G.G., et al. *IEEE Electron Device Letters*, **45**, 10, 2040-2043 (2024) <https://doi.org/10.1109/LED.2024.3447127>
23. Zaslavsky V.Yu., et al. *2024 PIERS*, Chengdu, China, 2024, 1-5, <https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618770>
24. Proyavin M.D., et al. *24-th IVEC*. April 26-28, 2023, Chengdu, China <https://doi.org/10.1109/IVEC56627.2023.10157140>
25. Proyavin M.D., et al. *IEEE Electron Device Letters*, **44**, 1, 148-151 (2023) <https://doi.org/10.1109/LED.2022.3222169>.
26. Kalynov Yu.K., et al. *IEEE Electron Device Letters*, **44**, 10, 1740-1743 (2023) <https://doi.org/10.1109/LED.2023.3307161>
27. Bandurkin I.V., et al. *2024 PIERS*, Chengdu, China, 2024, 1-6, <https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618647>
28. Glyavin M.Yu., et al. *IEEE Transaction on Electron Devices*, **70**, 12, 6558-6562 (2023) <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3323442>