



На правах рукописи

ЗУЕВ Андрей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ
ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИРОТРОНОВ**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Запевалов Владимир Евгеньевич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Галдецкий Анатолий Васильевич, кандидат физико-математических наук, начальник отделения АО «НПП „Исток“ им. А.И. Шокина» (г. Фрязино, Московская область)

Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» (г. Саратов)

Ведущая организация: ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Защита состоится «19» февраля 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН ipfran.ru.

Автореферат разослан «15» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время, в связи с потребностями целого ряда приложений, усилился интерес к разработке субтерагерцовых и терагерцовых источников непрерывного электромагнитного излучения с уровнем мощности от десятка ватт до сотен киловатт [1–6]. Одним из перспективных источников с требуемыми характеристиками является прибор высокочастотной вакуумной электроники больших мощностей — гиротрон [7–11].

Гиротрон — мощный источник (генератор или усилитель) излучения в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, основанный на магнитотормозном излучении электронов, движущихся по винтовым траекториям. Гиротрон содержит магнетронно-инжекторную пушку, резонатор, коллекторную систему, систему вывода излучения и выходное окно. Каноническая схема гиротрона изображена на рисунке 1. Винтовой электронный пучок (ВЭП) в гиротроне сначала формируется под действием скрещенных статических магнитного и электрического полей в системе катод-анод. Далее при адиабатическом движении в плавно нарастающем магнитном поле происходит компрессия электронного пучка, что приводит к увеличению доли вращательной энергии электронов. Взаимодействие электронного пучка с высокочастотными полями одной или нескольких собственных мод резонатора происходит в области однородного участка магнитного поля соленоида. Электроны, отдавшие часть своей энергии высокочастотному полю, далее движутся в спадающем магнитном поле и оседают на коллекторе, в котором распределение магнитного поля и профиль поверхности подобраны с учётом допустимой тепловой нагрузки. Выходящее из резонатора излучение обычно преобразуется в волновой пучок при помощи системы профилированных зеркал и выводится через выходное окно.

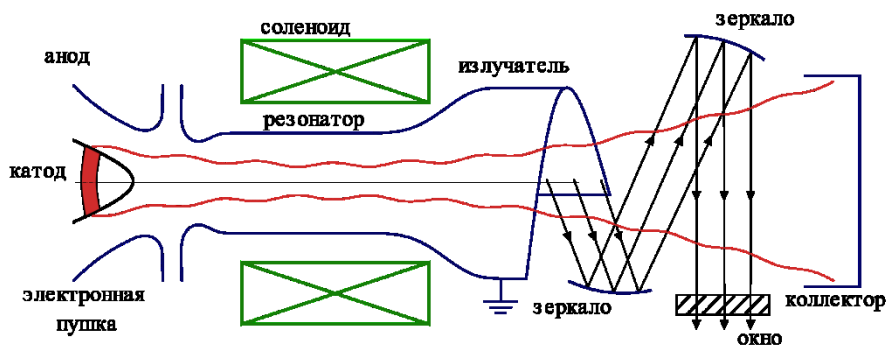


Рис. 1. Схема гиротрона

Взаимодействие ВЭП в слабoreлятивистских гиротронах происходит с магнитными модами — ТЕ [10, 12]. Резонатор гиротрона представляет собой набор отрезков слабонерегулярных волноводов кругового сечения, поэтому для описания собственных колебаний в резонаторе гиротрона обычно используются магнитные моды такого волновода ТЕ_{*m,p,q*}. Индексы *m*, *p* определяют (азимутальную и радиальную) структуру моды в резонаторе гиротрона. В большинстве случаев гиротрон работает на первой продольной моде: *q* = 1, при этом продольный индекс *q* часто опускается. Условие синхронизма (циклотронного резонанса) между электронами и излучением в гиротроне имеет вид

$$\omega \approx n\omega_H + \kappa_{\parallel}v_{\parallel}, \quad (1)$$

где ω — частота выходного излучения, $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер гармоники гирочастоты, синхронной с электромагнитной волной, $\omega_H = e_0 B_0 / \gamma m_0$ — релятивистская циклотронная частота электрона, B_0 — магнитная индукция поля в пространстве взаимодействия, e_0 и m_0 — заряд и масса покоя электрона, $\gamma = 1 + e_0 U_0 / m_0 c^2$ — лоренц-фактор, U_0 — ускоряющее напряжение, c — скорость света, κ_{\parallel} — продольное (в направлении постоянного магнитного поля) волновое число, v_{\parallel} — продольная скорость электронов. Как правило, гиротроны работают на квазикритической частоте с минимальным числом продольных вариаций ВЧ-поля ($\kappa_{\parallel} \ll \omega/c$), что снижает влияние разброса осцилляторных скоростей электронного пучка на эффективность работы прибора.

В настоящее время выделяются два основных направления развития гиротронов: увеличение мощности выходного излучения [13–15] и продвижение в терагерцовый диапазон [16–21]. Субтерагерцовые гиротроны мегаваттного уровня мощности активно используются в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием плазмы [13] для электронно-циклотронного нагрева, управления током, подавления неустойчивости и активной диагностики плазмы. С другой стороны, источники терагерцового излучения требуются, например, в спектроскопии высокого разрешения, для диагностики различных сред, в медицинских и биологических приложениях. Мощное импульсное ТГц-излучение применяется для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения [22], для создания «точечных» источников ультрафиолетового излучения [23].

Для некоторых приложений важным фактором является контроль частоты выходящего излучения с возможностью плавной перестройки этой частоты. Например, частотно-перестраиваемые источники излучения активно используются в микроволновой и ядерной магниторезонансной (ЯМР) спектроскопии для динамической поляризации ядер (ДПЯ), что позволяет значительно повысить чувствительность измерений и уменьшить время, необходимое для накопления информации [24–26]. В задачах по диагностике плазмы источники, перестраиваемые в широком интервале частот, позволяют оперативно получить информацию о слоях плазмы разной плотности [27, 28].

В субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах гиротроны на порядки превосходят по уровню мощности другие электронные приборы и для ряда приложений не имеют альтернативных решений. Даже сравнительно мало-мощные терагерцовые гиротроны на гармониках гирочастоты имеют достаточную мощность выходного излучения для большинства спектроскопических приложений. Таким образом, всякое продвижение гиротронов вверх по частоте, эффективности и выходной мощности является востребованным.

К настоящему времени предложено и исследовано большое количество различных способов увеличения диапазона перестройки и повышения рабочей частоты, но, тем не менее, возможности гиротронов далеко не исчерпаны. Таким образом, поиск и исследование перспективных методов расширения частотных возможностей гиротронных комплексов представляется одним из наиболее актуальных направлений их развития.

Подавляющее большинство промышленно выпускаемых гиротронов имеют канонический вид, показанный на рисунке 1, но всё большее развитие приобретают неканонические гиротроны [29]. Причиной этому, с одной стороны, является недостаточность методов селекции, обычно используемых в канонических гиротронах. С другой стороны, уникальные свойства неканонических гиротронов существенно расширяют возможности приборов гиротронного типа и открывают новые перспективы для вакуумной электроники.

Цели и задачи исследования

Цель работы состоит в исследовании методов управления частотными характеристиками гиротронных комплексов: анализе перспективности и разработки ряда гироприборов с дискретной и плавной перестройкой частоты; исследовании перспективных методов селекции и повышения эффективности гиротронов терагерцового диапазона. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка двух вариантов многочастотных субтерагерцовых канонических гиротронов с мощностью выходного излучения до 200 Вт и до 200 кВт с целью выявления специфики работы частотно-перестраиваемых гиротронов с кардинально отличающимся уровнем мощности.
2. Исследование перспективности введения селективного отражения в электродинамическую систему гиротрона, работающего на высокой гармонике гирочастоты, для решения проблемы конкуренции с модой на основном циклотронном резонансе.
3. Анализ специфики влияния омических потерь на процессы взаимодействия мод и эффективность работы гиротрона в разных частотных диапазонах. Исследование возможности понижения доли омической добротности за счёт выбора материала и технологии изготовления резонатора гиротрона и его температурного режима.

4. Исследование перспективности введения специальной локальной неоднородности, расположенной на выходном конце резонатора терагерцового гиротрона, для снижения чувствительности режима генерации к небольшим возмущениям заданной конфигурации резонатора.
5. Разработка перспективных схем многоствольных гиротронов для перестройки и повышения рабочей частоты.

Методы исследования

Для оптимизации конфигураций резонаторов рассматриваемых гиротронов и расчёта электронно-волнового взаимодействия применялся широкий диапазон моделей, которые отличаются степенью детализации и учёта различных факторов. Большинство используемых расчётных моделей реализованы в комплексе программ «ANGEL» [A1, A2]. С целью определения электродинамических параметров решалась электродинамическая задача без учёта влияния электронного пучка — так называемая «холодная задача». Для анализа условий самовозбуждения рабочей моды и оценки возможности возбуждения паразитных мод рассчитывались стартовые токи выбранной рабочей моды и соседних паразитных мод. Эффективность электронно-волнового взаимодействия и мощность выходного излучения находилась в рамках стационарной самосогласованной модели, учитывающей нефиксированность продольной структуры ВЧ-поля в резонаторе гиротрона, неоднородность статического магнитного поля, разброс осцилляторных скоростей электронов и разброс ведущих центров электронных траекторий. Для анализа сценариев включения и конкуренции мод использовались нестационарные модели.

Траекторный анализ электронно-оптических систем выполнен в программах «ANGEL-TA-S2D» и «ANGEL-TA-S3D», учитывающих аксиально-симметричную и аксиально-несимметричную эмиссию электронов соответственно. Реализованный в программах алгоритм заключается в итерационном решении уравнения Пуассона методом дискретных источников совместно с методом трубок тока.

Применимость используемых численных моделей неоднократно подтверждалась результатами экспериментальных измерений гиротронных комплексов, разработанных и испытанных в ИПФ РАН и ЗАО НПП «Гиком». Эксперименты проводились в разных частотных диапазонах с гиротронами, как с осевым выводом мощности на рабочей моде [A3], так и с встроенным преобразователем [A4], с поперечным выводом мощности в виде волнового пучка. Соответственно, использовались либо магнитные системы с масляным охлаждением, либо криомагниты. Высоковольтные источники работали как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Использовалась методика измерения мощности и частоты выходного излучения, хорошо отработанная в экспериментах с гиротронами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Научная новизна

Все результаты диссертационной работы получены впервые, в частности:

1. Спроектированы два варианта новых частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с триодной магнетронно-инжекторной пушкой (МИП) и со сверхразмерными резонаторами, существенно (на три порядка) отличающихся уровнем мощности выходного излучения. Проанализированы особенности маломощного низковольтного частотно-перестраиваемого гиротрона, предназначенного для использования в и других приложениях, с интервалом частот 0,20–0,27 ТГц и мощностью выходного излучения 200 Вт. Предложен вариант мощного частотно-перестраиваемого гиротрона для работы в широком интервале частот (0,1–0,26 ТГц) с выходной мощностью от 120 кВт до 260 кВт, спроектированный с учётом ограничений, налагаемых магнитной системой. Выявлены основные особенности частотно-перестраиваемых гиротронов с существенно разным уровнем выходной мощности.
2. Экспериментально продемонстрирована возможность дискретной перестройки частоты гиротрона почти на октаву в интервале 130–250 ГГц с уровнем мощности более 35 кВт. Результаты экспериментов сопоставлены с данными численного моделирования и имеет место их хорошее взаимное соответствие.
3. Экспериментально продемонстрирована возможность селективного возбуждения мод на высоких циклотронных гармониках за счёт использования отражённого сигнала. Получены высокие значения КПД (8%) и мощности (3 кВт) на частоте 40,5 ГГц при работе на третьей циклотронной гармонике.
4. Для повышения эффективности гироприбора и селекции мод предложены новые способы понижения доли омических потерь в терагерцовых гиротронах: выбор материала и технологии изготовления резонатора, охлаждение резонатора до криогенных температур.
5. Показано, что введение специальной локальной неоднородности позволяет в некоторой мере скомпенсировать изменение добротности резонатора гиротрона, обусловленное возникающей в процессе изготовления небольшой конусностью регулярной части резонатора. Предлагаемый подход рассмотрен на примере гиротрона с мощностью выходного излучения десятки ватт на частоте 527 ГГц, предназначенного для спектроскопических приложений.
6. Предложена новая схема многолучевого многоствольного гиротрона. Рассмотрены перспективные варианты построения многоствольного гиротрона для задач по перестройке и повышению рабочей частоты.
7. Показана возможность реализации многоствольного гиротрона с практически плавной перестройкой в интервале 133,2–146,3 ГГц с уровнем мощности выходного излучения десятки ватт.

- Предложен перспективный вариант многоствольного гиротрона с одновременной многочастотной генерацией на востребованных в ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения частотах: 263, 395 и 527 ГГц.

Научная и практическая значимость работы

В работе подробно описана методика разработки частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с разным уровнем мощности выходного излучения. Указаны основные принципы реализации ступенчатой перестройки частоты в гиротронах. Выполнена экспериментальная верификация метода ступенчатой перестройки частоты на базе имеющегося в ИПФ РАН гиротронного комплекса. Полученные результаты упрощают создание частотно-перестраиваемых гиротронов с уникальными характеристиками.

Перспективным методом селекции мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками, является введение в систему селективного отражателя. В результате численного моделирования и экспериментальных исследований продемонстрирована эффективность данного подхода на примере гиротрона, работающего на третьей циклотронной гармонике. Кроме того, было показано, что введение локальной неоднородности, расположенной на выходе из резонатора гиротрона, позволяет скомпенсировать изменение добротности этого резонатора, обусловленное возникающей в процессе его изготовления небольшой конусностью.

Другой подход был использован для решения проблемы падения омической добротности с ростом частоты. Этот подход заключается в использовании криогенно охлаждаемых резонаторов при создании гиротронов терагерцового диапазона, и он также показал свою потенциальную эффективность в повышении КПД гиротрона и улучшении селективных свойств мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками.

В работе исследуется перспективность нового типа неканонического гироприбора — многоствольного гиротрона. Многоствольные гиротроны пока ещё являются новыми, и соответственно не в достаточной мере освоенными приборами, но, вместе с этим, они имеют свои уникальные преимущества и перспективы для ряда важных приложений.

Проведенные исследования способствуют созданию нового поколения гироприборов для широкого спектра научных и технических приложений.

Основные положения, выносимые на защиту:

- В мощных субтерагерцовых гиротронах, работающих на основном циклотронном резонансе, возможна широкополосная дискретная перестройка частоты более чем на одну октаву (0,1–0,26 ТГц) при сохранении эффективности на уровне оптимизированных одночастотных гиротронов.

2. Использование селективного отражателя в гиротронах позволяет реализовать одномодовый режим генерации на высоких циклотронных гармониках в условиях конкуренции с модой на основном циклотронном резонансе.

3. Снижение омических потерь в резонаторах субтерагерцовых гиротронов путем их охлаждения до криогенных температур позволяет улучшить условия селекции рабочих мод и повысить эффективность и мощность выходного излучения.

4. В многоствольных гиротронах с электродинамической системой в виде нескольких резонаторов, размещенных в корпусе одного магнита, возможно существенное расширение диапазона плавной перестройки частоты по сравнению с традиционными однорезонаторными гиротронами.

5. Концепция многоствольного гиротрона дает возможность реализовать одновременную многочастотную генерацию излучения на различных циклотронных гармониках.

Апробация результатов работы и публикации

Результаты работы представлялись на следующих конференциях, семинарах, научных школах:

— 19-я, 20-я, 21-я, 22-я научные конференции по радиофизике (Нижний Новгород, ННГУ, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.);

— X, XI, XII всероссийские семинары по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2016, 2019, 2022 гг.);

— 28th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons (Nizhniy Novgorod, 2016);

— V, VII, IX, X всероссийские научно-технические конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2016, 2018, 2021, 2022 гг.);

— XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, СГУ, 2018 г.);

— 3rd International Conference Terahertz and Microwaves Radiation: Generation, Detection and Application (TERA-2018), Nizhniy Novgorod, October 22–25, 2018;

— научно-техническая конференция «Мощные вакуумные СВЧ приборы — 2019» (Москва, АО «НПП» Торий, 22–23 мая 2019 г.);

— 29, 30-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Крымико (Севастополь, СевГУ, 2019, 2020 гг.);

— 7-я всероссийская микроволновая конференция (Москва, ИПЭ, 25–27 ноября 2020);

— the 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz, August 29 – September 3, 2021);

— Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS, 21–25 Nov. 2021);

— XX, XXI Международная конференция и молодежная школа «Математи-

ческое моделирование и суперкомпьютерные технологии» (г. Нижний Новгород, ННГУ, 2020, 2021 гг.)

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (№ 15-42-02380 р_поволжье_a, 16-32-00166 мол_a, 19-02-00832 А, 18-32-00772 мол_a), грантами РНФ (№ 17-79-10422, 19-72-10127, 19-79-30071), грантом президента РФ (МК-3413.2021.1.2).

По теме диссертации опубликовано 56 работ, из них 12 статей в рецензируемых журналах [A1–A12], 7 статей в сборниках трудов конференций, 36 тезисов докладов, 1 патент [A13].

Личный вклад автора в проведённые исследования

Все результаты, включенные в диссертационную работу и вошедшие в работы, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

Проектирование электронно-оптических систем для частотно-перестраиваемых гиротронов, описанных в первой и третьей главах, проведено совместно с О. П. Планкиным и Е. С. Семеновым.

Измерения широкополосной дискретной перестройки частоты на базе мощного субтерагерцового гиротрона выполнены совместно с А. П. Фокиным.

Измерения по возбуждению моды, синхронной с третьей циклотронной гармоникой, с частотой генерации 40,5 ГГц, выполнены совместно с А. П. Фокиным и А. С. Седовым.

Исследования отражательных способностей различных материалов в широком интервале частот и температур при помощи резонансного спектрометра [30] выполнены В. В. Паршиным и Е. А. Серовым.

Вклад остальных соавторов в публикациях, выполненных совместно и приведенных в списке трудов автора, состоит в получении результатов, не включенных в диссертационную работу.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка часто используемых обозначений, списка используемых сокращений, списка литературы, списка публикаций автора по теме диссертации и приложения А. Общий объём диссертационной работы 162 страницы, включая 82 рисунка, 21 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы её цели, научная новизна, приведены результаты и положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора, структуре работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена разработке субтерагерцовых многочастотных гиротронов существенно разной мощности с возможностью дискретной перестройки частоты [A4–A6]. Гиротроны спроектированы для существующего в ИПФ РАН гиротронного комплекса на основе криомагнита JASTEC-10T100, имеющего максимальное магнитное поле 10 Тл и проходное отверстие диаметром 100 мм. В первом параграфе главы описаны основные принципы реализации дискретной (ступенчатой) перестройки частоты в субтерагерцовых гиротронах.

В параграфе 1.2 рассмотрен проект сравнительно маломощного частотно-перестраиваемого гиротрона со сверхразмерным резонатором, предназначенного для использования в спектроскопии и других приложениях, с интервалом частот 0,20–0,27 ТГц и мощностью выходного излучения около 200 Вт. Исследована возможность широкополосной перестройки частоты генерируемого излучения при помощи возбуждения последовательности мод с близкой каустикой посредством изменения магнитного поля и возможность плавной перестройки путем возбуждения мод с большим числом продольных вариаций. С целью увеличения диапазона плавной перестройки частоты проанализирована возможность перестройки при помощи контролируемого изменения температуры резонатора. Обсуждаются специфические черты электронно-оптической системы гиротрона и возможность повышения эффективности прибора с использованием одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронного пучка.

В параграфе 1.3 подробно рассматривается возможность реализации частотного-перестраиваемого гиротрона высокой мощности, работающего на 27 поперечных модах в диапазоне частот 97–261 ГГц. Для большинства рабочих мод мощность выходного излучения превысила 200 кВт. Проведён комбинированный анализ и совместная оптимизация электронно-оптической и электродинамической систем. Выполнен анализ эффективности одноступенчатой рекуперации в такой системе. Предложена оптимизированная коллекторная система для работы гиротрона во всём указанном диапазоне частот. Средняя тепловая нагрузка на стенки коллектора без рекуперации составила около 0,5 кВт/см² и 0,3 кВт/см² с рекуперацией.

В параграфе 1.4 представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований широкополосной, практически октавной, дискретной перестройки частоты в прототипе мощного субтерагерцового гиротрона, предназначенного для нагрева плазмы и ее диагностики (коллективного томсоновского рассеяния) в перспективных установках управляемого

ядерного синтеза [A4]. Рассмотрены ограничения, налагаемые электронно-оптической системой и системой вывода излучения; исследованы возможности управления параметрами электронного пучка за счет коррекции магнитного поля вблизи катода. Определены рабочие моды гиротрона и соответствующие им параметры электронно-оптической и магнитной систем. В экспериментах с дополнительной корректирующей катодной катушкой с максимальным полем 0,03 Тл продемонстрировано возбуждение десяти мод в частотном интервале 133–250 ГГц с мощностью от 35 до 200 кВт (рисунок 2).

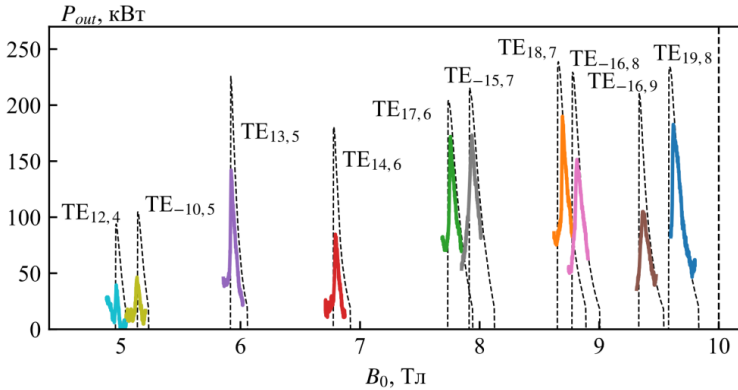


Рис. 2. Измеренная мощность выходного излучения в зависимости от магнитного поля при работе на выбранных модах (сплошные линии) и результаты численного моделирования (пунктирные линии)

Во **второй главе** рассмотрены перспективные методы дополнительной селекции мод в гиротронах при работе на высоких циклотронных гармониках [A3, A7–A9]. В частности, в параграфе 2.1 представлены результаты экспериментальных исследований по возбуждению в непрерывном гиротроне моды на третьей циклотронной гармонике с помощью селективной обратной связи за счет отражений [A3]. Селективное отражение выходного сигнала реализовано путём изменения толщины выходного окна. В ходе экспериментов продемонстрирована устойчивая генерация при работе на третьей циклотронной гармонике на частоте 40,5 ГГц с мощностью выходного излучения 3 кВт и КПД 8% (рисунок 3). Данный подход легко масштабируется при укорочении длины волны и может быть успешно применён в гиротронах других диапазонов, в частности, может быть использован в W-диапазоне [A7].

В следующем параграфе второй главы анализируются возможности уменьшения влияния возмущения регулярного участка резонатора (слабой конусности) на выходные характеристики гиротрона при помощи введения небольшой по размеру неоднородности в конце регулярного участка резонатора. Введение локальной неоднородности позволяет скомпенсировать возможное изменение добротности резонатора и снизить чувствительность ре-

жима работы терагерцового гиротрона к возникшим при изготовлении небольшим погрешностям регулярного участка резонатора [A8]. Анализ выполнен на примере разработанного в ИПФ РАН терагерцового гиротрона с частотой генерации 0,527 ТГц, предназначенного для спектроскопических задач.

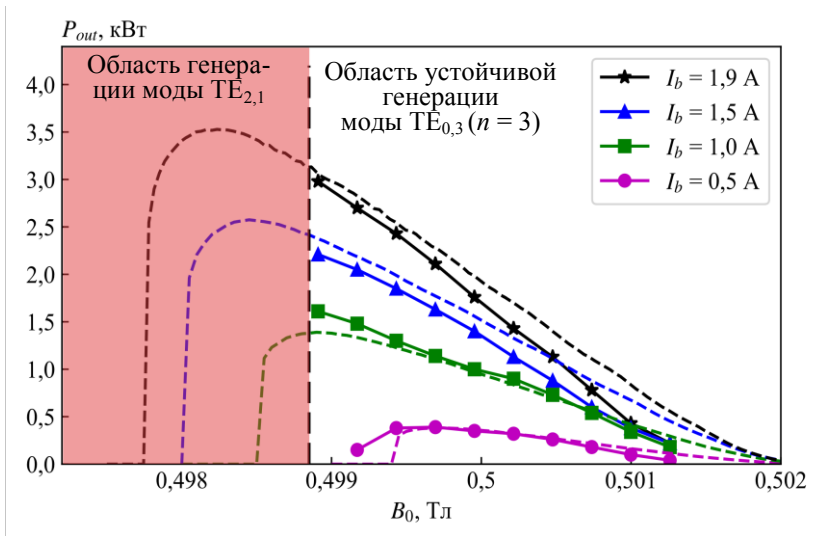


Рис. 3. Зависимость мощности выходного излучения при работе на частоте 40,5 ГГц от магнитного поля (пунктирные линии — расчётные данные, сплошные — результаты эксперимента) при токе пучка $I_b = 0,5 \text{ А}$ (круги), 1 А (квадраты), 1,5 А (треугольники) и 1,9 А (звёзды)

В последнем параграфе исследуется специфика работы гиротронов в терагерцовом диапазоне при работе на модах, синхронных с высокими циклотронными гармониками, в условиях нарастания омических потерь. Как показали исследования, характерная для таких приборов высокая доля омических потерь в резонаторе не только ограничивает мощность выходного излучения и коэффициент полезного действия гиротрона, но и влияет на устойчивость его рабочего режима [A9]. Рассмотрена возможность ослабления этих нежелательных эффектов путём снижения доли омических потерь за счёт выбора материала, технологии изготовления резонатора и температурного режима. Для анализа перспективности снижения доли омических потерь при помощи охлаждения резонатора вплоть до криогенных (азотных) температур использованы результаты экспериментального исследования отражательной способности различных металлов [31]. Основные результаты расчётов для гиротрона с рабочей частотой 0,5 ТГц представлены на рисунке 4. Данный метод позволяет не только значительно повысить КПД терагерцовых гиротронов, но и способствует повышению устойчивости одномодового режима генерации.

В третьей главе предложена новая схема гирорезонансного прибора — многоствольный гиротрон (МСГ) [A10–A13]. Пример схемы построения МСГ показан на рисунке 5. Простейшая схема многоствольного гиротрона включает преимущества как канонического гиротрона (адиабатическая система формирования винтовых электронных пучков), так и гиротрона с приосевым пучком (эффективная селекция мод, синхронных с высокими гармониками гирочастоты) и привлекательна для приложений с требованием умеренного уровня мощности. Этот прибор позволяет значительно расширить частотные возможности гиротронов и существенно снизить стоимость системы по сравнению с набором гиротронов с аналогичными выходными характеристиками.

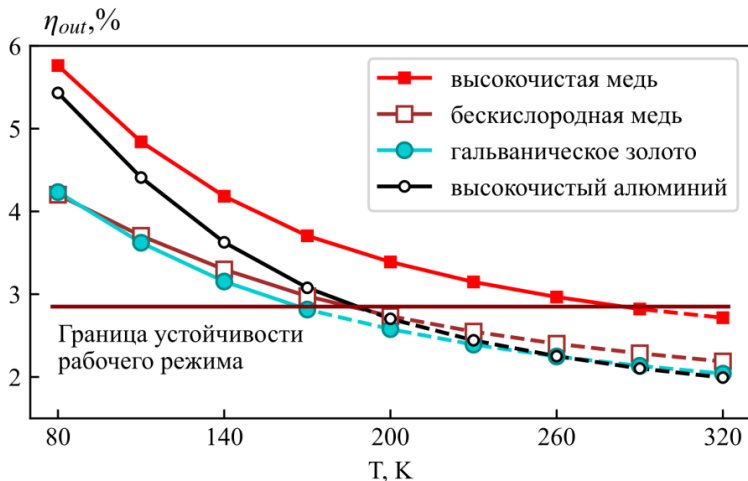


Рис. 4. Расчетные температурные зависимости КПД для гиротрона с рабочей частотой 0,5 ТГц (заполненные квадраты — высокочистая медь, полые квадраты — стандартная бескислородная медь, заполненные круги — гальваническое золото, полые круги — высокочистый алюминий)

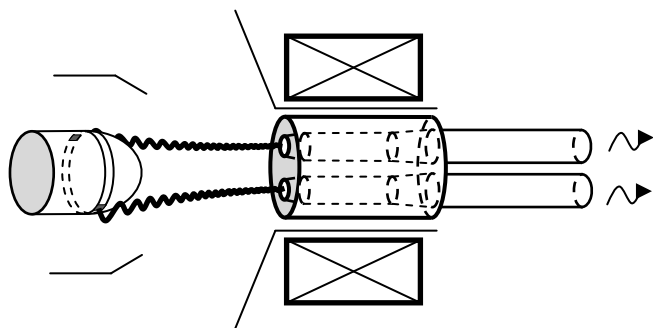


Рис. 5. Схема построения многоствольного гиротрона с двумя стволами

В параграфе 3.1 описан принцип работы перспективного варианта многоствольного гиротрона, а в 3.2 — особенности простого варианта электронно-оптической системы МСГ. В пункте 3.2.1 приведены исследования влияния азимутального дрейфа электронного пучка на работу гиротрона как в стационарном режиме с одночастотной устойчивой генерацией, так и во время процессов включения/выключения гиротронной установки. В пункте 3.2.2 рассматриваются особенности предложенной схемы формирования нескольких тонких винтовых электронных пучков на примере модификаций магнетронно-инжекторных пушек, оптимизированных для работы гиротрона на частоте 140 ГГц.

В параграфе 3.3 рассмотрены перспективные варианты построения многоствольного гиротрона. В пункте 3.3.1 рассматривается вариант многоствольного гиротрона с плавной перестройкой 13,1 ГГц с центральной частотой около 140 ГГц (рисунок 6). В следующем пункте рассмотрен вариант частотно-перестраиваемого многоствольного гиротрона с «изолированными» электронными пучками. В пункте 3.3.3 показана возможность работы многоствольного гиротрона на третьей циклотронной гармонике с суммарной мощностью выходного излучения более 1 кВт на частоте 448 ГГц.

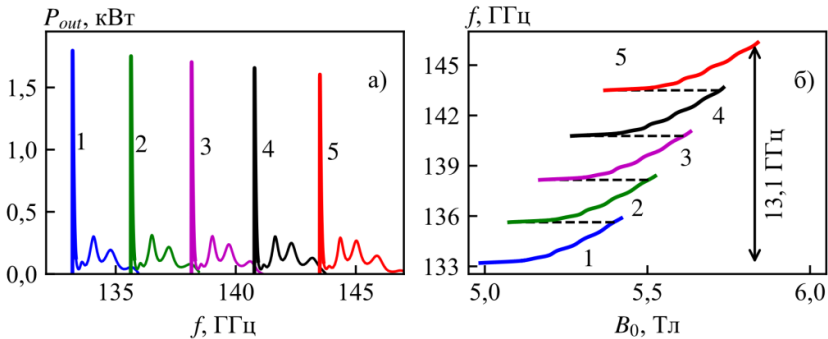


Рис. 6. Зависимость расчётной мощности от частоты генерации (а) и частоты генерации от магнитного поля (б) в многоствольной системе с пятью резонаторами с радиусами $R_r = 3,06$ мм (1), 3,005 мм (2), 2,95 мм (3), 2,895 мм (4) и 2,84 мм (5)

В следующем параграфе рассмотрен проект многоствольного гиротрона, работающего в терагерцовом диапазоне на высоких гармониках гирочастоты, с возможностью одновременной генерации на частотах 263, 395 и 526 ГГц. Дополнительно рассматривается возможность генерации излучения на частоте 594 ГГц. Указанные частоты востребованы в спектрометрических ДПЯ/ЯМР-установках с основными частотами (по протонам ^1H) 400, 600, 800 и 900 МГц соответственно. В пункте 3.4.1 рассматриваются особенности проектирования электронно-оптической системы указанного многоствольного гиротрона. Конфигурация электронно-оптической системы показана на рисунке 7.

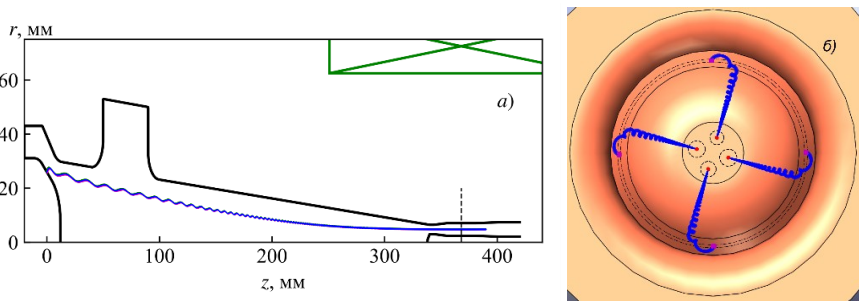


Рис. 7. Геометрия многолучевой пушки многоствольного гиротрона для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии (вид сбоку) (а); б — фронтальный вид электронной пушки

В пунктах 3.4.2–3.4.4 приведены результаты исследования электронно-волнового взаимодействия в МСГ. При одновременной генерации излучения на частотах 263, 395 и 526 ГГц расчётная выходная мощность составила 88, 64 и 42 Вт соответственно. Отметим, при отдельной оптимизации режимов стволов мощность превышает 1 кВт на частоте 263 ГГц и около 260 Вт на частоте 395 ГГц. Для одночастотной генерации на 594 ГГц максимальная мощность составила около 200 Вт. Помимо схемы вывода излучения в сторону коллектора рассмотрен альтернативный вариант с выводом излучения в сторону электронной пушки (режим гиро-ЛОВ). Указанный режим можно реализовать, используя электродинамическую систему с выходным расширением со стороны электронной пушки и закритическим сужением со стороны коллектора. Подход с раскрытием резонатора в сторону пушки позволяет увеличить средний уровень мощности в рабочей полосе.

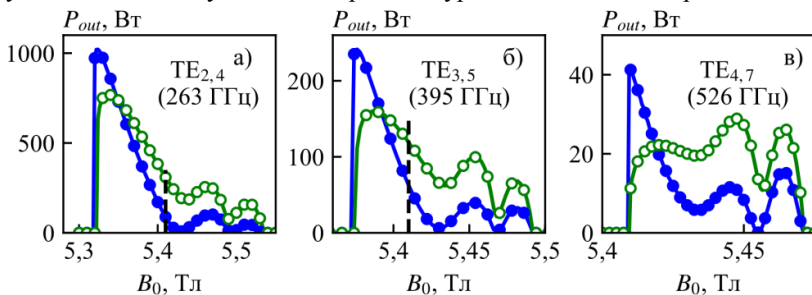


Рис. 8. Зависимости выходной мощности от магнитного поля при выводе излучения в сторону коллектора (заполненные маркеры) и в сторону электронной пушки (полые маркеры) для мод $TE_{2,4}$ (263 ГГц, а), $TE_{3,5}$ (395 ГГц, б) и $TE_{4,7}$ (526 ГГц, в)

На рисунке 8 показаны расчётные зависимости мощности выходного излучения от магнитного поля. Расчётный уровень выходной мощности вполне достаточен для многих научных и технических приложений, в том числе задач спектроскопии и диагностики. В пункте 3.4.5 рассматривается

перспективность рекуперации и предложены варианты системы вывода излучения в многоствольном гиротроне. Показано, что использование рекуперации в данном приборе позволяет повысить КПД в пять раз, значительно снизить уровень рентгеновского излучения, упростить системы питания и охлаждения коллектора.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложении А** приведены самосогласованные расчётные модели, используемые при моделировании электронного-волнового взаимодействия и определении стартовых токов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведено моделирование двух отличающихся по мощности вариантов частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов для работы на первой циклотронной гармонике с мощностью выходного излучения около 200 Вт (с перестройкой в интервале 0,2–0,27 ТГц) и с мощностью около 200 кВт (0,1–0,26 ТГц) на основе триодной схемы магнетронно-инжекторной пушки с учётом магнитной системы.

2. Экспериментально продемонстрирована реализуемость дискретной перестройки частоты в диапазоне 133,9–249,5 ГГц (почти на октаву) в мощном субтерагерцовом гиротроне.

3. Путём численного моделирования и экспериментально показано, что при условии сильной конкуренции мод введение в систему отражения для одной из мод позволяет обеспечить возбуждение и устойчивую генерацию излучения при работе гиротрона на высокой циклотронной гармонике.

4. Показано, что охлаждение резонаторов терагерцовых гиротронов до криогенных температур приводит к снижению доли омических потерь. Это позволяет повысить устойчивость рабочего режима и значительно, вдвое, повысить КПД и выходную мощность гиротрона.

5. На примере разработанного в ИПФ РАН гиротрона с рабочей частотой 527 ГГц показано, что при введении локальной неоднородности в выходную часть резонатора можно обеспечить сохранение приемлемого уровня выходного КПД и модового состава излучения в достаточно широком интервале значений конусности резонатора.

6. Предложена концепция многоствольных гиротронов и методика их построения. Выполнено численное моделирование многоствольного гиротрона с возможностью одновременной генерации излучения на кратных частотах 263, 395 и 526 ГГц.

Список основных работ автора по теме диссертации

A1. Semenov, E. Methods for Simulation the Nonlinear Dynamics of Gyrotrons / E. Semenov, V. Zapevalov, A. Zuev // *Communications in Computer and Information Science*. — 2021. — Vol. 1413. — P. 49–62.

A2. Семенов, Е. С. Расчёт электродинамических характеристик и электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов на основе комплекса программ ANGEL / Е. С. Семенов, А. С. Зуев, А. П. Фокин // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. — 2022. — № 1 (25). — С. 35–47.

A3. Fokin, A. P. Experimental demonstration of the third cyclotron harmonic excitation in technological gyrotron with delayed selective feedback / A. P. Fokin, A. S. Sedov, A. S. Zuev // *Review of Scientific Instruments*. — 2020. — Vol. 91. — P. 024706.

A4. Zuev, A. S. Realization of an octave frequency step-tuning of sub-terahertz gyrotron for advanced fusion research / A. S. Zuev, A. P. Fokin, A. A. Ananichev, E. S. Semenov, O. P. Plankin, A. N. Kuftin, V. E. Zapevalov, M. Yu. Glyavin // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2021. — Vol. 42. — P. 1131–1141.

A5. Завольский, Н. А. Анализ методов дискретной и плавной перестройки частоты в гиротронах для спектроскопии на примере генератора диапазона 0,2–0,27 ТГц / Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, А. С. Седов, Е. С. Семенов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2018. — Т. 61, № 6. — С. 494–504.

A6. Зуев, А. С. Оптимизация перестраиваемого в широком диапазоне частот субтерагерцового гиротрона высокой мощности при ограничениях, налагаемых магнитной системой / А. С. Зуев, В. Е. Запевалов, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2019. — Т. 62, № 4. — С. 309–318.

A7. Sedov, A. S. The project of W-band gyrotron at third cyclotron harmonic with an annular diaphragm / A. S. Sedov, A. S. Zuev, E. S. Semenov, A. A. Bogdashov, A. P. Fokin // *Results in Physics*. — 2018. — Vol. 11. — P. 158–161.

A8. Zuev, A. S. Analysis of the possibilities to control diffraction quality factors of the cavities of sub-terahertz gyrotrons / A. S. Zuev, A. S. Sedov, E. S. Semenov, A. P. Fokin, M. Yu. Glyavin // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2020. — Vol. 48, no. 11. — P. 4037–4040.

A9. Запевалов, В. Е. Снижение омических потерь в резонаторах терагерцовых гиротронов малой мощности / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, В. В. Паршин, Е. С. Семенов, Е. А. Серов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2021. — Т. 64, № 4. — С. 265–275.

A10. Запевалов, В. Е. Многоствольные гиротроны / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2020. — Т. 63, № 2. — С. 105–114.

A11. Запевалов, В. Е. Проектирование электронно-оптической системы многоствольного гиротрона / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Известия вузов. Радиофизика. — 2020. — Т. 63, № 8. — С. 704–713.

A12. Запевалов, В. Е. Многоствольный гиротрон для ДПЯ/ЯМР спектроскопии / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Известия вузов. Радиофизика. — 2023. — Т. 66, № 1. — С. 1–20.

A13. Запевалов Владимир Евгеньевич, Зуев Андрей Сергеевич. Многоствольный гиротрон. – Россия. – Патент 2755826. – 22.09.2021. – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН) (RU).

Список цитированной литературы

1. Gaponov-Grekhov, A.V. Applications of high-power microwaves / A. V. Gaponov-Grekhov, V. L. Granatstein. — Boston, London : Artech House, 1994. — 364 p.

2. Братман, В. Л. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения / В. Л. Братман, А. Г. Литвак, Е. В. Суворов // Успехи физических наук. — 2011. — Т. 181, № 8. — С. 867–874.

3. Запевалов, В. Е. Терагерцовые технологии и их приложения / В. Е. Запевалов, А. Е. Храмов // Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона ; под ред. А. Е. Храмова, А. Г. Баланова, В. Д. Еремки, В. Е. Запевалова, А. А. Короновского. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. — С. 8–67.

4. Booske, J. H. Vacuum electronic high power terahertz sources / J. H. Booske [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. — 2011. — Vol. 1, no. 1. — P. 54–75.

5. Lewis, R. A. A review of terahertz sources / R. A. Lewis // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2014. — Vol. 47, no. 37. — P. 374001.

6. Глявин, М. Ю. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред / М. Ю. Глявин [и др.] // Успехи физических наук. — 2016. — Т. 186, № 6. — С. 667–677.

7. Гольденберг, А. Л. Мазеры на циклотронном резонансе: состояние и перспективы / А. Л. Гольденберг [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1996. — Т. 39, № 6. — С. 635–669.

8. Nusinovich, G. S. Introduction to the Physics of Gyrotron / G. S. Nusinovich. — Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 2004. — 336 p.

9. Запевалов, В. Е. Эволюция гиротронов / В. Е. Запевалов // Известия вузов. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 8–9. — С. 559–572.

10. Цимринг, Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Ш. Е. Цимринг ; [перевод с англ.]. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2012. — 576 с.

11. Nusinovich, G. S. The gyrotron at 50: historical overview / G. S. Nusinovich, M. K. A. Thumm, M. I. Petelin // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2014. — Vol. 35, № 4. — P. 325–381.
12. Братман, В. Л. К теории релятивистского гиротрона / В. Л. Братман, Н. С. Гинзбург, Г. С. Нусинович // *Письма в ЖТФ*. — 1977. — Т. 3, № 18. — С. 961–965.
13. Денисов, Г. Г. Гиротроны мегаваттного уровня мощности для систем электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в установках УТС / Г. Г. Денисов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2003. — Т. 46, № 10. — С. 845–858.
14. Abubakirov, E. B. W-band 5 MW pulse relativistic gyrotron / E. B. Abubakirov [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2017. — Vol. 64, no. 4. — P. 1865–1867.
15. Litvak, A. G. Russian gyrotrons: achievements and trends / A. G. Litvak, G. G. Denisov, M. Y. Glyavin // *IEEE Journal of Microwaves*. — 2020. — Vol. 1, no. 1. — P. 260–268.
16. Глявин, М. Ю. Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы / М. Ю. Глявин [и др.] // *Радиотехника и электроника*. — 2014. — Т. 59, № 8. — С. 745–751.
17. Glyavin, M. Yu. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and high-power THz technologies / M. Yu. Glyavin, T. Idehara, S. P. Sabchevski // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. — 2015. — Vol. 5, no. 5. — P. 788–797.
18. Запевалов, В. Е. Терагерцовые гиротроны / В. Е. Запевалов, М. Ю. Глявин // *Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона / под ред. А. Е. Храмова, А. Г. Баланова, В. Д. Еремки, В. Е. Запевалова, А. А. Короновского*. — Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2016. — С. 68–107.
19. Kumar, N. A review on the sub-THz/THz gyrotrons / N. Kumar [et al.] // *Infrared Physics & Technology*. — 2016. — Vol. 76. — P. 38–51.
20. Blank, M. Millimeter-wave sources for DNP-NMR / M. Blank, K. L. Felch // *eMagRes*. — 2018. — Vol. 7. — P. 155–166.
21. Sabchevski, S. Development and application of THz gyrotrons for advanced spectroscopic methods / S. Sabchevski, M. Glyavin // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10. — P. 189–219.
22. Granatstein, V. L. Detecting excess ionizing radiation by electromagnetic breakdown of air / V. L. Granatstein, G. S. Nusinovich // *Journal of Applied Physics*. — 2010. — Vol. 108, no. 6. — P. 063304
23. Glyavin, M. Yu. A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band / M. Yu. Glyavin [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2014. — Vol. 105, no. 17. — P. 174101.

24. Becerra, L. R. Dynamic nuclear polarization with a cyclotron resonance maser at 5 T / L. R. Becerra // *Physical Review Letters*. — 1993. — Vol. 71, no. 21. — P. 3561–3564.
25. Bajaj, V. S. Dynamic nuclear polarization at 9 T using a novel 250 GHz gyrotron microwave source / V. S. Bajaj [et al.] // *Journal of Magnetic Resonance*. — 2003. — Vol. 160, no. 2. — P. 85–90.
26. Ni, Q. High frequency dynamic nuclear polarization / Q. Ni [et al.] // *Accounts of Chemical Research*. — 2013. — Vol. 46, no. 9. — P. 1933–1941.
27. Dumbrajs, O. Electron cyclotron heating and current drive control by means of frequency step tunable gyrotrons / O. Dumbrajs, J. A. Heikkinen, H. Zohm // *Nuclear Fusion*. — 2001. — Vol. 41, no. 7. — P. 927–944.
28. Thumm, M. K. A. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive / M. K. A. Thumm [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2019. — Vol. 59, no. 7. — P. 073001.
29. Запечалов, В. Е. Неканонические гиротроны / В. Е. Запечалов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2018. — Т. 61, № 4. — С. 305–314.
30. Паршин, В. В. Криовакуумный резонаторный комплекс / В. В. Паршин [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2013. — Т. 56, № 8–9. — С. 614–621.
31. Serov, E. A. Reflectivity of metals in the millimeter wavelength range at cryogenic temperatures / E. A. Serov, V. V. Parshin, G. M. Bubnov // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 2016. — Vol. 64, no. 11. — P. 3828–3838.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Субтерагерцовые гиротроны с широкополосной перестройкой частоты	16
1.1 Общие принципы дискретной перестройки частоты в гиротроне	18
1.2 Гиротрон малой мощности с диапазоном перестройки 0,2–0,27 ТГц	21
1.2.1 Методика расчёта электронно-волнового взаимодействия	21
1.2.2 Выбор мод для ступенчатой перестройки частоты	23
1.2.3 Оптимизация параметров гиротрона	24
1.2.4 Система формирования электронного пучка	30
1.2.5 Перестройка частоты генерации	32
1.2.6 Коллектор электронного пучка	34
1.2.7 Оптимизация выходного окна	35
1.3 Частотно-перестраиваемый гиротрон высокой мощности, ограниченный свойствами магнитной системы	37
1.3.1 Возможности по расширению диапазона перестройки частоты в субтерагерцовых гиротронах высокой мощности	37
1.3.2 Моделирование магнетронно-инжекторной пушки	38
1.3.3 Результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия	41
1.3.4 Выбор стартового сценария	45
1.3.5 Коллекторная система	46
1.4 Экспериментальное исследование широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне	49
1.4.1 Постановка задачи и выбор мод для экспериментов	49
1.4.2 Результаты численного моделирования экспериментальной системы	51
1.4.3 Результаты экспериментов и их обсуждение	52
1.5 Основные выводы по главе 1	58
ГЛАВА 2. Управление добротностью резонаторов гиротронов на высоких циклотронных гармониках	60
2.1 Генерация излучения с высокими КПД и мощностью в гиротроне на третьей циклотронной гармонике с селективным отражателем	61
2.1.1 Описание экспериментальной установки	61
2.1.2 Оптимизация толщины выходного окна	63
2.1.3 Результаты численного моделирования	65
2.1.4 Экспериментальные результаты	67
2.2 Использование локальной неоднородности на выходе из резонатора для управления дифракционной добротностью резонаторов терагерцовых гиротронов	69
2.2.1 Терагерцовый гиротрон для экспериментов по ДПЯ	70
2.2.2 Эффект локальной неоднородности на выходе из пространства взаимодействия	71

2.2.3 Трансформация мод в резонаторе терагерцового гиротрона с неоднородностью на коллекторном конце	73
2.2.4 Результаты численного моделирования	75
2.3 Специфика влияния омических потерь на работу гиротронов терагерцового диапазона	77
2.3.1 Влияние омических потерь на эффективность электронно-волнового взаимодействия	77
2.3.2 Влияние омических потерь на устойчивость рабочего режима	82
2.3.3 О возможности снижения доли омических потерь в терагерцовых гиротронах малой мощности путем охлаждения его резонатора до криогенных температур	86
2.4 Основные выводы по главе 2	91
ГЛАВА 3. Многоствольные гиротронные системы для обеспечения многочастотной генерации	92
3.1 Описание схемы многоствольного гиротрона	94
3.2 Электронно-оптические системы многоствольного гиротрона	97
3.2.1 Азимутальный дрейф электронного пучка	97
3.2.2 ЭОС для многоствольного гиротрона 140 ГГц.....	103
3.3 Примеры построения МСГ	107
3.3.1 Многоствольная система с широкополосной плавной перестройкой частоты	107
3.3.2 Частотно-перестраиваемый многоствольный гиротрон с «изолированными» электронными пучками	110
3.3.3 Многоствольный гиротрон на высоких гармониках гирочастоты.....	111
3.4 Многоствольный гиротрон с одновременной генерацией излучения на кратных частотах для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии	113
3.4.1 Проектирование электронной пушки	115
3.4.2 Электронно-волновое взаимодействие в МСГ на высоких гармониках	122
3.4.3 Особенности электронно-волнового взаимодействия в МСГ с обращённой электродинамической системой (режим гиро-ЛОВ)	126
3.4.4 Влияние качества внутренней поверхности резонатора	130
3.4.5 Возможности рекуперации на коллекторе и система вывода излучения	131
3.5 Основные выводы по главе 3	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	135
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчётные модели, используемые для описания электронно-волнового взаимодействия в гиротроне	160

ЗУЕВ Андрей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ
ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИРОТРОНОВ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 11.12.2023 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 42(2023).

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