

Гиро-приборы. Недавние достижения и тенденции в разработке

В статье представлены недавние достижения в разработке мегаваттных гиротронов для УТС, гиро-усилителей для систем радиолокации и связи, гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн. Наиболее мощные генераторы обеспечивают мощность порядка мегаватта в непрерывном режиме практически во всем диапазоне мм волн. В последние годы достигнут также существенный прогресс в разработке широкополосных гиро-усилителей. Гиротроны перспективны также для освоения терагерцового диапазона частот.

Ключевые слова: мощное излучение мм волн, гиротрон, гиро-ЛБВ

Введение

Гиро-приборы [1,2] являются наиболее мощными источниками СВЧ излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Наиболее мощные генераторы-гиротроны обеспечивают мощность порядка мегаватта в непрерывном режиме [3-4]. Усилители – гиро-клистроны и гиро-ЛБВ имеют меньшую среднюю мощность – до десятков киловатт при импульсной в доли мегаватта. Основное использование мегаваттных гиротронов - для локального нагрева плазмы в установках УТС. Гиро-приборы применяются также в разнообразных технологических установках (спекание керамики, выращивание CVD алмазов, генерация многозарядных ионов), радиолокации и связи, диагностики плазмы и других сред, спектроскопии; обсуждаются возможности применения приборов в медицине и ускорительной технике. В разработке мегаваттных гиротронов наибольшие усилия были приложены к созданию источников для международного проекта ИТЭР. В последних прототипах гиротронов продемонстрированы требуемые характеристики гиротроны 170 ГГц, 1МВт, 1000секунд, КПД 53%. Среди новых идей в разработке мегаваттных гиротронов стоит отметить захват осцилляций гиротрона внешним сигналом.

Гиротронная лампа бегущей волны (гиро-ЛБВ) является широкополосной разновидностью гиротронных усилителей, открывающая возможность получения наиболее мощного импульсного или непрерывного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн. В ИПФ РАН и ЗАО НПП «Гиком» развивается оригинальная концепция гиро-ЛБВ, основанная на использовании винтовых волноводов, обладающих радикально иной дисперсией рабочей волны, чем для однородных волноводов. Дисперсия рабочей собственной волны имеет достаточно большую и почти постоянную групповую скорость при нулевом продольном волновом числе, что обеспечивает широкополосность винтовых гиро-ЛБВ в сочетании с минимальной чувствительностью к разбросу скоростей электронов. Ряд экспериментальных исследований подтвердил основные выводы теории. Представлены результаты экспериментального исследования двух гиро-ЛБВ в «теплых» соленоидах. Первая лампа обеспечивает выходную мощность 130-160 кВт в импульсном режиме в диапазоне частот 33.1-35.5 ГГц и может работать со скважностью 10%. Непрерывная гиро-ЛБВ обеспечивает мощность до 8 кВт при полосе 2.6 ГГц по уровню -3 дБ и полосе 2.1 ГГц по уровню -1 дБ. Эффективная реализация схемы с одноступенчатой рекуперацией энергии

позволила получить электронный КПД 36% для импульсной лампы и 33% для непрерывной лампы при работе на второй гармонике циклотронной частоты.

Гиротроны для ИТЭР

Гиротроны для установок УТС работают на частотах 50-170 ГГц, требуемая мощность обычно порядка 1 МВт, длительность импульса от единиц секунд до непрерывного режима. Для обеспечения таких характеристик приборы работают на очень высоких рабочих модах (азимутальный и радиальный индексы составляют несколько десятков), выходные окна сделаны из искусственных алмазных дисков, используются высокоэффективные коллекторы с рекуперацией энергии электронов. В установке ИТЭР будут использоваться 24 мегаваттных гиротрона с частотой 170 ГГц. Рабочая мода в резонаторе прибора TE_{25,10}, структура выходного излучения – гауссов волновой пучок. Гиротроны для ИТЭР разрабатываются несколькими кооперациями. К настоящему времени лишь две команды продемонстрировали соответствующие выходные параметры (Таблица 1). Гиротроны работают в безжидкостных сверхпроводящих магнитах (рис.1). Основным направлением в разработке этих приборов сейчас является повышение из надежности – времени жизни и надежности генерации излучения.

Таблица 1. Гиротроны для ИТЭР

Основные достижения Мощность/кпд/ длительность импульса	Кооперация
1 MW / 55 % / 800 сек. и 0.8 MW / 57 % / 3600 сек	JAEA/Toshiba, Japan
1 MW / 53 % / 1000 сек. и 1.2 MW / 53 % / 100 сек.	ИПФРАН/ЗАО НПП ГИКОМ, Россия



Рисунок 1. Гиротроны для ИТЭР в испытательных стендах со сверхпроводящими магнитами фирм CRYOMAGNETICS (USA) и JASTEC (Japan)

Гиро-усилители

В ИПФ РАН и ЗАО НПП «Гиком» используется концепция гиро-ЛБВ, основанная на использовании винтовых волноводов, обладающих специфической дисперсией рабочей волны [5,6]. В данной разновидности гиро-ЛБВ используется приосевой винтовой

электронный пучок, взаимодействующий на второй гармонике циклотронной частоты с квазикритической модой $TE_{2,1}$, которая рассеивается в попутную электронам волну $TE_{1,1}$ противоположного вращения на трехзаходной винтовой гофрировке. Дисперсия рабочей собственной волны имеет достаточно большую и почти постоянную групповую скорость при нулевом продольном волновом числе, что обеспечивает широкополосность винтовых гиро-ЛБВ в сочетании с минимальной чувствительностью к разбросу электронов в пучке. В данном докладе мы представляем результаты исследования двух гиро-ЛБВ с винтовыми волноводами Ка-диапазона. Одна из ламп разработана для работы в импульсном режиме, вторая – для непрерывного режима. В обеих лампах использована одноступенчатая схема рекуперации энергии. Одним из преимуществ работы на второй гармонике гирочастоты является возможность использования несверхпроводящих соленоидов для создания магнитного поля. В представленных экспериментах для создания поля 0.7 Тл используются жидкостно-охлаждаемые соленоиды на постоянном токе.

Импульсная гиро-ЛБВ работает при напряжениях до 70 кВ и токах до 10 А. В ней используется схема рекуперации энергии, в которой положительное напряжение прикладывается к винтовой структуре, отрицательное напряжение прикладывается к катоду, в то время как анод и коллектор заземлены (рис.2). Источник отрицательного напряжения служит для начального ускорения электронов и обеспечивает большую часть общего тока пучка от катода к коллектору. Источник положительного напряжения обеспечивает дополнительное ускорение частиц до рабочей энергии в пространстве взаимодействия и поддерживает паразитный ток, вызванный потерей частиц при осаждении на структуру и утечкой через изоляторы и охлаждающую жидкость.

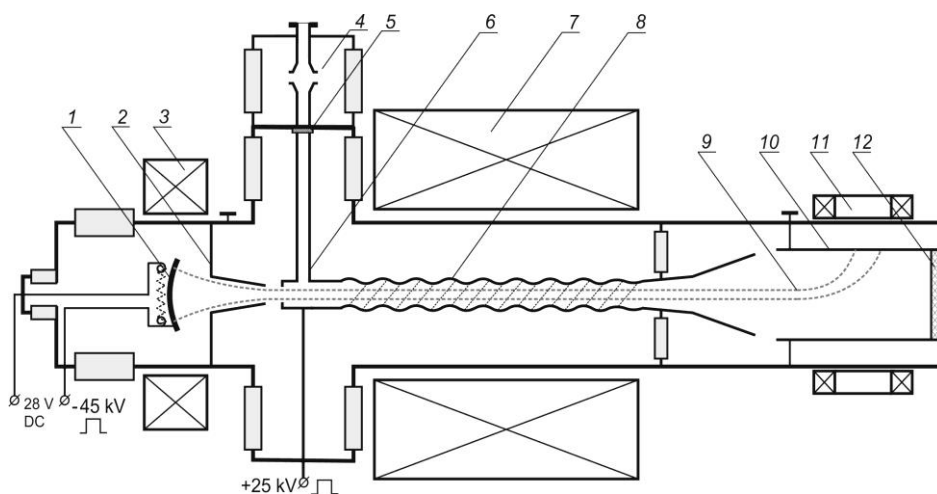


Рисунок 2. Схема импульсной гиро-ЛБВ: 1 – катод с подогревателем; 2 – анод; 3 – катодная катушка; 4 – внешняя часть системы ввода излучения; 5 – окно ввода; 6 – внутренняя часть системы ввода излучения; 7 – основной соленоид; 8 – винтовой волновод; 9 – электронный пучок; 10 – коллектор; 11 – коллекторная катушка; 12 – окно вывода (серыми прямоугольниками обозначены изоляторы).

Для гиро-ЛБВ входной сигнал имеет мощность 1-2,5 кВт в интервале частот 33.1-35.5 ГГц. Этот сигнал транспортируется через стандартный волновод Ка-диапазона и систему ввода. Усиленный сигнал в виде моды $TE_{1,1}$ проходит через переход от винтового волновода

к круглому и преобразуется сначала в специальную смесь мод, распространяющуюся с минимальными потерями через разрыв волноводной системы, а затем в гауссов пучок, в виде которого СВЧ мощность излучается через широкополосное выходное окно. Выходное излучение поглощается калориметрической нагрузкой, имеющей также ответвитель для измерения средней мощности, формы импульса, импульсной мощности и несущей частоты. Представленные здесь результаты измерений, были получены при катодном потенциале -45 кВ, потенциале на структуре 25 кВ, токе пучка 10 А, длительности импульса около 100 мкс. Измеренная выходная мощность составляла от 130 кВт до 160 кВт в диапазоне частот 33.1-35.5 ГГц при фиксированном значении магнитного поля.

Второй, из представленных экспериментов, относится к исследованию giro-ЛБВ Кадиапазона, работающей в непрерывном режиме. В рассматриваемой лампе используется электронный пучок с энергией частиц и током 40 кэВ и 1.5 А, соответственно. Выход усилителя соединен со сверхразмерным гофрированным волноводом, поддерживающим моду $HE_{1,1}$. Основные результаты в экспериментах с данной giro-ЛБВ были получены при напряжении основного источника питания 20 кВ и токе пучка 1.5 А. Максимальная выходная мощность 10 кВт и мгновенная полоса усиления 1.5 ГГц по уровню -3 дБ были получены при фиксированном магнитном поле величиной около 0.7 Тл. Плавная перестройка основного магнитного поля позволяла получить более широкую мгновенную полосу усиления, но с более низкой выходной мощностью (рис.3).

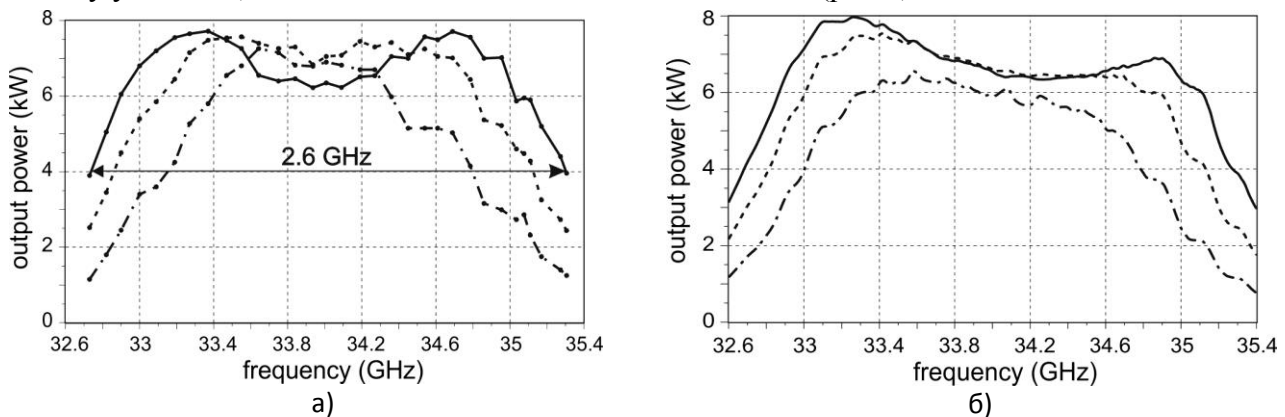


Рисунок 3. Измеренная (а) и расчетная (б) зависимости выходной мощности от частоты для непрерывной giro-ЛБВ при магнитном поле 0.653 Тл: сплошная, пунктирная и штрих-пунктирная линии соответствуют входной мощности 50 Вт, 25 Вт и 10 Вт в расчетах; и мощности 100 Вт, 50 Вт и 20 Вт от СВЧ источника в измерениях, соответственно.

Отметим, что кроме исследований самих широкополосных усилителей в ИПФ РАН также разрабатываются соответствующие линии передачи, позволяющие передавать выходное излучение от giro-ЛБВ до нагрузки с минимальными потерями. Данные линии передачи, основанные на квазиоптических компонентах, могут включать в себя повороты, вращающиеся сочленения, диагностические ответвители, разделители мощности и т.п.

Новые направления

Среди новых разработок гиротронов стоит отметить исследование захвата осцилляций прибора внешним сигналом. Для мощных гиротронов (например, 170 ГГц/ 2МВт) численно исследован захват внешним монохроматическим сигналом частоты и фазы колебаний очень высокой рабочей моды ($TE_{28,12}$). Показано, что в широкой области значений магнитного поля и напряжения даже при относительно малой мощности внешнего сигнала происходит установление одномодовой генерации с высоким КПД на частоте внешнего сигнала.

Использование режима захваченных колебаний позволяет обеспечить работу генератора на очень высоких модах, стабилизировать частоту при нестабильных параметрах высоковольтных источников, повысить КПД. Стабилизация фазы излучения генератора внешним сигналом представляется перспективной также для создания большого числа когерентных источников излучения - сложении мощностей нескольких гиротронов. Разработан и изготовлен макет гиротрона с квазиоптическим преобразователем, обеспечивающим трансформацию в гауссов волновой пучок рабочих мод гиротрона ($TE_{\pm 28,12}$, 170 ГГц) обоих направлений вращения (А.В.Чирков, Г.Г.Денисов, А.Н.Куфтин, 2013). Пучки, соответствующие волнам противоположных вращений, выходят через вакуумное окно прибора под углами ± 10 градусов. Гиротрон испытан в режиме импульсной (100 мкс) генерации с мощностью до 2 МВт. Смена направления вращения рабочей моды осуществлялась небольшим – около 0.2 мм - изменением радиуса электронного пучка в резонаторе полем катодной катушки. Разработанная квазиоптическая схема используется для эффективного ввода внешнего сигнала в резонатор мегаваттного гиротрона для реализации режима стабилизации частоты и фазы излучения. При этом внешний сигнал вводится в гиротрон квазиоптическим пучком, соответствующим моде одного вращения, а выводится пучком, соответствующим моде противоположного вращения.

В настоящее время разрабатываются гиро-ЛБВ для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Среди этих разработок можно отметить гиро-ЛБВ W-диапазона (на частоту 95 ГГц) с уровнем импульсной мощности десятки киловатт и шириной полосы до 7 ГГц, перспективную для систем радиолокации высокого разрешения. Найдена конфигурация, обеспечивающая устойчивую работу данного гиро-усилителя на 3-й гармонике циклотронной частоты, что определяет возможность его реализации на основе несверхпроводящих магнитных систем. Кроме того разработана (выполнены расчеты и спроектированы основные узлы экспериментальной установки) гиро-ЛБВ на центральную частоту 260 ГГц с параметрами (непрерывная мощность несколько сотен ватт, полоса 5-6 ГГц), привлекательными для спектроскопических приложений.

Работа поддержана грантом № 14-29-00192 Российского научного фонда.

Библиографический список

1. А.В. Гапонов. Возбуждение линии передачи непрямолинейным электронным пучком. // Изв. вузов. Радиофизика, 1959 - т. 2 - № 3 - с. 443-450.
2. Гапонов А.В. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике./ А.В. Гапонов, М.И. Петелин, В.К. Юлпатов. // Изв. Вузов, Радиофизика, 1967 т. 10 - № 9-10 - с. 1415-1424.
3. M. Thumm, State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers, KIT Scientific Publishing, 2014.
4. Denisov G.G. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion,/ G.G. Denisov, A.G. Litvak, V.E. Myasnikov, E.M. Tai and V.E. Zapevalov// - *Nuclear Fusion* – 2008- v.48 - no - 4007 .
5. Denisov G.G./ Gyro-TWT with a Helical Operating Waveguide: New Possibilities to Enhance Efficiency and Frequency Bandwidth G.G. Denisov, V.L. Bratman, A.D.R. Phelps, S.V. Samsonov // *IEEE Trans. on Plasma Science*-1998 - vol.26 - no.3 - pp.508-518.
6. S.V. Samsonov, G.G. Denisov, I.G. Gachev, et al. CW Ka-band kW-level Helical-Waveguide Gyro-TWT // *IEEE Trans. on Electron Devices* -2012 - vol. 5 - no. 8 - pp. 2250 – 2255.