

Совершенствование giroприборов - основные тенденции и новые результаты

М.Ю. Глявин¹, Г.Г. Денисов¹, Е.М. Тай²

¹Институт прикладной физики РАН

²ЗАО НПП «Гиком»

Аннотация: обсуждаются результаты разработки мощных источников микроволнового излучения для актуальных приложений. Представлены результаты исследования прототипа мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц, гиротрона-драйвера для экспериментов по захвату частоты генерации внешним сигналом и компрессора импульсов.

Ключевые слова: гиротрон, мощность, частота генерации, ширина линии излучения, внешний сигнал, профилированный резонатор, компрессия

1. Введение

Существует ряд актуальных научных задач, требующих создания мощных источников электромагнитного излучения микроволнового излучения в частотном диапазоне 0.1-1 ТГц. Среди таких задач можно отметить разработку систем электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, создание систем высокоградиентного ускорения электронов терагерцовыми волнами, передачу энергии с помощью узконаправленных потоков микроволнового излучения, микроволновую обработку диэлектрических материалов, спектроскопию и диагностику различных сред. Наиболее перспективными источниками излучения в указанном диапазоне частот представляются мазеры на циклотронном резонансе, в частности, гиротроны, которые обладают уникальным сочетанием таких параметров как мощность и эффективность, спектральные характеристики, стоимость и размеры [1].

2021 год ознаменовался увеличением числа запросов на мегаваттные (МВт) гиротроны как со стороны представителей хорошо известных гиротронному сообществу крупных термоядерных установок (ITER, KSTAR, EAST), так и от целого ряда новых проектов (F4E, MAST-U). Можно отметить взрывной роста числа коммерческих компаний, ориентированных на получение термоядерной энергии к 2025-2030 году [2]. С 2021 года разработка российских гиротронов для установок УТС поддерживается комплексной программой «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» в рамках проекта «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» [3]. Больше того, обсуждается использование комплексов, состоящих их большого числа (от десятков до тысяч) синхронизированных мощных источников электромагнитного излучения [4].

Целью настоящей работы является представление ряда наиболее ярких достижений ИПФ РАН и ЗАО НПП ГИКОМ в области разработки giroприборов.

2. Испытания прототипа гиротрона с частотой 230-250 ГГц в импульсном режиме генерации

Предварительные эксперименты для проверки корректности методов численного моделирования электронно-оптической системы и процессов электронно-волнового

взаимодействия в исследуемом диапазоне частот и отработке технологических решений были выполнены в начале 2021 года в доступном коллективу на тот момент магните JMТD10T100 в отпаянном варианте прибора. В режиме с длительностью импульсов 50 мкс была получена мощность до 330 кВт при эффективности 30-32% (без рекуперации энергии) что свидетельствует о достаточно высоком качестве электронного пучка и правильности используемых расчетных моделей и технологических решений. Основные результаты испытаний представлены в таблицах 1,2.

Таблица 1 TE19.8 249.740GHz (40mks / 10Hz)

| I, A | Мощность при U=55kV, kW | КПД при U= 55kV |
|-------------|--------------------------------|------------------------|
| 20.0 | 331.250 | 0.3011 |
| 17.5 | 297.500 | 0.3091 |
| 15.0 | 250.000 | 0.3030 |
| 12.5 | 205.000 | 0.2982 |
| 10.0 | 161.750 | 0.2941 |
| 7.5 | 115.000 | 0.2788 |
| 5.0 | 61.250 | 0.2227 |
| 2.5 | 8.750 | 0.0636 |

Таблица 2 TE19.8 249.740GHz (40mks / 10Hz)

| U,kV | Мощность, при I=12.5A, kW | КПД при I=12.5A |
|-------------|----------------------------------|------------------------|
| 50.0 | 162.222 | 0.2596 |
| 52.5 | 186.666 | 0.2844 |
| 55.0 | 205.000 | 0.2982 |
| 57.5 | 207.778 | 0.2891 |

Следующим этапом испытаний были тесты гиротрона в режиме длинных (1-3 сек) импульсов. При токе соленоида 119.7 А наблюдалось возбуждение волны TE_{19,8} с частотой 249.74 ГГц Режим генерации с катодным напряжением 40 кВ, анодным напряжением 14 кВ, током катода 10 А, током анода 35 мА по мере повышения длительности импульса потребовал достаточно долговременной тренировки лампы для обезгаживания элементов конструкции при резко увеличившейся в связи с увеличением длительности на 3 порядка тепловой нагрузке. Калориметрическими измерениями в этом режиме была подтверждена мощность 120 кВт при длительности импульса 300 мс, что соответствует и расчетным данным, и измерениям в режиме коротких импульсов. При большей длительности наблюдается срыв колебаний, от которого можно отстроиться понизив выходную мощность. Прослеживается некая закономерность: при выходной мощности 90 кВт длительность до срыва составляет 400 мс, при 120 кВт – 300 мс, при 150 кВт – 200 мс. Этот результат можно трактовать из-за высоких потерь в окне из нитрида бора в течении импульса заметно меняется коэффициент отражения от окна, что и приводит к срыву колебаний. Для снижения коэффициента отражения был изменен угол подхода микроволнового пучка к окну вывода энергии, что соответствует соответствующему изменению оптической толщины окна. Был продемонстрирован режим с мощностью 100 кВт и длительностью 1 с. В указанном режиме длительность была ограничена только нагревом выходного окна. Для продолжения испытаний лампы в непрерывном режиме генерации заказано окно из CVD алмаза и выполнен цикл расчетов, демонстрирующий

изменение режима генерации в присутствии отраженного сигнала.

3. Испытания криомагнитной системы с проходным отверстием 150 мм для гиротрона мегаваттного уровня мощности

Испытания магнитной системы JMТD10T150 (максимальная интенсивность магнитного поля 10 Тл, диаметр проходного отверстия 150 мм, см. рисунок 1 [5]) показали полное соответствие экспериментальных значений данным технического задания и результатам расчетов.

В качестве рабочего типа колебаний для гиротрона мегаваттного уровня мощности была выбрана мода TE_{33,13}. Согласно расчетам, при напряжении и токе электронного пучка 80 кВ и 40А может быть обеспечена выходная мощность до 1.2 МВт с КПД = 36%. Магнитное поле для этого режима составляет $B_0 = 9.05$ Тл. Остаточная энергия электронов позволяет использовать систему рекуперации остаточной энергии, что позволит примерно в 1.5 раза увеличить выходной КПД. Негативным фактором является достаточно высокое значение плотности мощности потерь в стенке резонатора, однако гидравлические и тепловые расчеты показали, что конфигурация системы охлаждения позволяет работать в квазинепрерывном режиме. С использованием квазиоптического преобразователя рабочий тип колебаний может быть преобразован в узконаправленный (гауссов) волновой пучок с дифракционными потерями около 2%.

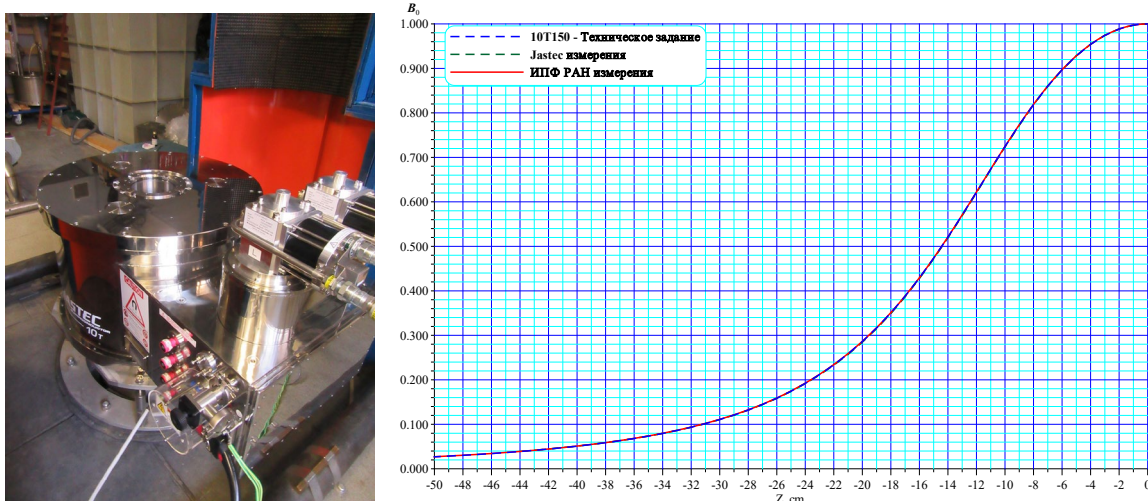


Рисунок 1. Фотография магнита JMТD10T150 на испытательном стенде в ИПФ РАН (слева) и продольное распределение магнитного поля

4. Испытания гиротрона-драйвера для экспериментов по захвату частоты генерации внешним сигналом

В ИПФ РАН был успешно проведен эксперимент по стабилизации частоты излучения гиротрона за счет системы ФАПЧ, в которой через цепь обратной связи осуществлялась подстройка анодного напряжения триодной электронно-оптической системы [6]. В экспериментах на киловаттном уровне мощности была получена долговременная стабильная ширина спектральной линии на уровне 1 Гц, однако данного уровня мощности недостаточно для захвата частоты гиротрона мегаваттного уровня мощности – согласно расчетам, мощность внешнего сигнала должна составлять 2-3% от генерируемой мощности. Для проведения экспериментов по захвату частоты мегаваттного гиротрона создан комплекс, состоящий из двух испытательных гиротронных стендов, соединенных линией передачи микроволнового излучения и аппаратурой измерения характеристик излучения.

На стенде гиротрона-драйвера – источника входного сигнала – реализуется генерация высокостабильного излучения мощностью 25 кВт. Стенд оборудован высоковольтным источником питания (25 кВ, 3 А), работающем в импульсном и непрерывном режимах. Магнитное поле создается системой JASTEC, состоящей из источника питания и сухого сверхпроводящего магнита на 10 Тесла с диаметром теплового отверстия 100 мм.

Стенд мегаваттного гиротрона оборудован высоковольтным источником питания (115 кВ, 70 А), работающем в импульсном режиме с длительностью импульса 100 мкс и частотой повторения 5 Гц. Рабочая мода гиротрона на частоте 170 ГГц – TE_{28,12}. Магнитное поле создается системой JASTEC, состоящей из источника питания и сухого сверхпроводящего магнита на 7 Тесла с диаметром теплового отверстия 140 мм. Изготовлена и смонтирована комбинированная линия передачи, состоящая из двух квазиоптических участков (внутри гиротронных стендов) и протяженного (около 20 метров) волноводного участка между стендами. Волноводная линия состоит из пяти уголков, обеспечивающих поворот излучения на 90° и полуметровых отрезков круглых гофрированных волноводов с внутренним диаметром 63.5 мм.

Для обеспечения захвата частоты колебаний необходима достаточная близость частот гиротрона-драйвера и мегаваттного гиротрона. Для разборного мегаваттного гиротрона изготовлены четыре резонатора (с излучателем), частоты генерации которых перекрывают диапазон около 200 МГц. Перестройка частоты гиротрона-драйвера достигается изменением температуры охлаждающей жидкости (5 – 65°С) или электронной перестройкой частоты за счет варьирования тока катодной катушки и ускоряющего напряжения. Перестройка частоты температурой при фиксированном уровне мощности составила 130 МГц, электронная перестройка частоты около 140 МГц, что обеспечивает требуемый диапазон с учетом измеренных частот генерации двух гиротронов.

5. Разработка схемы компрессора импульсов мощного гиротрона и предварительный анализ его ключевых элементов с целью реализации микроволнового излучения с уровнем мощности около 100 Мвт и длительности импульса порядка 10 нс

Задача генерации мощных импульсов микроволнового излучения наносекундной и суб- наносекундной длительности в миллиметровом и суб-миллиметровом диапазонах обусловлена перспективностью применения таких импульсов для ускорения заряженных частиц [7] в линейных ускорителях нового поколения, при проведении фундаментальных исследований нелинейных быстропротекающих процессов в различных средах, а также в спектроскопии [8,9]. Выходная мощность гиротронов может составлять единицы МВт, а длительности импульсов излучения обычно превышают микросекундный уровень. Укорочение длительности импульсов гиротронов до наносекундного и суб-наносекундного уровня практически невозможно в силу высокой добротности их рабочих резонаторов и, следовательно, больших времен переходных процессов в них.

Высокая стабильность частоты гиротронов открывает возможности компрессии их выходного излучения с помощью резонаторных систем. В мм и суб-мм диапазонах длин волн наибольшей добротностью обладают квазиоптические резонаторы, а, следовательно, в них потенциально достижимы наибольшие коэффициенты компрессии. В мм и суб-мм диапазонах характерные величины добротностей квазиоптических резонаторов составляют порядка 10^4 - 10^6 при использовании зеркал, изготовленных из меди и при характерных линейных размерах резонаторов до 1 м. Известно, что различные полупроводниковые материалы могут выступать эффективным активным элементом, меняющим фазу микроволнового излучения, а

также ключом, переключающим направления распространения волновых пучков. В рамках данного проекта предложен и разработан активный квазиоптический компрессор с активным ключом на основе арсенида галлия (GaAs), отражающая способность которого инициируется импульсами оптического излучения, генерируемыми пикосекундным лазером с длиной волны 532 нм.

В качестве базовой выбрана конструкция компрессора на основе трех-зеркального резонатора, в котором рабочее колебание близко по структуре к гауссовому волновому пучку. Характерной особенностью трех-зеркального резонатора является такая структура рабочего колебания, что в каждом из его плеч волновой пучок распространяется только в одном направлении, т.е. отсутствует встречный поток энергии. Разместив в одном из плеч резонатора активный элемент, а именно плоскую пластину, меняющую свою отражающую способность, можно организовать вывод энергии из резонатора в виде гауссового волнового пучка.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что независимо от образца и уровня накачки времена релаксации GaAs не превышают 200 пс и, следовательно, в активных ключах на основе GaAs потенциально достижимы суб-нс времена переключения. В предварительных экспериментах с использованием в качестве источника излучения ЛОВ, получены огибающие импульсов с характерным временем 1 нс. Эти данные позволяют рассчитывать на формирование на выходе разработанного компрессора импульсов микроволнового излучения длительностью от 0.5 нс до нескольких нс с уровнем мощности порядка 100 МВт.

4. Заключение

Несмотря на сложности с получением магнитных полей высокой интенсивности, требуемых для реализации резонансных условий электронно-волнового взаимодействия в объемах, достаточных для размещения электронно-оптических и электродинамических систем giroприборов, проблемой формирования мощных электронных потоков с высокой долей вращательной энергии и низким скоростным разбросом, необходимостью обеспечения селективного возбуждения рабочих мод высокого порядка и т.д. гиротроны продолжают оставаться наиболее мощными источниками излучения в миллиметровом и суб-миллиметровом диапазоне длин волн, являются объектом интенсивных исследований и демонстрируют заметный потенциал для улучшения характеристик генерируемого излучения.

Работа выполнена при поддержке за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-30071)**.

Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin, "Russian Gyrotrons: Achievements and Trends", IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 260-268, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
2. "The global fusion industry in 2021" Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association and the UK Atomic Energy Authority <https://www.fusionindustryassociation.org/about-fusion-industry>
3. Комплексная программа "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года", Росатом, <http://www.innov-rosatom.ru/network/antf/>
4. Microwave rocket team, Komurasaki Lab., UT, Japan, <http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/mwp/en/index.html>
5. Cryogen-free magnets. JASTEC Ltd. https://www.jastec-inc.com/e_about/
6. A. Fokin, et al "High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz". Sci Re 8, 4317 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1>
7. M.A.K. Othman et al. "Experimental demonstration of externally driven millimeter-wave particle accelerator structure", Appl. Phys. Lett., 117, 073502, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0011397>
8. T. Idehara et al. "The Gyrotrons as Promising Radiation Sources for THz Sensing and Imaging" Appl. Sci. 2020, 10, 980. <https://doi.org/10.3390/app10030980>