

Глявин М.Ю., Зотова И.В., Лучинин А.Г., Фокин А.П., Цветков А.И.
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН

Компактные электронные ТГц мазеры с рекордными характеристиками

Когерентное электромагнитное излучение терагерцового диапазона частот (0.1 - 10 ТГц) относительно высокой мощности обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. В данной работе представлены результаты ИПФ РАН по созданию электронных циклотронных мазеров терагерцового частотного диапазона с рекордными значениями частоты, пиковой и средней мощности, включая разработку новых схем этих приборов.

Ключевые слова: Электронные циклотронные мазеры, мощное когерентное электромагнитное излучение терагерцового частотного диапазона.

В настоящее время освоение терагерцового диапазона мощными источниками излучения является одной из важнейших задач СВЧ электроники. Как известно, ни классические приборы с медленными волнами, ни лазеры, ни твердотельные приборы в силу принципиальных ограничений не способны сгенерировать в этом диапазоне мощности даже на уровне нескольких Ватт. Единственной возможностью достигнуть высоких (вплоть до сотен кВт в импульсном режиме) уровней является использование приборов с быстрыми волнами – мазеров на циклотронном резонансе. В данной работе представлены результаты создания наиболее успешной разновидности МЦР -гиротронов, полученные в ИПФ РАН за несколько последних лет [1-7].

1. Создание непрерывных мощных гиротронов и их использование для перспективных приложений.

Выполнен комплекс работ по созданию гиротрона с трубчатым электронным пучком, работающего на основной циклотронной гармонике в непрерывном режиме генерации на частоте 0.2-0.3 ТГц. В качестве основного элемента магнитной системы использован криомагнит с охлаждением газообразным гелием компании Jastec, Inc. (Япония), обеспечивающий величину магнитного поля до 10 Тл в теплом отверстии диаметром 100 мм. Гиротрон спроектирован с триодной электронно-оптической системой, что позволяет при необходимости варьировать в широком диапазоне параметры электронного потока, при этом в качестве основного рассматривался режим, реализующийся при совпадении потенциалов анода и корпуса лампы, т.е. диодный. Резонатор выполнен в виде отрезка цилиндрического волновода. Оптимизация электродинамической системы и расчет мощности и КПД генерации проводились при помощи самосогласованных нестационарных кодов, разработанных в ИПФ РАН.

В ходе экспериментов исследованы режимы генерации гиротрона с рабочей частотой 0.263 ТГц как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Выходная мощность измерялась с помощью калориметра, установленного непосредственно за выходным окном,

и достигала своего максимального значения 1 кВт при напряженности магнитного поля 9.6 Тл. КПД при этом составил около 17%. Следует отметить, что полученная мощность избыточна для спектроскопических приложений и в этой связи перспективным представляется режим генерации при напряжении 14 кВ и очень малом токе 0.02 А (КПД около 3%) в котором была получена мощность 10 Вт. Величина перестройки частоты при изменении температуры составила около 4 МГц/°С, а при изменении катодного напряжения – около 33 МГц/кВ. Ширина спектра излучения составила около 0,5 МГц.

С использованием этого гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и мощностью до 1 кВт впервые реализованы непрерывные записи молекулярных спектров высокого разрешения с применением мощного источника непрерывного когерентного излучения субтерагерцового диапазона. Исследован «силовой» подход к повышению чувствительности метода радиоакустического детектирования за счет повышения мощности излучения. В результате анализа экспериментальных профилей известных линий вращательного спектра SO₂ было впервые продемонстрировано, что повышение мощности излучения примерно на три порядка приводит к пропорциональному увеличению чувствительности РАД спектрометра. Это позволило, в частности, пронаблюдать предсказанные ранее слабые переходы в молекуле SO₂. Выбор двуокиси серы в качестве исследуемого газа обусловлен ограничением перестройки частоты гиротрона. Ошибка измерения составляет порядка ±0.2 МГц. Максимальная чувствительность спектрометра по поглощению определена как $6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ при постоянном времени синхронного детектирования 1 с. Получены записи молекулярных спектров SO₂ с аргоном в качестве буферного газа.

Изложенные выше эксперименты были проведены при мощностях 1-10 Вт, что существенно выше, чем у других доступных исследователям источников ТГц излучения, однако далеки от максимально достижимых в созданном авторами проекте гиротроне. Наиболее яркой демонстрацией востребованности киловаттного уровня мощности является эксперимент по получению нанопорошков методом испарения-конденсации. По сравнению с традиционно используемыми "технологическими" частотами диапазона 24-28 ГГц, повышение частоты до 263 ГГц позволило увеличить плотность энерговклада и эффективность поглощения, тем самым повысив скорость испарения (скорость образования нанопорошков) примерно в 3 раза.

Проведены эксперименты по инициации непрерывного (десятки секунд) разряда, инициируемого излучением гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и мощностью 1 кВт в газовой струе (аргон, ксенон). С этой целью разработан квазиоптический тракт транспортировки ТГц излучения, обеспечивающий фокусировку излучения в пятно с характерным размером 1-2 мм. Такой разряд представляется перспективным для создания источников экстремального ультрафиолета, но для этого требуется повышение мощности и частоты гиротрона, что предлагается реализовать на следующем этапе проекта.

2. Разработка импульсных гироприборов и их экспериментальное исследование

На базе экспериментального стенда, оснащенного источником импульсного магнитного поля с индукцией до 30 Тл и электронной пушкой, формирующей мощный трубчатый электронный пучок (60 кэВ, десятки ампер) проведено исследование методов селекции и режимов конкуренции мод в сверхразмерных резонаторах, позволяющих реализовать устойчивую одномодовую генерацию в диапазоне около 2 ТГц на второй гармонике гирочастоты. Для этого предложено использовать систему связанных резонаторов.

Проведено исследование режимов генерации гиротрона с рабочей частотой 300 ГГц с серией специально изготовленных резонаторов различного диаметра и длины на базе импульсного соленоида с азотным охлаждением. В ходе экспериментов в режиме разовых импульсов длительностью 20 микросекунд получена мощность до 200 кВт на частотах 290-

330 ГГц. Следует отметить, что мощность в наших экспериментах вдвое меньше, чем реализованная в JAЕА с гиротроном на базе криомагнита. Однако генерация наблюдается в более широкой полосе частот, поскольку при изменении магнитного поля соленоида имеет место последовательное возбуждение серии мод при уровне мощности излучения 150-200 кВт. Эффективность генерации составила 10-15%, что примерно вдвое ниже характерных значений для гиротронов на основном циклотронном резонансе и свидетельствует о недостаточной доле вращательной энергии электронов в пучке. По-видимому, это является "платой" за возможность работать в широком интервале магнитных полей, и для повышения КПД требуется дальнейшая оптимизация электронной оптики.

Для спектрального анализа импульсов излучения гиротронов с импульсным магнитным полем изготовлены фильтры верхних частот и разработан математический алгоритм, позволяющий измерять текущую частоту и спектр разовых ТГц импульсов с широкой, до нескольких десятков ГГц, перестройкой частоты в течении импульса. Отметим, что в настоящее время отсутствуют альтернативные средства измерения подобных сигналов.

3. Теоретическое исследование особенностей электронно-волнового взаимодействия. Анализ новых перспективных схем МЦР.

Как известно, предельные частоты генерации гиротронов, работающих в непрерывном режиме, во многом определяются интенсивностью магнитных полей современных криомагнитов. Радикальное повышение рабочих частот обеспечивается возбуждением высших гармоник, при этом, как правило, требуется применять специальные методы селекции рабочего типа колебаний. Различают электродинамические (например, упомянутое выше использование резонаторов сложного профиля, но они требуют высокой точности изготовления) или электронные (например, использование приосевых электронных пучков со сложными электронно-оптическими системами) методы селекции. Одним из эффективных методов селекции является использование многолучевых систем, в которых дополнительный пучок может быть как генерирующим (по отношению к рабочей моде), так и поглощающим (по отношению к паразитным модам). В рамках проекта проанализирован гиротрон с двумя генерирующими пучками (сделанные оценки показывают, что данная схема для рассматриваемого случая является предпочтительной) на частоту 0.79 ТГц. Рабочее напряжение системы 20 кВ, суммарный электронный ток 2А, рабочая мода $TE_{8,5}$. В первых экспериментах получена мощность в несколько Ватт, что заведомо достаточно для большинства спектроскопических приложений. Следует отметить, что в случае успешного завершения экспериментов данный гиротрон станет наиболее высокочастотным в мировой линейке приборов, разрабатываемых для ЯМР/ДПЯ спектрометров высокого разрешения.

На основе прямого численного моделирования с использованием PIC кода CST Studio Suite исследована новая схема коротковолновых гиротронов с планарной геометрией пространства взаимодействия и комбинированным продольно-поперечным дифракционным выводом излучения. В предложенной ранее авторами схеме планарного гиротрона использовался только поперечный (по отношению к направлению поступательного движения частиц) вывод энергии. Это обеспечивает дифракционную селекцию по «широкой» поперечной координате и, как показывает анализ, позволяет осуществить эффективный отбор энергии у ленточного поливинтового электронного потока с линейным размером до 100 длин волн. Вместе с тем очевидным недостатком чисто поперечного вывода энергии является плохая совместимость резонатора гиротрона с внешней магнитной системой, формирующей продольное магнитное поле, и, кроме того, - проблема селекции мод по продольной (закрытой) координате. Для решения указанных проблем было предложено использовать постановку на боковых торцах

электродинамической системы планарного гиротрона дополнительных поворотных отражателей (дефлекторов), обеспечивающий однонаправленный вывод излучения в сторону коллектора. На основе PIC моделирования продемонстрирована возможность устойчивой одномодовой генерации в такой системе при поперечных размерах электродинамической системы, превосходящей размеры современных мегаваттных гиротронов этого же диапазона. Это открывает возможность освоения более высоких токов и, соответственно, существенного повышения мощности излучения в коротковолновых гиротронах.

С точки зрения повышения эффективности энергообмена в указанной выше схеме гиротрона вместо традиционной трубчатой геометрии поливинтовых электронных потоков целесообразно использовать ленточную геометрию электронных пучков, за счет чего увеличивается коэффициент связи электронов с волной. На основе трехмерного моделирования проведен сравнительный анализ гиротронов с конфокальными резонаторами, запитываемых трубчатым и ленточным электронными пучками. Продемонстрирована возможность эффективной генерации на основной гармонике гирочастоты. Показано, что модифицированная схема позволяет существенно уменьшить стартовый ток генератора. Важным достоинством обсуждаемой схемы является возможность реализации перестройки частоты излучения гиротрона за счет механического изменения расстояния между зеркалами резонатора. С целью улучшения селекции мод по поперечному индексу перспективно использование многолучевых конфигураций электронно-оптических систем планарной геометрии.

Проведены теоретические исследования режимов генерации гиротрона, работающего при пониженной энергии электронов в рабочем пространстве. С этой целью была рассмотрена схема гиротрона, в которой к рабочему резонатору приложено тормозящее напряжение. Использование такой схемы позволяет при заданной длине резонатора существенно увеличить время жизни электронов в рабочем пространстве, за счет чего обеспечивается снижение стартовых и рабочих токов гиротрона. При заданном токе инжекции в указанной схеме условия самовозбуждения обеспечиваются при более короткой длине и, соответственно, при относительно низкой дифракционной добротности рабочего резонатора. В результате становится возможным существенное снижение доли омических потерь. Эффективность указанной схемы была продемонстрирована в численных расчетах, в которых показано, что снижение ускоряющего напряжения на 30% позволяет при заданной длине резонатора на порядок снизить стартовый ток гиротрона.

4. Исследование сверхизлучательных режимов генерации гиротронов

Было выполнено. Проведено теоретическое исследование процесса циклотронного сверхизлучения (СИ) электронного сгустка, формируемого в электростатической ловушке. При этом для создания неравновесного распределения по поперечным скоростям предложено использовать поперечно-неоднородное поле киккера, размещенного внутри ловушки, при пролете которого электроны приобретают вращательную поперечную скорость и оказываются захваченными между зеркалами ловушки. После накопления в ловушке достаточного заряда электронный пучок отключается. Далее имеет место вылет из ловушки электронов с малыми вращательными скоростями, в результате чего функция распределения по вращательным скоростям становится неравновесной, и происходит высвечивание мощного короткого электромагнитного импульса сверхизлучательного типа. Реализуемость предложенной схемы продемонстрирована на основе прямого численного моделирования с использованием PIC кода KARAT. Моделирование показало, что оптимальная величина ведущего магнитного поля соответствует излучению вблизи критической частоты TE моды круглого волновода. Изменение величины ведущего поля

приводит к селективному возбуждению различных мод, что может быть использовано для повышения частоты излучаемых импульсов СИ.

Исследованы режимы работы гиротронов, запитываемых непрерывными электронными пучками, в условиях большого превышения рабочих токов над стартовыми значениями. Показано, что существует область значений ведущего магнитного поля, когда в такой системе происходит развитие сверхизлучательной неустойчивости, приводящей к формированию последовательностей коротких импульсов СВЧ излучения с пиковой мощностью, в несколько раз превышающей среднюю мощность электронного потока. Необходимым условием этого является последовательный отбор СВЧ-импульсом энергии у различных фракций электронного потока за счет движения импульса относительно электронного пучка. Характерная длительность генерируемых импульсов составляет доли нс, период следования – десятки, а пиковая мощность генерируемых импульсов может превышать мощность электронного пучка более чем в 6 раз.

5. Генерация широкополосного шумоподобного излучения

Для ряда практически задач, включая целый ряд биологических и медицинских приложений, тестирование электропрочности многочастотных волноведущих трактов, специальных локационных приложений и т.п. представляет интерес генерация широкополосного шумоподобного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Существенное расширение полосы излучения гиротронов может быть достигнуто за счет использования автомодуляционных режимов генерации, реализующихся при значительном превышении тока над порогом. Выполнено теоретическое исследование хаотических и квазихаотических режимов генерации субтерагерцовых гиротронов, работающих на гармониках гирочастоты. Проведенный анализ показал, что в достаточно широкой области ведущих магнитных полей наблюдались шумоподобные режимы генерации с устойчивым возбуждением рабочей моды $TE_{2,1}$ на второй гармонике гирочастоты. Максимальная ширина спектра излучения достигала 2%, что при центральной частоте 0.2 ТГц составляет порядка 4.6 ГГц. Следует отметить, что КПД таких процессов относительно невелик, что делает целесообразным использование гиротронов в качестве задающих генераторов шумовых сигналов. Далее такие сигналы могут быть усилены, например, в гиро-ЛБВ с винтовым гофрированным волноводом, обладающей близкой по значению полосой усиления и высоким уровнем выходной мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 14-12-00887.

Библиографический список

1. M.Yu. Glyavin, A.V.Chirkov, G.G.Denisov et al. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media, *Rev. Sci. Instr.*, 86(5), 054705 (2015)
2. M.Yu.Glyavin, T.Idehara, S.P.Sabchevski Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and high-power THz technologies. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 5, 5, 788-797 (2015)
3. M.Glyavin, G.Denisov, V.Zapevalov, M.Koshelev, M.Tretyakov, A.Tsvetkov High-power terahertz sources for spectroscopy and material diagnostics *PHYSICS-USPEKHI*, 59, 6, 595-604 (2016)
4. N.S.Ginzburg, M.Yu.Glyavin, A.M.Malkin et al. Improvement of operation stability at high cyclotron harmonics in the double-beam THz range gyrotrons. *IEEE Trans. On Plasma Science* 44, 8, 1303-1309, (2016)
5. A.Koshelev, A.I.Tsvetkov, M.V.Morozkin, M.Yu.Glyavin, M.Yu.Tretyakov. Molecular gas spectroscopy using radioacoustic detection and high-power coherent subterahertz radiation sources. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 331, 9–16, (2017)
6. A.V.Vodopyanov, M.Yu.Glyavin, S.V.Golubev et al. Plasma density in discharge sustained in inhomogeneous gas flow by high-power radiation in the terahertz frequency range, *Technical Physics Letters*, 43, 2, 186–189 (2017)
7. N.S.Ginzburg, M.Y.Glyavin, I.V.Zotova, I.V.Zheleznov, A.P.Fokin. Optimization of terahertz range gyrotron self-excitation conditions by increasing the lifetime of cyclotron oscillators in low-voltage interaction space. *Tech. Phys. Lett.* (2017) 43, 1, 110-113.