

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

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

Аспирант: Фокин Андрей Павлович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Глявин Михаил Юрьевич
д.ф.-м.н., доцент, заместитель директора института
по научной работе

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из актуальных задач современной радиофизики является активное продвижение источников излучения в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны. Это вызвано развитием перспективных фундаментальных и практических приложений таких источников, включая, например, электронно-циклотронный нагрев и диагностику плазмы [1], задачи биофизики [2], спектроскопию высокого разрешения [3], визуализацию скрытых объектов [4]. Большинство таких приложений требует не только повышения частоты излучения, но и увеличения выходной мощности создаваемых генераторов. Среди широко применяющихся на практике источников терагерцового 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 характеризуются относительно низким уровнем выходной мощности на уровне десятков милливольт. Терагерцовые ЛСЭ обладают средними мощностями более киловатта, однако размеры, сложность и стоимость этих установок не позволяют использовать их в качестве 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: $\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} ; n\Omega$, 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, частота которой близка к критической. Селективные свойства резонаторов на квазикритических частотах, позволяют существенно увеличить поперечные размеры пространства взаимодействия и тем самым существенно повысить мощность выходного излучения.

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 Массачусетском Технологическом Институте (MIT, США) ведутся разработки гиротронов для спектроскопии и ТГц видения [14]; Университете Мэриленда (UMD, США) для детектирования источников ионизирующего излучения [15], а также в научно-исследовательской компании Calabasas Creek Research (США) [16], Терагерцовом научном центре (THz RC, Чэнду, Китай) [17]. В области компонентов и источников для спектроскопии высокого разрешения созданы коммерческие компании, например, Bridge 12 (США) [18] и подразделение Bruker-Biospin (совместно с Communication & Power Industries, США) [19]. В Институте Прикладной Физики Российской Академии Наук также 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 [20]), так и в гиротронах с непрерывным режимом работы (частота 0.26 ТГц и мощность более 1 кВт [21]).

Специфика приложений обуславливает требования к режимам работы гиротронов, в частности необходимость широкополосной перестройки или стабилизации частоты, возбуждение устойчивой одномодовой генерации при малых токах и/или энергиях электронного пучка, быстрого изменения частоты и мощности излучения. Исходя из требований потребителей, можно выделить несколько направлений дальнейшего развития гиротронов.

К первой группе можно отнести совершенствование ламп с относительно низким уровнем выходной мощности (на уровне сотен Ватт), которые могут найти свою нишу в спектроскопии, медицине, радиоастрономии. Для таких приложений оказывается важным долговременная стабильность параметров излучения, обусловленная как возможностями системы электропитания и системы управления, так и связанная с процессами электронно-волнового взаимодействия. В этой связи актуальной является разработка новых подходов к

проектированию гиротронов, и задача создания быстрых систем контроля и управления параметрами излучения. В качестве примера можно привести использование систем ФАПЧ, давно и успешно зарекомендовавших себя в ЛОВ, но на принципиально другом (несколько порядков) уровне мощности.

Ко второй группе относятся установки с рекордными параметрами по мощности и частоте излучения, предназначенные для задач нагрева плазмы, инициации локализованного газового разряда, и ряда других. В гиротронах данного типа важным является не только обеспечение высокого КПД и большой мощности излучения, но и возможности долговременной работы с параметрами, близкими к предельным. Для этих целей могут использоваться гиротроны с различными магнитными системами, как импульсными, так и криогенными.

Цели диссертации

1. Построение уточненных моделей 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. Исследование гиротронов с рекордным уровнем мощности в субтерагерцовом диапазоне частот.

Научная новизна

1. Теоретически исследовано влияние провисания потенциала и ионной компенсации пространственного заряда на режимы работы гиротрона, исследованы возможности оптимизации гиротронов с учетом неполной ионной компенсации
2. Экспериментально исследована возможность пассивной стабилизации частоты гиротрона за счет использования волны, отраженной от нерезонансной нагрузки
3. Экспериментально продемонстрирована возможность получения узких (вплоть до 10^{-12}) спектральных линий излучения субтерагерцовых гиротронов
4. Получены рекордные значения мощности гиротронов в частотном диапазоне 250 – 670 ГГц.

Практическая значимость работы обусловлена ее направленностью на создание нового класса мощных субтерагерцовых генераторов, а также систем управления и стабилизации параметров излучения. Применение предложенных в данной работе методов и подходов позволит не только создать новые приборы с уникальными характеристиками, но и существенно расширить область применения гиротронов в научных учреждениях, научно-производственных предприятиях и коммерческих проектах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение стабилизации частоты 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 возможно достижение ширины спектра излучения в 1 Гц и долговременной стабильности вплоть до 10^{-12} .
4. В гиротронах со сверхразмерными резонаторами возможна устойчивая одномодовая генерация с мощностью порядка сотен киловатт в диапазоне частот вплоть до 1 ТГц.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах [А1 – А14] 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), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2016, 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 школке-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 – A47] 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 95 страниц, включая 53 иллюстрации, 4 таблицы и список литературы из 103 наименований. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 47 наименований, в том числе 14 статей в реферируемых журналах.

Краткое содержание работы

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 описана аналитическая модель гиротрона, использованная для представленных в работе расчетов. Приведены самосогласованные многомодовые уравнения гиротрона с фиксированной продольной структурой поля, включающие в себя уравнения движения электронов и уравнения возбуждения мод, используемые для анализа нелинейных процессов электронно-волнового взаимодействия.

В п. 1.2. представлены результаты численного моделирования влияния провисания потенциала, связанного с пространственным зарядом электронного пучка [22] на выходные параметры излучения гиротронов со сверхразмерными электродинамическими системами. Рассмотрено изменение рабочих параметров гиротрона, связанное с изменением энергии электронов из-за провисания потенциала и их динамика в процессе ионной компенсации пространственного заряда. Показано существенное изменение режима генерации при наличии падения потенциала, произведен анализ группировки электронов в различных режимах. Предложены пути компенсации снижения эффективности электронно-волнового взаимодействия, в частности, для режима с малым стационарным провисанием потенциала показана возможность восстановления КПД генерации за счет магнитного поля. Для режима с фиксированным током электронного пучка определена требуемая точность расчета стационарного уровня изменения энергии электронов, не превышающая 0.5%, для дальнейшей оптимизации параметров гиротронов. Полученные результаты являются актуальными для проектирования и оптимизации разрабатываемых мощных гиротронов с большими токами.

В п. 1.3 рассматривается возможность стабилизации частоты излучения гиротрона при помощи частичного отражения выходного сигнала от удаленной нерезонансной нагрузки [23]. Приведены результаты экспериментов с гиротронами различных частотных диапазонов (28 ГГц и 231 ГГц), в которых показана возможность стабилизации частоты и уменьшения ширины спектра излучения как минимум в 2 раза за счет отражений. Для эксперимента с низкочастотным гиротроном (28 ГГц) выполнено моделирование полной электродинамической системы, включающей 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.

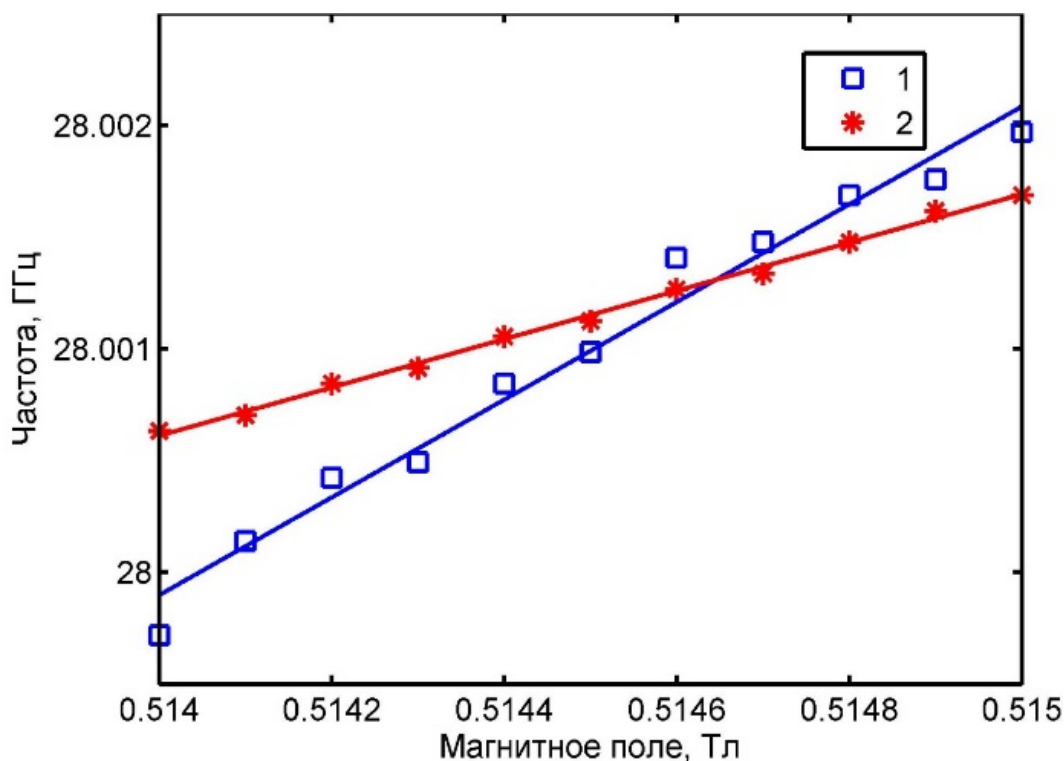


Рис. 1. Зависимость частоты генерации гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц от магнитного поля в случае без отражений (1) и при отражении 8% мощности от нерезонансной нагрузки на расстоянии 20 см от выходного окна гиротрона (2)

Предложена и продемонстрирована в эксперименте возможность плавной перестройки частоты и мощности излучения за счет механического изменения расстояния до подвижного нерезонансного отражателя (фазы отраженного сигнала) в выходном волноводе.

В п. 1.4. обсуждаются возможности быстрого управления параметрами излучения гиротронов при помощи модуляции напряжения на аноде триодной магнетронно-инжекторной пушки с малой межэлектродной емкостью. Выполнено моделирование зависимости частоты излучения от напряжения на аноде и соответствующих параметров электронного пучка. Определены требования к быстродействию системы управления на основании исследования флуктуаций параметров высоковольтных источников питания, имеющих характерные частоты до 100 кГц. В реализованной на основе сделанных расчетов системе управления 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 до 1 мкс. Полученная полоса системы управления позволила провести эксперимент по передаче звукового сигнала при помощи модуляции излучения, что открывает возможности применения гиротронов в задачах связи и телекоммуникаций.

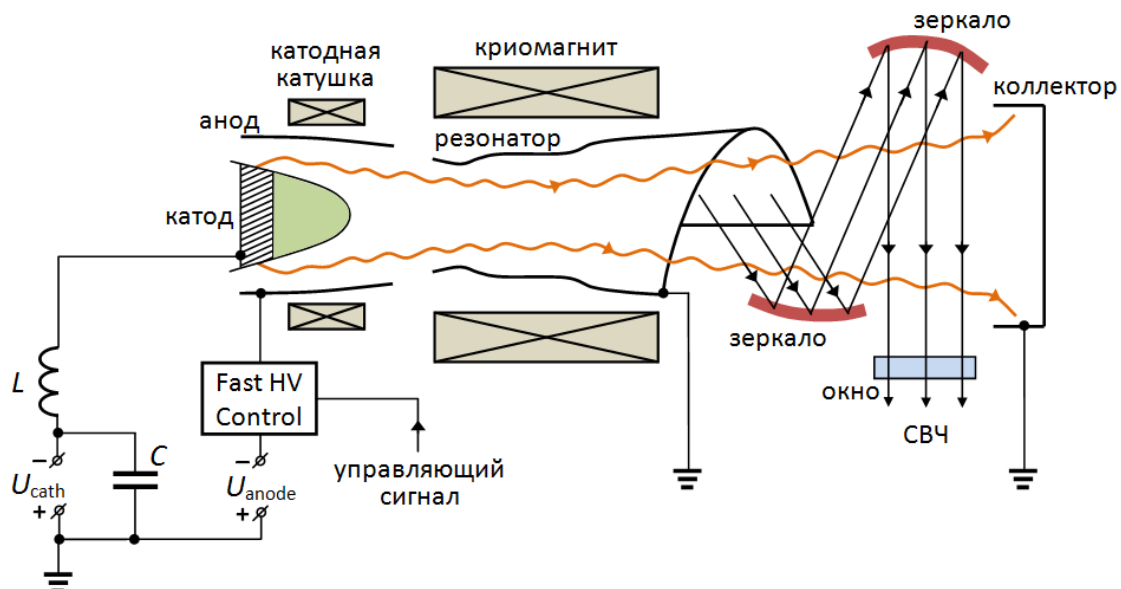


Рис. 2. Схема гиротрона с управлением параметрами излучения за счет изменения напряжения на аноде триодной магнетронно-инжекторной пушки

В п. 1.5. рассмотрена система стабилизации частоты излучения гиротрона на основе цепи фазовой автоподстройки частоты с использованием системы управления, разработанной в п.1.4. В исследуемой схеме 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 равной $4 \cdot 10^{-12}$ при относительной долговременной стабильности до 10^{-12} (определяемой характеристиками опорного генератора). Полученные результаты открывают новые возможности для спектроскопических исследований и позволяют создавать "мастер-генераторы" для обеспечения когерентности большого количества гиротронов.

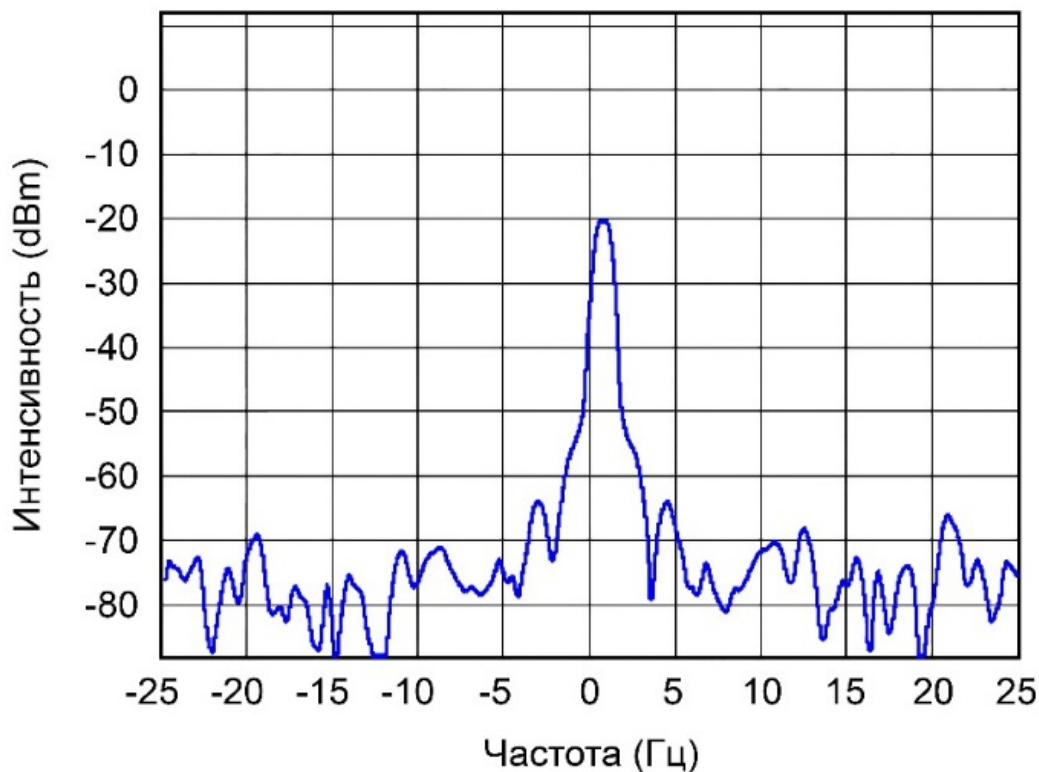


Рис. 3. Спектр выходного излучения гиротрона для спектроскопии с частотой 263 ГГц со стабилизацией частоты при помощи системы фазовой автоподстройки частоты за счет управления анодным напряжением

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 предсказана возможность достижения выходной мощности более 200 кВт в непрерывном режиме. Экспериментально продемонстрирована возможность достижения выходной мощности более 300 кВт на частоте генерации 250 ГГц в импульсном режиме с КПД генерации более 30%. Измерены параметры пучка, сформированного встроенным квазиоптическим преобразователем, показано содержание Гауссова пучка более 98%. В ходе

проведенных экспериментальных исследований получены зависимости мощности от различных параметров, выполнено сравнение с результатами численного моделирования и сделаны выводы о соответствии реальных параметров электронного пучка результатам численного моделирования.

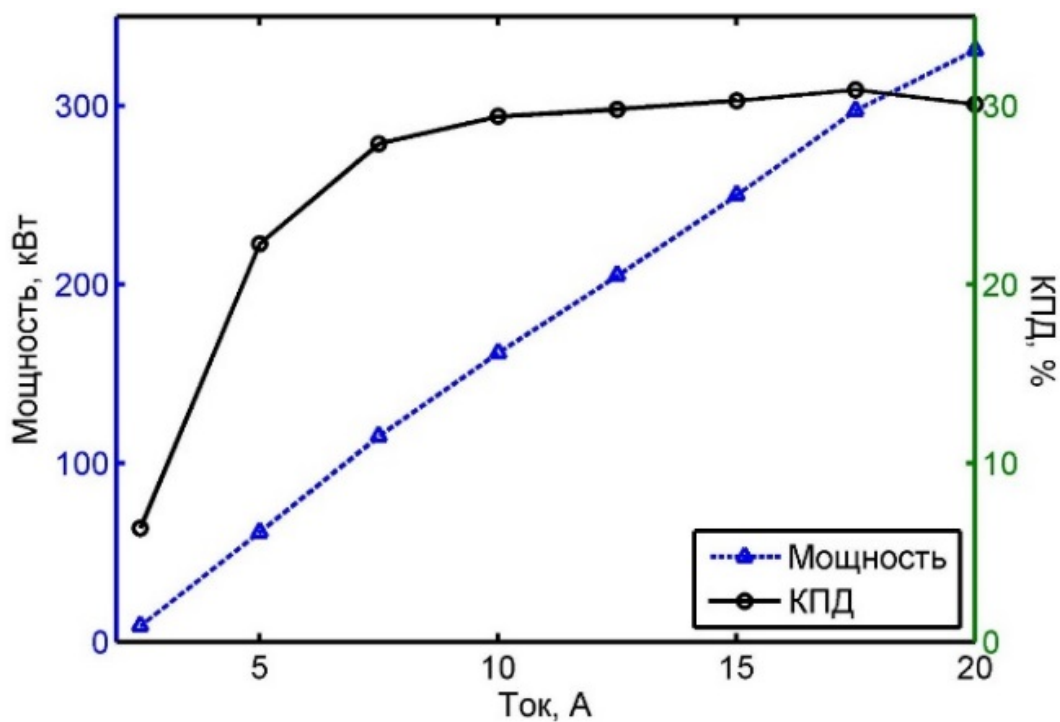


Рис. 4. Зависимость выходной мощности и КПД генерации мощного гиротрона с частотой 250 ГГц от тока электронного пучка при ускоряющем напряжении 55 кВ

В п. 2.2. приводятся результаты долговременного исследования мощного (сотни 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.

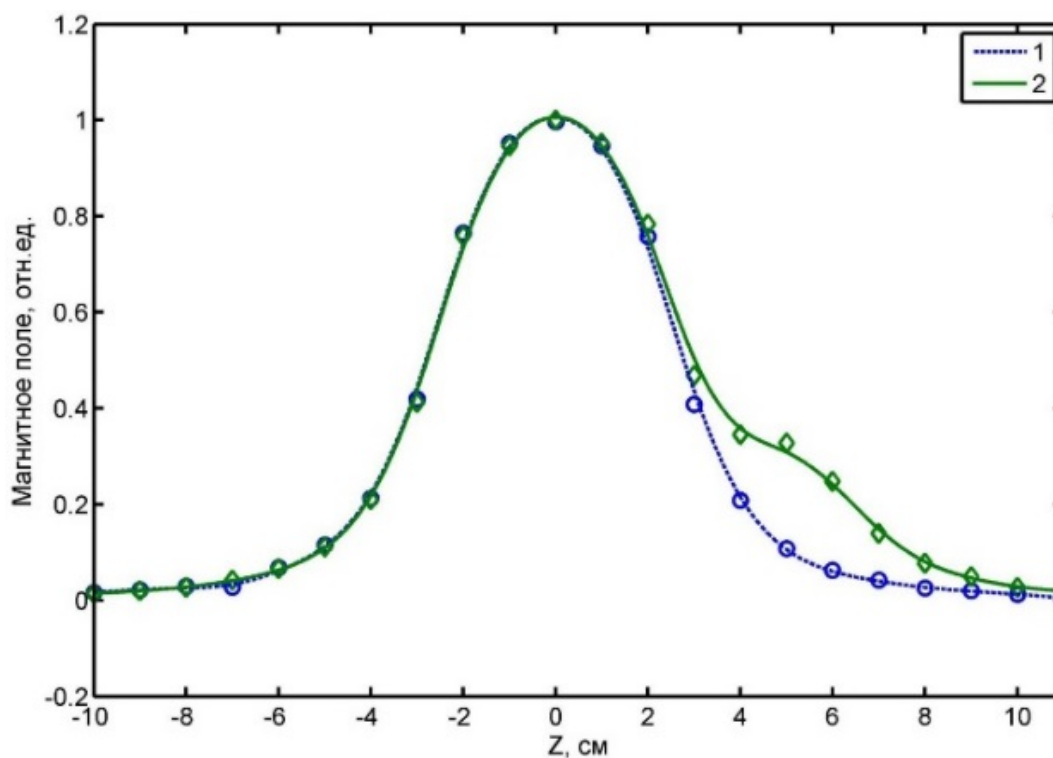


Рис. 4. Профиль магнитного поля исходного импульсного соленоида (1) и модифицированной магнитной системы (2)

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

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. В эксперименте показана возможность модуляции параметров излучения с частотой до 1 МГц.
3. Экспериментально достигнута рекордно узкая линия излучения суб-ТГц генератора при уровне мощности в сотни Ватт. Впервые в мире в гиротронах получена ширина спектра в 1 Гц при долговременной стабильности до 10-12, что открывает новые возможности для спектроскопических исследований и позволяет создавать "мастер-генераторы" для обеспечения когерентности большого количества гиротронов.

4. Продемонстрированы возможности 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. Реализован гиротронный комплекс на основе гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц и мощностью 200 кВт для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда, позволивший получить рекордную мощность ЭУФ

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 терагерцовых 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 терагерцового 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 терагерцового 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 263GHz/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. PP(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. 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

A16. Глявин М.Ю., и др. Разработка микроволнового комплекса для медико-биологических исследований // Материалы 16 Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. 2015. Саратов. С.77

A17. 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». 2015. Москва, НИЯУ МИФИ. С.224-225

A18. Фокин А.П., Глявин М.Ю. Влияние провисания потенциала пучка на КПД гиротрона // 20 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). 2015. Нижний Новгород. С. 64-65

A19. 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

A20. 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

A21. 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

A22. 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

A23. 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

A24. 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

A25. 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. 2016. Нижний Новгород, С. 75-76

A26. 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. 2016. Нижний Новгород. С. 152-153

A27. Фокин А.П. Устойчивость одномодовых колебаний в гиротронах на второй гармонике гирочастоты с симметричными рабочими модами // 21 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). 2016. Нижний Новгород. С. 38-39

A28. 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. 2016. Санкт-Петербург. С. 140-142

A29. 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. 2016. Nizhny Novgorod

A30. 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. 2016. Nizhny Novgorod

A31. Бакунин В. Л., Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Материалы 26-й Международной Крымской конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2016. Севастополь.

A32. 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

A33. 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". 2016. Саратов. С. 40-41

A34. 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

A35. Богдашов А.А. и др. Влияние слабого отражения от нерезонансной нагрузки на режимы генерации технологического гиротрона // 22 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). 2017. Нижний Новгород. С. 87-88

A36. 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. 2017. Санкт Петербург. С. 490-492
- A37. Глявин М.Ю. и др. Компактные электронные ТГц мазеры с рекордными характеристиками // Сборник статей VI Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Санкт Петербург. С. 227-231
- A38. 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.
- A39. 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.
- A40. Vodopyanov A.V. et al. High rate production of nanopowders by the evaporation – condensation method using gyrotron radiation // EPJ Web of Conferences. 2017. T. 149. 02022
- A41. Sidorov A.V. et al. Gas breakdown by a focused beam of THz waves // EPJ Web of Conferences. 2017. T. 149. 02031
- A42. Novozhilova Yu.V. et al. Influence of mode competition and external wave frequency modulation on gyrotron frequency locking // EPJ Web of Conferences. 2017. T. 149. 04021
- A43. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 263 GHz continuous wave gyrotron // EPJ Web of Conferences. 2017. T. 149. 04022
- A44. 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. T. 149. 04037
- A45. 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
- A46. Богдашов А.А. и др. Управление параметрами излучения гиротронов для микроволновой обработки материалов и спектроскопии // Материалы конференции «27-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 2017. Севастополь. Т. 1. С. 276-282
- 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

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Granucci G. и др. Conceptual design of the EU DEMO EC-system: main developments and R&D achievements // Nucl. Fusion. 2017. Т. 57, № 11. С. 116009.
2. Weightman P. Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation // Phys. Biol. 2012. Т. 9, № 5. С. 53001.
3. Ghann W., Uddin J. Terahertz (THz) Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology // Terahertz Spectroscopy - A Cutting Edge Technology / под ред. Uddin J. InTech, 2017.
4. Luukanen A. и др. Millimeter-Wave and Terahertz Imaging in Security Applications // Terahertz Spectroscopy and Imaging. Springer Series in Optical Sciences. 2012. С. 491–520.
5. Lewis R.A. A review of terahertz sources // J. Phys. D. Appl. Phys. 2014. Т. 47, № 37. С. 374001.
6. Flyagin V.A. и др. The Gyrotron // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. Т. 25, № 6. С. 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. Т. 10, № 9–10. С. 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. Т. 35, № 4. С. 325–381.
9. Denisov G.G. и др. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // Nucl. Fusion. 2008. Т. 48, № 5. С. 54007.
10. Glyavin M.Y. и др. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett. 2012. Т. 101, № 15. С. 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. С. 1–2.
12. Sabchevski S.P., Idehara T. Design of a Compact Sub-Terahertz Gyrotron for Spectroscopic Applications // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2010. Т. 31, № 8. С. 934.
13. Idehara T. и др. Modulation and Stabilization of the Output Power and Frequency of FU Series Gyrotrons. 2016. Т. 9, № 4. С. 117–130.
14. Temkin R.J. и др. Recent progress at MIT on THz gyrotron oscillators for DNP/NMR // 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2011. С. 1–3.
15. Nusinovich G.S. и др. Development of THz-range Gyrotrons for Detection of Concealed Radioactive Materials // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2011. Т. 32, № 3. С. 380–402.
16. Read M.E. и др. A THz gyrotron based on a pulse solenoid // 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2009. С. 1–2.

17. Zhao Q. и др. Theoretical Study on a 0.4-THz Second Harmonic Gyrotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Т. 43, № 5. С. 1688–1693.
18. Сайт компании Bridge 12 [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://www.bridge12.com>.
19. Комплексы DNP-NMR Bruker-Biospin [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html>.
20. 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. Т. 100, № 1. С. 15101.
21. Glyavin M.Y. и др. Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media // Rev. Sci. Instrum. 2015. Т. 86, № 5. С. 54705.
22. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Нижний Новгород,: ИПФ РАН, 2012. 576 с.
23. Glyavin M.Y. и др. Stabilization of gyrotron frequency by reflection from nonresonant and resonant loads // Tech. Phys. Lett. 2015. Т. 41, № 7. С. 628–631.
24. Glyavin M.Y. и др. 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.