

На правах рукописи

Фокин Андрей Павлович

**СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ
С РЕКОРДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

01.04.03 – «радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Глявин Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Официальные оппоненты: Соминский Геннадий Гиршевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Скворцова Нина Николаевна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Защита состоится «10» декабря 2018 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из актуальных задач современной радиофизики является активное продвижение источников излучения в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны (0.25 – 1 ТГц). Это вызвано развитием таких перспективных фундаментальных и практических приложений этих источников, как, например, электронно-циклотронный нагрев и диагностика плазмы [1], задачи биофизики [2], спектроскопия высокого разрешения [3], визуализация скрытых объектов [4]. Большинство таких приложений требуют не только повышения частоты излучения, но и увеличения выходной мощности источников излучения. Среди широко применяющихся на практике источников терагерцового и субтерагерцового излучения можно выделить лампы обратной волны (ЛОВ), твердотельные приборы (диоды Ганна и квантовые каскадные лазеры) и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [5]. Однако высокочастотные черенковские ЛОВ и твердотельные устройства характеризуются относительно низким уровнем выходной мощности на уровне десятков милливатт. Современные ЛСЭ обладают средними мощностями более киловатта, однако размеры, сложность и стоимость этих установок не позволяют использовать их в качестве доступных и мобильных лабораторных систем. С учетом этих замечаний, во многих случаях наиболее перспективным вариантом является хорошо себя зарекомендовавшая разновидность мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) – гиротроны [6], которые сочетают компактность, высокую мощность и высокий КПД. Принцип работы МЦР основан на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле в условиях циклотронного резонанса: $\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} \approx n\Omega$, где Ω – циклотронная частота, n – номер циклотронной гармоники, k_{\parallel} – продольное волновое число волны с частотой ω , v_{\parallel} – поступательная скорость электронов [7]. Основной особенностью гиротронов, позволяющей достичь большой мощности и высокого КПД, является взаимодействие винтового электронного пучка с собственной модой круглого волновода около критической частоты. Взаимодействие с быстрыми волнами уменьшает влияние скоростного разброса, а отсутствие мелкомасштабных элементов и применение сверхразмерных резонаторов позволяют существенно повысить мощность выходного излучения по сравнению с электронными приборами на медленных волнах.

Результатом более чем полувековых исследований гиротронов [8] стало создание источников излучения с высоким значением КПД (до 70% в системах с рекуперацией энергии) и рекордной мощностью в различных частотных диапазонах (более 1 МВт на частоте 170 ГГц [9], 200 кВт на частоте 670 ГГц [10] и 0.5 кВт на 1.3 ТГц [11]). Как уже отмечалось выше, в суб-ТГц диапазоне гиротроны по ряду характеристик превосходят другие источники излучения и активно используются для целого ряда приложений.

Наряду с продвижением в область больших частот и больших мощностей остаются актуальными задачи управления параметрами излучения, упрощение процесса эксплуатации и повышение надежности комплексов. В настоящее время работы по совершенствованию гиротронов суб-ТГц и ТГц диапазона ведутся в ряде мировых ведущих научных центров. В частности, в центре по исследованию приборов дальнего инфракрасного диапазона университета Фукуи (FIR FU, Япония) исследуются и различные подходы к созданию высокочастотных гиротронов и перспективные приложения мощного суб-ТГц излучения [12,13]. В Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Карлсруэ, Германия) разрабатываются и испытываются мощные гиротроны для нагрева и диагностики плазмы [14]. В Массачусетском технологическом институте (MIT, США) ведутся разработки гиротронов для спектроскопии и ТГц видения [15]; в Университете Мэриленда (UMD, США) для детектирования источников ионизирующего излучения [16]. Исследования гиротронов и их компонентов ведутся в научно-исследовательской компании Calabasas Creek Research (США) [17] и Терагерцовом научном центре (THz RC, Чэнду, Китай) [18]. В области компонентов и источников для спектроскопии высокого разрешения созданы коммерческие компании, например, Bridge 12 (США) [19] и подразделение Bruker-Biospin (использующее суб-ТГц гиротроны производства компании Communication & Power Industries, США) [20]. В Институте прикладной физики Российской академии наук также активно ведется разработка и исследование гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Так в последние годы были достигнуты рекордные значения частоты и мощности как в импульсных системах (частота 1 ТГц при мощности более 1.5 кВт [21]), так и в гиротронах с непрерывным режимом работы (частота 0.3 ТГц и мощность более 2.5 кВт [22]).

В процессе развития источников терагерцового и субтерагерцового диапазонов приходится решать ряд новых физических и технических задач, связанных со специфическими режимами работы приборов, обусловленными нуждами развивающихся приложений. К ним относятся задачи быстрого управления в широком диапазоне частот и мощностей, стабилизация параметров излучения, задачи работы гиротрона с пониженным током и энергией электронного пучка. В современных тенденциях дальнейшего развития гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн можно выделить два основных направления, обусловленных, в основном, требованиями со стороны потребителей излучения.

К первому направлению можно отнести совершенствование гиротронов со средним уровнем выходной мощности, на уровне сотен ватт, которые могут найти свою нишу в областях спектроскопии, медицины, радиоастрономии. За последнее десятилетие гиротроны средней мощности активно продвигаются к частоте излучения в 1 ТГц в непрерывном режиме и наращивают мощность излучения, при этом не останавливается и совершенствование систем управления. Для перспективных приложений гиротронов этого типа

важной является долговременная стабильность параметров излучения, обусловленная как возможностями системы электропитания и системы управления, так и влиянием процессов внутри гиротрона на электронно-волновое взаимодействие. Поэтому задачи создания быстрых систем управления и стабилизации параметров излучения являются одними из наиболее актуальных. Для их решения необходимы исследования зависимости электронно-волнового взаимодействия от технических параметров установки и физических процессов внутри вакуумного объема лампы, а также разработка новых подходов к проектированию гиротронов.

Вторым направлением является процесс увеличения мощности и частоты излучения установок, предназначенных для задач нагрева плазмы, создания газового разряда, и ряда других исследований плазмы. В гиротронах данного типа важным является не только обеспечение высокого КПД и большой мощности излучения, но и возможность долговременной работы с параметрами, близкими к предельным. Использование гиротронов в промышленных задачах требует максимальной надежности и повторяемости результатов одновременно с требованием максимальной эффективности при минимально возможном энергопотреблении и минимальных затратах на обслуживание. Основными проблемами при этом являются обеспечение стабильной и высокоэффективной генерации рабочей моды в сверхразмерном резонаторе с допустимым уровнем тепловой нагрузки, разработка систем рекуперации остаточной энергии электронного пучка и обеспечение эффективного вывода излучения и преобразования его в волновой пучок. В связи со всем вышесказанным, необходимы как исследования новых гиротронов, обеспечивающие экспериментальную проверку методов селекции колебаний и оптимизации условий взаимодействия электронов с полем резонатора, систем преобразования излучения и рекуперации энергии, так и исследования надежности, стабильности работы существующих гиротронов и зависимости параметров излучения от возможных изменений, связанных с долговременной работой.

Цели диссертации

1. Изучение особенностей процессов электронно-волнового взаимодействия в мощных субтерагерцовых гиротронах;
2. Сравнение теоретических и экспериментальных данных, определение основных эффектов, влияющих на режимы генерации. Разработка систем управления параметрами излучения на основании выявленных закономерностей.
3. Экспериментальное исследование различных методов стабилизации частоты излучения гиротронов
4. Разработка гиротронов с рекордным уровнем мощности в субтерагерцовом диапазоне частот.

Научная новизна

1. Экспериментально исследована возможность пассивной стабилизации и плавной перестройки частоты и мощности излучения гиротрона за счет использования волны, отраженной от нерезонансной нагрузки;
2. Экспериментально продемонстрирована возможность получения узких (вплоть до $\Delta f/f = 10^{-12}$) спектральных линий излучения субтерагерцовых гиротронов;
3. Получены рекордные значения мощности гиротронов на основной гармонике циклотронной частоты с частотами генерации 250 ГГц в непрерывном режиме на основе сухого криомагнита и 670 ГГц в импульсном режиме на базе импульсного соленоида.

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на создание нового класса мощных субтерагерцовых генераторов и систем управления и стабилизации параметров излучения. Применение предложенных в данной работе методов и подходов позволит расширить область применения гиротронов в задачах спектроскопии высокого разрешения, реализовать мастер-генераторы для обеспечения когерентности большого числа гиротронов. Полученные в ходе работы данные о режимах работы мощных гиротронов суб-ТГц диапазона позволят создать следующее поколение гиротронов мегаваттного уровня мощности для перспективных установок управляемого термоядерного синтеза.

Положения, выносимые на защиту:

1. Стабилизация частоты излучения гиротрона за счет отражения от нерезонансной нагрузки позволяет в несколько раз уменьшить ширину спектра и ослабить зависимость частоты излучения от флуктуаций технических параметров.
2. Управление анодным напряжением в триодной магнетронно-инжекторной пушке гиротрона с малой межэлектродной емкостью позволяет обеспечить модуляцию частоты и мощности с частотами вплоть до 1 МГц.
3. В субтерагерцовых гиротронах с уровнем мощности в сотни ватт за счет применения системы фазовой автоподстройки частоты возможно достижение ширины спектра излучения в 1 Гц и долговременной стабильности вплоть до 10^{-12} .
4. В гиротронах субтерагерцового диапазона частот со сверхразмерными резонаторами, работающих на основной гармонике циклотронной частоты, возможна реализация устойчивого режима одномодовой генерации с мощностью порядка сотен киловатт.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах [A1 – A15] и докладывались на международных конференциях по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017), Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Гонконг, Китай, 2015; Копенгаген, Дания, 2016; Канкун, Мексика, 2017; Нагоя, Япония, 2018), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2016, 2018; Карлсруэ, Германия 2017), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород, 2017), Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016, 2017), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2016), Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (С. Петербург, 2016, 2017, 2018), Международной молодежной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (Москва, 2015), Нижегородских сессиях молодых ученых (Н. Новгород, 2015 – 2018)

Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A49] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании взаимодействия электронов с полем резонатора, численном моделировании режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Экспериментальные исследования проводились в составе группы ученых и инженеров, работавших на гиротронных комплексах. Обработка результатов эксперимента производилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 96 страниц, включая 53 иллюстрации, 4 таблицы и список литературы из 105 наименований. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 49 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации

В первой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей управления и стабилизации частоты и мощности излучения гиротрона.

В п. 1.1 рассматривается возможность стабилизации частоты излучения гиротрона при помощи частичного отражения выходного сигнала от удаленной нерезонансной нагрузки [23]. Приведены результаты экспериментов с гиротронами с различными частотами излучения (28 ГГц и 231 ГГц), в которых показана возможность стабилизации частоты и уменьшения ширины спектра излучения как минимум в 2 раза за счет воздействия отраженного сигнала на режим генерации гиротрона.

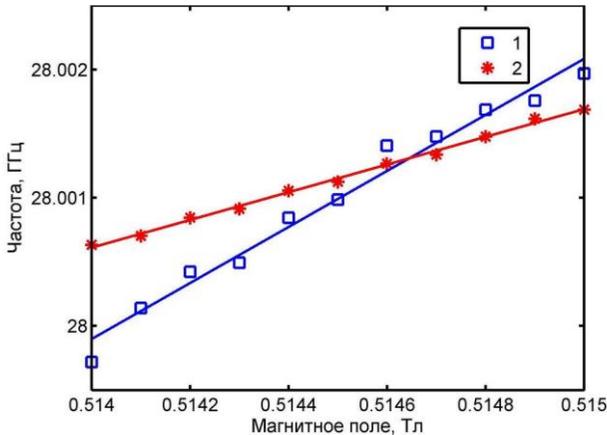


Рис. 1. Зависимость частоты генерации гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц от магнитного поля без отражений (1) и при отражении 8% мощности от нерезонансной нагрузки на расстоянии 20 см от выходного окна гиротрона (2)

Для эксперимента с низкочастотным гиротроном (28 ГГц) выполнено моделирование полной электродинамической системы, включающей в себя резонатор гиротрона, волноводный тракт и нерезонансный отражатель, и показано совпадение результатов численного моделирования зависимости частоты и мощности излучения от магнитного поля с результатами эксперимента. В ходе экспериментов с высокочастотным гиротроном подтверждено, что снижение коэффициента отражения из-за наличия поворотов волноводного тракта уменьшает возможности стабилизации частоты. На основе полученных данных предложена возможность плавной перестройки частоты (в пре-

делах, определяемых добротностью резонатора) и мощности излучения за счет механического изменения расстояния до подвижного нерезонансного отражателя (и тем самым фазы отраженного сигнала) в выходном волноводе. По результатам численного моделирования разработан подвижный моторизованный нерезонансный отражатель с дистанционным управлением, в ходе эксперимента подтверждена работоспособность метода и продемонстрировано плавное управление частотой излучения в пределах 5 МГц и мощностью в диапазоне 0.9 – 1.2 кВт.

В п. 1.2 обсуждаются возможности быстрого управления параметрами излучения гиротронов при помощи модуляции напряжения на аноде триодной магнетронно-инжекторной пушки с малой межэлектродной емкостью. Исходя из исследования флюктуаций параметров высоковольтных источников питания, имеющих характерные частоты осцилляций до 100 кГц, определены требования к быстродействию системы управления. Исходя из возможного быстродействия, необходимых параметров источников питания и систем модуляции в качестве основного подхода выбран метод управления анодным напряжением.

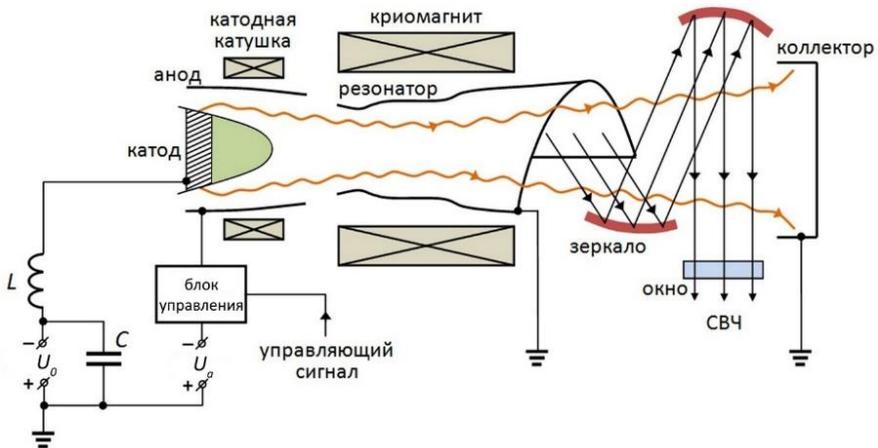


Рис. 2. Схема гиротрона с управлением параметрами излучения за счет изменения напряжения на аноде триодной магнетронно-инжекторной пушки

На основе самосогласованной модели гиротрона с нефиксированной продольным распределением высокочастотного поля выполнено моделирование зависимости частоты излучения от напряжения на аноде и соответствующего ему питч-фактора электронного пучка. В реализованной на основе сделанных расчетов системе управления напряжением на аноде продемонстрирована возможность контроля частоты и мощности излучения с частотой модуляции до 1 МГц, и предложены пути дальнейшего усовершенствования системы.

Показана возможность формирования импульсов излучения с короткими фронтами длительностью до 1 мкс. Продемонстрированная в эксперименте полоса системы управления позволила провести эксперимент по передаче звукового сигнала при помощи модуляции излучения, что открывает новые возможности применения гиротронов в задачах связи и телекоммуникаций.

В п. 1.3 рассмотрена система стабилизации частоты излучения гиротрона на основе цепи фазовой автоподстройки частоты с использованием системы управления параметрами излучения за счет изменения анодного напряжения, описанной в п. 1.2. В исследуемой схеме экспериментально продемонстрирована рекордная стабилизация частоты излучения гиротрона для спектроскопии с частотой 263 ГГц, позволяющая уменьшить ширину спектра излучения с 0.5 МГц до 1 Гц, что соответствует относительной ширине линии $\Delta f/f$ равной $4 \cdot 10^{-12}$. В такой схеме относительная долговременная стабильность частоты излучения определяется характеристиками опорного генератора, и может достигать величин вплоть до $\delta f/f = 10^{-12}$ при использовании рубидиевых часов.

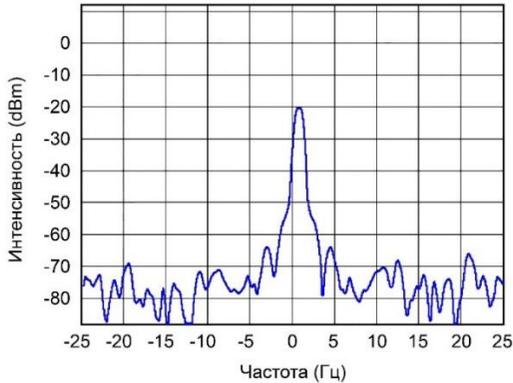


Рис. 3. Спектр выходного излучения (относительно несущей частоты 263 ГГц) гиротрона со стабилизацией частоты при помощи системы фазовой автоподстройки частоты за счет управления анодным напряжением

Частота такого стабилизированного гиротрона может с большой точностью управляться в пределах 50 МГц с сохранением ширины спектра и долговременной стабильности, позволяя реализовать различные режимы модуляции частоты. Полученные результаты открывают новые возможности для спектроскопических исследований и позволяют создавать "мастер-генераторы" для обеспечения когерентности большого количества гиротронов.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с экспериментальным исследованием мощных высокочастотных гиротронов, предназначенных для задач нагрева плазмы, создания локализованного газового разряда и удаленного детектирования источников ионизирующего излучения.

Так, в п. 2.1 приведены основные результаты теоретического исследования, выполненного в процессе разработки прототипа гиротрона для перспективных систем управляемого термоядерного синтеза будущего поколения, и показаны результаты экспериментального исследования прототипа. Исходя из параметров доступных криомагнитов, оценок плотности потерь в стенках резонаторов и исследования стартовых токов была выбрана рабочая мода $TE_{19,8}$ и определены параметры резонатора. По результатам численного моделирования показана возможность достижения выходной мощности более 200 кВт в непрерывном режиме на частоте 250 ГГц. Экспериментально продемонстрировано достижение выходной мощности более 300 кВт на частоте генерации 250 ГГц в импульсном режиме с выходным КПД более 30%.

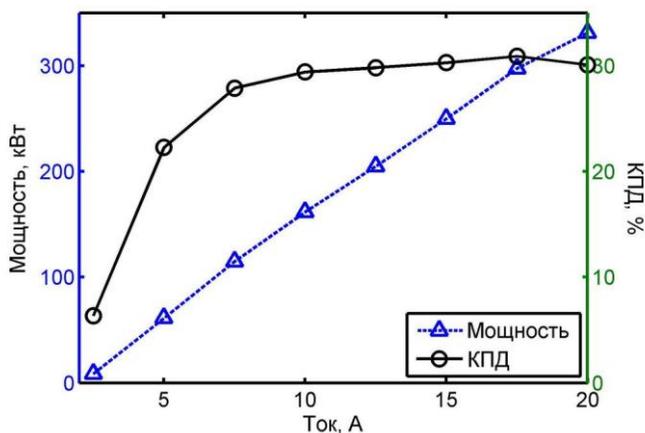


Рис. 4. Зависимость выходной мощности и КПД генерации мощного гиротрона с частотой 250 ГГц от тока электронного пучка при ускоряющем напряжении 55 кВ

Измерены параметры волнового пучка, сформированного встроенным квазиоптическим преобразователем, показано содержание Гауссовой компоненты более 98%. В ходе проведенных экспериментальных исследований получены зависимости мощности от различных технических параметров (например, от ускоряющего напряжения и тока электронного пучка), выполнено сравнение с результатами численного моделирования и сделаны выводы о реальных параметрах электронного пучка в рассмотренном гиротроне.

В п. 2.2 приводятся результаты исследования мощного (200 кВт) импульсного гиротрона с частотой 670 ГГц, предназначенного для инициации локализованного газового разряда [24]. Показаны результаты исследования отдельных элементов электронно-оптической и электродинамической систем

гиротрона. Так, после долговременных испытаний гиротрона обнаружен локальный перегрев коллектора, и предложен вариант модернизации импульсной магнитной системы с целью увеличить площадь токооседания электронного пучка. В модернизированном гиротроне продемонстрирована возможность увеличения длительности высоковольтного импульса с 20 до 40 мкс и отмечено снижение числа пробоев более чем в 2 раза. В реализованном на основе данного гиротрона комплексе для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда получена рекордная мощность излучения в диапазоне экстремального ультрафиолета.

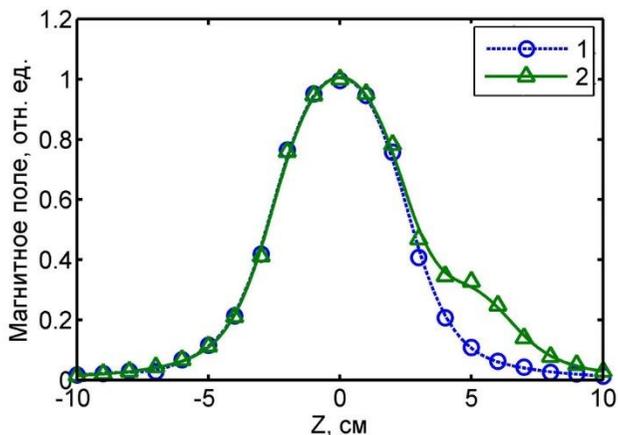


Рис. 5. Профиль магнитного поля исходного импульсного соленоида (1) и модифицированной магнитной системы (2)

В приложении 1 описаны основные аналитические модели гиротрона, использовавшиеся для численного моделирования нелинейных процессов электронно-волнового взаимодействия: с фиксированной продольной структурой поля, и самосогласованная модель с нефиксированной структурой поля. В приложении 2 представлены результаты численного моделирования на основе этих моделей влияния провисания потенциала, связанного с пространственным зарядом электронного пучка на выходные параметры излучения гиротронов со сверхразмерными электродинамическими системами. Рассмотрено изменение рабочих параметров гиротрона, связанное с изменением энергии электронов в процессе ионной компенсации пространственного заряда и предложены пути компенсации снижения эффективности электронно-волнового взаимодействия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен механизм плавной механической перестройки частоты излучения в полосе определяемой добротностью резонатора за счет изменения положения подвижной диафрагмы в выходном волноводном тракте. Аналогичный метод может использоваться для медленной модуляции мощности или стабилизации параметров излучения гиротронов.

2. Реализована система быстрого управления параметрами излучения гиротронов с триодной магнетронно-инжекторной пушкой на основе изменения потенциала анода магнетронно-инжекторной пушки с малой межэлектродной емкостью. В эксперименте показана возможность модуляции параметров излучения с частотой до 1 МГц.

3. За счет применения системы фазовой автоподстройки частоты экспериментально достигнута рекордно узкая линия излучения суб-ТГц генератора при уровне мощности в сотни ватт. Впервые в гиротронах получена ширина спектра в 1 Гц при долговременной стабильности до 10^{-12} .

4. Продемонстрированы возможности дальнейшего продвижения мощных гиротронов на основном циклотронном резонансе в суб-ТГц область частот. На частоте 250 ГГц получена выходная мощность более 300 кВт при КПД выше 30% в гиротроне без рекуперации энергии.

5. На основе импульсного гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц и мощностью 200 кВт реализован гиротронный комплекс для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда, позволивший получить рекордную мощность излучения в диапазонах вакуумного и экстремального ультрафиолета.

Список публикаций по теме диссертации

A1. Fokin A.P, Glyavin M. Yu, Nusinovich G.S. Effect of ion compensation of the beam space charge on gyrotron operation // *Phys. Plasmas*. 2015. Т. 22. 043119.

A2. Glyavin M.Yu. et al. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.* 2015. Т. 86. № 5. 054705.

A3. Цветков А.И. и др. Автоматизированный микроволновый комплекс на основе непрерывного 263 ГГц/1 кВт гиротрона // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 9. С. 709-719.

A4. Sidorov A. et al. Measurement of plasma density in the discharge maintained in a nonuniform gas flow by a high-power terahertz-wave gyrotron // *Phys. Plasmas*. 2016. Т. 23. 043511.

A5. Бакунин В.Л. и др. Влияние конкуренции мод на процессы захвата многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, №8-9. С. 709-720.

A6. Гинзбург Н.С. и др. Оптимизация условий самовозбуждения терагерцевых гиротронов на основе увеличения времени жизни циклотронных осцилляторов в рабочем пространстве с пониженным напряжением // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43, №2. С. 52-59.

A7. Водопьянов А.В. и др. Свечение плазмы импульсного разряда в азоте, создаваемого мощным излучением терагерцевого диапазона частот // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 2. С. 1-8.

A8. Водопьянов А.В. и др. Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцевого диапазона частот // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 4. С. 10-17.

A9. Новожилова Ю.В. и др. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор // *Изв. ВУЗов. ПНД*. 2017. Т. 25. № 1. С. 4-34.

A10. Vodopyanov A.V. et al. Application of the 263 GHz/1 kW gyrotron setup to produce a metal oxide nanopowder by the evaporation-condensation technique // *Vacuum*. 2017. Т. 145. С. 340-346.

A11. Bratman V.L. et al. Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage // *Phys. Plasmas*. 2017. Т. 24. 113105.

A12. Богдашов А.А. и др. Уменьшение ширины спектра излучения гиротрона при использовании внешних отражений // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44, № 5. С. 87-94.

A13. Glyavin M.Yu. et al. Investigations of frequency stabilization in the double-beam sub-THz gyrotron with delayed reflections of output radiation // *IEEE Trans. On Plasma Sci*. 2018. P(99):1-5.

A14. Fokin A.P. et al. High power sub-terahertz microwave source with record frequency stability up to 1 Hz // *Scientific Reports*. 2018. Т. 8. 4317.

A15. Denisov G.G. et al. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // Review of Scientific Instruments. 2018. T. 89. 084702.

A16. Цветков А.И. и др. Экспериментальное исследование 263 ГГц гиротрона для спектроскопии и диагностики различных сред // 2 Всероссийская микроволновая конференция. 2014 / ИРЭ РАН, Москва. С. 73-78.

A17. Глявин М.Ю., и др. Разработка микроволнового комплекса для медико-биологических исследований // Материалы 16 Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов, 2015. С. 77.

A18. Фокин А.П., Глявин М.Ю., Нусинович Г.С. Влияние ионной компенсации пространственного заряда электронного пучка на КПД гиротрона // IV Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий». М., НИЯУ МИФИ, 2015. С. 224-225.

A19. Фокин А.П., Глявин М.Ю. Влияние провисания потенциала пучка на КПД гиротрона // 20 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). Нижний Новгород, 2015. С. 64-65.

A20. Ginzburg N.S. et al. Optimization of starting conditions of terahertz range gyrotrons by increasing of electron interaction time in the “depressed” resonator // The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science. 2015. Belek, Antalya, Turkey. 15360942.

A21. Bogdashov A.A. et al. High power pulsed terahertz gyrotrons for creating of localized plasma discharge // Proceedings of the 4th Russia–Japan–USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies “RJUS TeraTech-2015”. 2015. IMT RAS, Chernogolovka, Russia. С. 65-66.

A22. Tsvetkov A.I. et al. Development of high power subterahertz CW gyrotrons and its application for spectroscopy and diagnostics of various media // 27th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. 2015. IPP, Greifswald, Germany.

A23. Glyavin M.Yu. et al. Development of THz Range CW Gyrotrons At IAP RAS // Proceedings of the 40th Int. Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves. 2015. Hong Kong, China. 15599163.

A24. Glyavin M.Yu. et al. Experimental investigation of powerful THz gyrotrons for initiation of localized gas discharge // Proceedings of the 40th Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. 2015. Hong Kong, China. 15588501.

A25. Zotova I.V. et al. Non-Autonomous Regimes In Gyrotrons With Low-Q Resonators // Proceedings of the 40th Int. Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves. 2015. Hong Kong, China. 15598990.

A26. Бакунин В.Л. и др. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним сигналом // X Всероссийский

семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2016. С. 75-76.

A27. Водопьянов А.В. и др. Применение непрерывного 263 ГГц/1 кВт гиротрона для получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения-конденсации // X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2016. С. 152-153.

A28. Фокин А.П. Устойчивость одномодовых колебаний в гиротронах на второй гармонике гирочастоты с симметричными рабочими модами // 21 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). Нижний Новгород, 2016. С. 38-39.

A29. Фокин А.П. и др. Управление мощностью и частотой излучения гиротронов, предназначенных для микроволновой обработки материалов, спектроскопии и диагностики различных сред // Сборник статей V Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург, 2016. С. 140-142.

A30. Fokin A.P., et al. Power and frequency control in gyrotrons for spectroscopy and materials processing // 28th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. Nizhny Novgorod, 2016.

A31. Bakunin V.L. et al. Influence of mode competition on frequency locking of multimode gyrotron by external monochromatic signal // 28th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons. Nizhny Novgorod, 2016.

A32. Бакунин В. Л., Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Материалы 26-й международной Крымской конференции СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2016.

A33. Vodopyanov A.V. et al. Gas breakdown by a focused CW 263 GHz beam // Proceedings of the 41st Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. 2016. Copenhagen, Denmark. 16502715.

A34. Новожилова Ю.В., и др. Стабилизация частоты гиротрона под воздействием внешнего монохроматического сигнала или отраженной волны // Материалы XI Международной школы конференции "Хаотические автоколебания и образование структур". Саратов, 2016. С. 40-41.

A35. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 100W/263 GHz continuous wave gyrotron // Proceedings of the 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2017. London, UK. 17578557.

A36. Богдашов А.А. и др. Влияние слабого отражения от нерезонансной нагрузки на режимы генерации технологического гиротрона // 22 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). Нижний Новгород, 2017. С. 87-88.

A37. Богдашов А.А. и др. Управление режимом генерации технологического гиротрона при слабом отражении от нерезонансной нагрузки // Сборник статей VI Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт Петербург, 2017. С. 490-492.

A38. Глявин М.Ю. и др. Компактные электронные ТГц мазеры с рекордными характеристиками // Сборник статей VI Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт Петербург, 2017. С. 227-231.

A39. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 100W/263 GHz continuous wave gyrotron // 29th Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons. 2017. Karlsruhe-Stuttgart-Garching, Germany.

A40. Bogdashov A.A. et al. Influence of weak reflection from a non-resonant load on the operation regimes of the 28 GHz technological gyrotron // 29th Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons. 2017. Karlsruhe-Stuttgart-Garching, Germany.

A41. Vodopyanov A.V. et al. High rate production of nanopowders by the evaporation – condensation method using gyrotron radiation // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. 02022.

A42. Sidorov A.V. et al. Gas breakdown by a focused beam of THz waves // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. 02031.

A43. Novozhilova Yu.V. et al. Influence of mode competition and external wave frequency modulation on gyrotron frequency locking // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. 04021.

A44. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 263 GHz continuous wave gyrotron // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. 04022.

A45. Bogdashov A.A. et al. Influence of weak reflection from a nonresonant load on the operation frequency of the 28 GHz technological gyrotron // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. 04037.

A46. Vodopyanov A.V. et al. A Point-Like Plasma, Sustained By Powerful Radiation Of Terahertz Gyrotrons, As A Source Of Ultraviolet Light // Proceedings of the 42nd Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. 2017. Cancun, Mexico. 17259315.

A47. Tsvetkov A I. et al. Applications of THz band gyrotrons at IAP RAS: Current state and prospects // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall. 2017. Singapore. 17596868.

A48. Fokin A., Sedov A., Tsvetkov A. Data Transmission Using Gyrotron Radiation as a Carrier // EPJ Web of Conferences, 2018. Vol. 187. 01007.

A49. Denisov G. et al. Design and Experimental Test Of 250 GHz/300 kW/CW Gyrotron // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 187. 01006.

Цитируемая литература

1. Granucci G. et al. Conceptual design of the EU DEMO EC-system: main developments and R&D achievements // *Nucl. Fusion*. 2017. Vol. 57, № 11. P. 116009.
2. Weightman P. Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation // *Phys. Biol.* 2012. Vol. 9, № 5. P. 053001.
3. Ghann W., Uddin J. Terahertz (THz) Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology // *Terahertz Spectroscopy - A Cutting Edge Technology* / ed. Uddin J. InTech, 2017.
4. Luukanen A. et al. Millimeter-Wave and Terahertz Imaging in Security Applications // *Terahertz Spectroscopy and Imaging*. Springer Series in Optical Sciences. 2012. P. 491–520.
5. Lewis R.A. A review of terahertz sources // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2014. Vol. 47, № 37. P. 374001.
6. Flyagin V.A. et al. The Gyrotron // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
7. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1967. Vol. 10, № 9–10. P. 1414–1453.
8. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The Gyrotron at 50: Historical Overview // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2014. Vol. 35, № 4. P. 325–381.
9. Denisov G.G. et al. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // *Nucl. Fusion*. 2008. Vol. 48, № 5. P. 054007.
10. Glyavin M.Y. et al. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, № 15. P. 153503.
11. Glyavin M.Y., Luchinin A.G. Generation of kW level THz radiation by the gyrotron with pulsed magnetic field // 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. IEEE, 2008. P. 1–2.
12. Sabchevski S.P., Idehara T. Design of a Compact Sub-Terahertz Gyrotron for Spectroscopic Applications // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2010. Vol. 31, № 8. P. 934.
13. Idehara T. et al. Modulation and Stabilization of the Output Power and Frequency of FU Series Gyrotrons. 2016. Vol. 9, № 4. P. 117–130.
14. Jelonnek J. et al. Developments of fusion gyrotrons for W7-X, ITER and EU DEMO: Ongoing activities and future plans of KIT // 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2017. P. 1–3.
15. Temkin R.J. et al. Recent progress at MIT on THz gyrotron oscillators for DNP/NMR // 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2011. P. 1–3.

16. Nusinovich G.S. et al. Development of THz-range Gyrotrons for Detection of Concealed Radioactive Materials // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2011. Vol. 32, № 3. P. 380–402.
17. Read M.E. et al. A THz gyrotron based on a pulse solenoid // 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2009. P. 1–2.
18. Zhao Q. et al. Theoretical Study on a 0.4-THz Second Harmonic Gyrotron // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. Vol. 43, № 5. P. 1688–1693.
19. Сайт компании Bridge 12 [Electronic resource]. 2018. URL: <http://www.bridge12.com>.
20. Комплексы DNP-NMR Bruker-Biospin [Electronic resource]. 2018. URL: <https://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html>.
21. Glyavin M.Y., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100, № 1. P. 015101.
22. Запечалов В.Е. et al. Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения частотой 300 ГГц // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2007. Vol. 50, № 6. P. 461–470.
23. Glyavin M.Y. et al. Stabilization of gyrotron frequency by reflection from nonresonant and resonant loads // *Tech. Phys. Lett.* 2015. Vol. 41, № 7. P. 628–631.
24. Glyavin M.Y. et al. Experimental investigation of powerful THz gyrotrons for initiation of localized gas discharge // *IRMMW-THz 2015 - 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015.

Фокин Андрей Павлович

**СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ
С РЕКОРДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

Автореферат

Подписано к печати 9.10.2018.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ № 71(2018).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46