

На правах рукописи



Леонтьев Александр Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ГИРОТРОНОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

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).

Научный руководитель: Абубакиров Эдуард Булатович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Лукша Олег Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор высшей инженерно-физической школы, «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург)

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 «2» октября 2023 года в 15:00 на заседании Диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ipfran.ru ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Автореферат разослан «28» августа 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Продвижение источников электромагнитного излучения мегаваттного и субгигаваттного уровня мощности в миллиметровый диапазон длин волн может способствовать получению новых результатов в целом ряде приложений, таких как создание микроволновых ондуляторов для мощных рентгеновских ЛСЭ [1–5], импульсная спектроскопия [6, 7], исследования газового разряда [8–11] и других.

На сегодняшний день, наиболее изученными и проработанными источниками СВЧ-излучения большой мощности являются черенковские приборы. Так, на длине волны около 3 см несколькими группами исследователей достигнута мощность 3–6 ГВт [12–14] в импульсах длительностью в десятки наносекунд. Для слабоустойчивых режимов была продемонстрирована пиковая мощность 10–15 ГВт [15]. В длинноволновой части миллиметрового диапазона получено излучение в системе четырех синхронизированных ЛОВ, работающих в режиме сверхизлучения, с уровнем мощности 600 МВт в каждой, что соответствует эквивалентной мощности около 10 ГВт [16]. В системах с длительностью в десятки наносекунд в генераторах черенковского типа в этой части диапазона достигнуты уровни мощности свыше 500 МВт [17–20]. Дальнейшее продвижение приборов данного класса в область более коротких длин волн в значительной степени сдерживается необходимостью создания гофрированных электродинамических систем с характерными размерами порядка длины волны.

Большие надежды с точки зрения продвижения в область более высоких частот в настоящее время возлагаются на черенковские генераторы поверхностной волны. Однако расчетные уровни мощности, составляющие сотни мегаватт, значительно превосходят полученные в экспериментах результаты [21, 22].

На более коротких волнах наибольший уровень мощности продемонстрирован, по-видимому, мазерами на свободных электронах. В частности, в диапазоне 75 ГГц получено излучение с мощностью 50–70 МВт при длительности импульсов ~100 нс [23]. При этом разрабатываются проекты источников на частотах 1 ТГц и более с уровнем выходной мощности 10–100 МВт [24].

Другим перспективным классом источников излучения в миллиметровом диапазоне длин волн являются приборы гирорезонансного типа, наиболее проработанными из них являются гиротроны [25]. Важным их преимуществом перед черенковскими приборами является высокая модовая селективность [26–28], позволяющая использовать электродинамические системы с высокой сверхразмерностью. Кроме того, в их конструкции отсутствуют замедляющие системы и другие мелкомасштабные (по сравнению с длиной

волны) элементы, присущие электровакуумным СВЧ-приборам с замедленными волнами. Эти достоинства гиротронов позволили им стать наиболее мощными источниками непрерывного миллиметрового излучения. Можно надеяться, что эти же свойства окажутся полезными для освоения мультимегаваттного и субгигаваттного уровня импульсной выходной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн.

Достаточно долго считалось, что максимальный КПД гиротрона снижается при переходе от субрелятивистских к существенно релятивистским энергиям частиц. Однако детальное численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов показало [29], что достичь высоких значений КПД в гиротроне можно даже в области сильного релятивизма за счет выбора оптимальных длины пространства взаимодействия и продольного распределения амплитуды высокочастотного поля. В частности, в ИПФ РАН были экспериментально продемонстрированы мультимегаваттные гиротроны, запитываемые электронными пучками с энергией 250–300 кэВ, в Ка-диапазоне с КПД 50% [30] и в V-диапазоне с КПД порядка 30% [31], созданные в значительной мере с опорой на опыт традиционных слаборелятивистских гиротронов. Дальнейшее продвижение подобных источников в область более высоких частот представляется актуальной задачей.

Освоение субгигаваттного уровня выходной мощности с помощью релятивистских гиротронов осложнено необходимостью формировать винтовые электронные пучки с током порядка нескольких килоампер и достаточно-высоким питч-фактором (порядка единицы и выше). Очевидно, что традиционная для гиротронов магнетронно-инжекторная пушка с термоэмиссионным катодом для таких целей непригодна ввиду недостаточной плотности тока эмиссии, и необходимо создавать электронно-оптические системы на основе взрывоэмиссионных инжекторов. В истории микроволновой электроники вплоть до середины 1990х годов предпринимались попытки создания гиротрона на сильноточном релятивистском электронном пучке [32–35], однако в реализованных системах использовался либо пучок с низким питч-фактором, либо только центральная часть пучка, сформированная взрывоэмиссионным инжектором. В обоих этих случаях полный КПД прибора оказывался невелик. Принимая во внимание успех в реализации релятивистских гиротронов с термокатадами в длинноволновой части миллиметрового диапазона, достигнутый во многом за счет прогресса в моделировании электронно-полевого взаимодействия и развития новых подходов к оптимизации параметров гиротронов [29], распространение данных методов на задачу о построении сильноточных гиротронов миллиметрового диапазона представляется весьма перспективным.

Цели диссертации

1. Изучение особенностей формирования релятивистских винтовых электронных пучков и электронно-волнового взаимодействия в мощных релятивистских гиротронах.

2. Разработка новых решений, способных обеспечить эффективную генерацию микроволнового излучения миллиметрового диапазона длин волн при увеличении ускоряющего напряжения и тока электронного пучка.

3. Экспериментальное исследование гиротронов миллиметрового диапазон длин волн, созданных на основе разработанных подходов.

Научная новизна результатов

1. Предложены новые типы резонаторов для сильноточных гиротронов с улучшенными по сравнению с традиционным цилиндрическим резонатором селективными свойствами.

2. Разработана и экспериментально реализована электронно-оптическая система, формирующая электронные пучки с параметрами, пригодными для эффективной запитки сильноточных гиротронов на основе магнито-изолированного коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом. При этом в отличие от реализованных ранее систем используется либо полный ток изначального прямолинейного пучка, либо его большая часть.

3. Впервые была экспериментально реализована эффективная одномодовая генерация в релятивистском гиротроне с термокатодом в W -диапазоне частот с уровнем мощности выходного излучения более 5 МВт.

4. Реализована генерация электромагнитного излучения мощностью в десятки мегаватт в гиротроне Ка-диапазона с рабочим током, составляющим $\sim 40\%$ от предельного тока транспортировки.

5. Продемонстрирована возможность генерации излучения на высоких циклотронных гармониках в сильноточном релятивистском гиротроне в режиме умножения частоты. При этом коэффициент нелинейного преобразования оказывается существенно выше по сравнению с традиционными слабoreлятивистскими гиротронами.

Практическая значимость и использование результатов работы

Проведенные исследования позволили разработать и реализовать ряд макетов источников импульсного излучения миллиметрового диапазона волн с уникальными параметрами. Применение предложенных методов и подходов будет способствовать дальнейшему продвижению мультимегаваттных и субгигаваттных источников электромагнитного излучения в область более высоких частот.

Результаты, представленные в диссертации, использовались при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных грантами РФФИ

№ 16-08-01001, № 18-08-00926, № 18-38-00725, № 20-38-70047, РФФ № 14-29-00192 а также в рамках выполнения государственных заданий № 0035-2014-0012 и № 0030-2021-0027.

Положения, выносимые на защиту

1. Гиротроны с релятивистскими электронными пучками могут обеспечить генерацию импульсного излучения с мультимегаватным уровнем мощности в 3-мм диапазоне при использовании термоэмиссионных инжекторов и с мощностью в несколько десятков мегаватт в 8-мм диапазоне при использовании пучков, формируемых взрывоземиссионными катодами.

2. Сильноточные (килоамперные) винтовые электронные пучки с характеристиками, приемлемыми для достижения эффективной генерации в релятивистских гиротронах миллиметрового диапазона, могут быть сформированы в электронно-оптической системе, состоящей из коаксиального диода с магнитной изоляцией и системы раскачки поперечных скоростей на основе магнитного кикера.

3. Щелевые резонаторы с рабочими модами ТМ-типа могут быть использованы для освоения килоамперных токов инжекции, что обеспечит повышение эффективности генерации и мощности выходного излучения релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона длин волн.

4. Собственные моды сверхразмерных продольно-щелевых цилиндрических резонаторов, в которых обеспечивается связь парциальных мод ТЕ-типа, могут быть селективно возбуждены электронными пучками релятивистских гиротронов для достижения мощности генерируемого излучения порядка десятков мегаватт в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

5. Сильноточные релятивистские гиротроны в режиме умножения частоты могут быть использованы как источники импульсного субтерагерцового излучения с уровнем мощности в несколько сотен киловатт.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1-A10] и докладывались на международных конференциях по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2016; Карлсруэ, Германия, 2017), Международной конференции по инфракрасным, миллиметровым и терагерцовым волнам (Париж, 2019), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород Москва, 2017), Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016, 2018,2022), Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018), Всероссийской микровол-

новой конференции (Москва, 2015, 2016, 2018), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2019, 2022), Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2018, 2022), Международном конгрессе по потокам энергии и радиационным эффектам (Томск, 2022), Конкурсе молодых ученых ИПФ РАН (Н.Новгород, 2017) , а также на семинарах по вакуумной электронике, проводимых в ИПФ РАН.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1–A10] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электродинамических свойств резонаторов гиротронов и взаимодействия релятивистских электронных пучков с электромагнитными полями этих систем, численном моделировании режимов генерации, разработке систем для проведения натуральных экспериментов и непосредственно 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 коллективов установок «Сатурн-F» и «Синус-6» (ИПФ РАН). Обработка результатов эксперимента производилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, включая 63 иллюстрации, 7 таблиц и список литературы из 117 наименований. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 30 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава посвящена исследованию импульсного мультимегаваттного релятивистского гиротрона W-диапазона с термоэмиссионным инжектором [A1].

В разделе 1.1 приводятся элементы расчета и оптимизации гиротрона. Представлено описание основных решений, примененных для создания компонентов прибора.

В ходе работы проведена адаптация электронно-оптической системы на базе экспериментального стенда «Сатурн-F», ранее используемой для реализации гироприборов в сантиметровом диапазоне и длинноволновой части миллиметрового диапазона. Приведены результаты расчетов на основе программного комплекса ANGEL [36], демонстрирующие возможность получения пучка с необходимыми для эффективной генерации параметрами (энергия электронов 200–250 кэВ, полный ток пучка 80–120 А, питч-фактор (отношение поперечной и продольной компонент скорости электронов в пучке) ~ 1.3).

Первоначальный расчет электронно-волнового взаимодействия проводился на основе классической одномодовой стационарной модели с нефиксированной структурой поля [29], в результате была предсказана возможность достижения выходной мощности 5–10 МВт при достаточно высоком КПД более 30%.

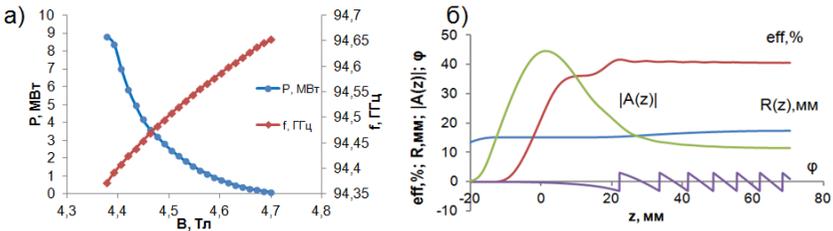


Рис. 1. Результаты моделирования электронно-волнового взаимодействия в релятивистском гиротроне W-диапазона по усредненным уравнениям: *a* – зависимость мощности и частоты выходного излучения гиротрона от величины ведущего магнитного поля ($U_0 = 220$ кВ, питч-фактор 1.3, $I_{beam} = 100$ А); *б* – оптимизированный профиль резонатора $R(z)$, модуль амплитуды высокочастотного поля $|A(z)|$ и распределение его фазы $\phi(z)$, КПД взаимодействия $eff(z)$ при величине ведущего магнитного поля $B = 4.38$ Тл

Для верификации и уточнения расчета по усредненным уравнениям было проведено прямое численное моделирование методом «Частица в ячейке» на основе трехмерной версии кода KARAT, также подтвердившее возможность эффективной генерации.

Раздел 1.2 посвящен экспериментальному исследованию гиротрона W-диапазона с мультимегаваттной выходной мощностью. Описывается система измерения параметров выходного излучения, методика и ход экспериментов, в ходе которых была получена устойчивая одномодовая генерация на частоте 94,4 ГГц с пиковой импульсной мощностью более 5 МВт, что соответствует КПД более 20%.

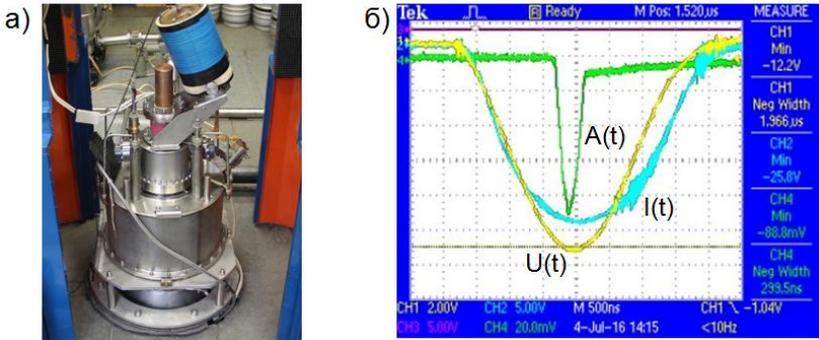


Рис. 2. Гиротрон (а), смонтированный на стенде «Сатурн-Ф» в процессе экспериментальных испытаний. Осциллограммы (б) ускоряющего напряжения $U(t)$, тока пучка $I(t)$ и огибающая микроволнового импульса $A(t)$, соответствующие режиму максимальной выходной мощности 5.6 МВт ($U = 244$ кВ, $I = 103$ А)

Во **второй** главе рассматривается релятивистский гиротрон Ка-диапазона на основе взрывоэмиссионного инжектора с рабочим током 2 кА, что составляет $\sim 40\%$ предельного тока транспортировки, и субгигаваттной выходной мощностью.

В **разделе 2.1** описывается моделирование и расчет электронно-оптической системы (ЭОС) на основе магнито-изолированного коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом и системы расчески поперечных скоростей в неадиабатическом магнитном поле [A2]. Исследуются схемы с использованием одиночной короткой катушки с током (кикера) с магнитной компрессией и без нее. Первоначальный расчет производится с помощью «одночастичной» модели, когда уравнения движения электрона в неоднородном магнитном поле решаются последовательно для одиночных электронов (т.е. без учета пространственного заряда). Для подтверждения и дополнения полученных результатов расчетов было также проведено трехмерное PIC-моделирование. Результаты расчетов показывают возможность формирования в рассматриваемых системах винтовых электронных пучков с энергией электронов ~ 500 кэВ, полным током ~ 2 кА и питч-фактором ~ 1 . При этом, в системах без магнитной компрессии пучка неизбежно осаждение части электронов на стенку канала транспортировки в области кикера. Системы же с компрессией лишены данного недостатка, но являются более сложными в изготовлении и настройке.

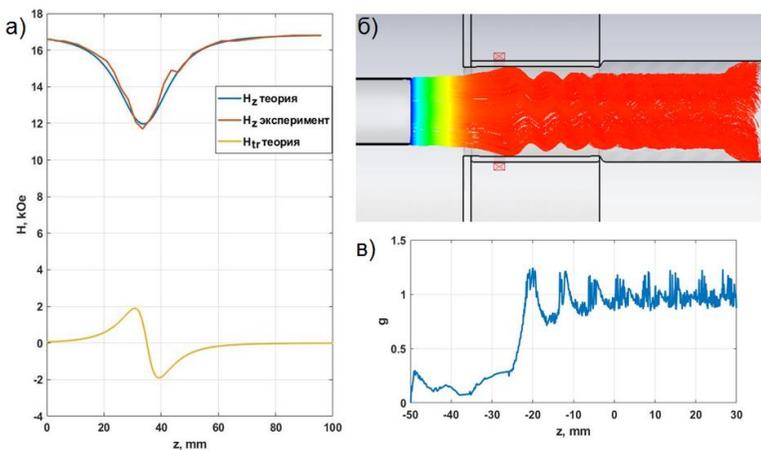


Рис. 3. Расчетное и измеренное в эксперименте магнитное поле в области раскачки (а). Геометрия ЭОС и траектории частиц в PIC-моделировании (б). Зависимость среднего питч-фактора пучка от продольной координаты (в)

Описывается экспериментальное исследование ЭОС с использованием оригинального метода диагностики параметров винтовых электронных пучков большой интенсивности, основанного на применении контрастных электронных мишеней и детальном сопоставлении модельных и экспериментальных профилей потока. Наблюдаемое соответствие косвенно подтверждает расчетные характеристики пучка.

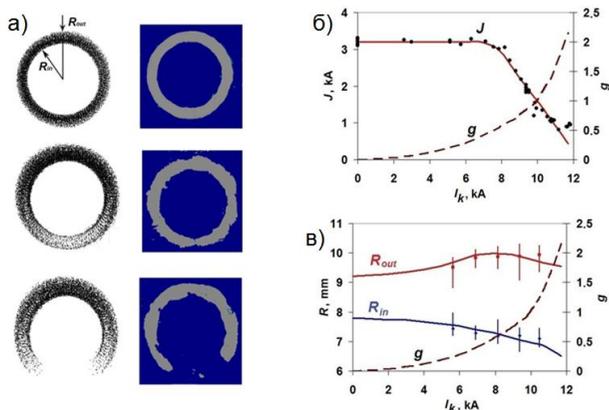


Рис. 4. Сравнение расчетного положения частиц в области коллектора с отпечатками пучка на мишени (а) и расчетные (непрерывная кривая) и экспериментальные (точки) зависимости (б) коллекторного тока и внутреннего и внешнего радиусов отпечатка пучка на мишени от величины тока кикера (в). Штриховой кривой на обоих графиках показаны значения расчетного питч-фактора пучка

В разделе 2.2 предложен резонатор продольно-щелевого типа, состоящий из набора продольно расположенных пластин. Данный резонатор обеспечивает селективное возбуждение мод ТМ-типа в сильноточном гиротроне, что представляет значительный интерес с точки зрения оптимизации электронно-волнового взаимодействия при рабочих токах мультикилоамперного уровня [А3–А5].

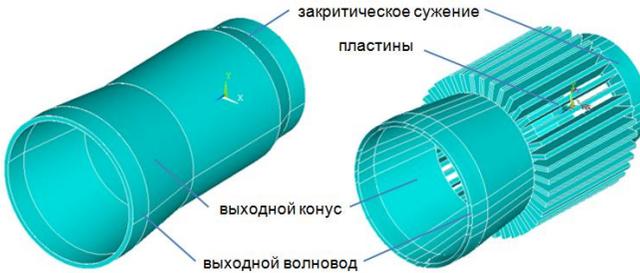


Рис. 5. Классический регулярный гиротронный резонатор и исследуемый продольно-щелевой резонатор с дискриминацией мод ТЕ-типа

Представлена аналитическая теория такого резонатора, численные расчеты методом конечных элементов, а так же результаты «холодных» электродинамических измерений. Показано, что при оптимальной геометрии пластин поперечная (т.е. соответствующая потерям на излучение в поперечном направлении) добротность ТМ-мод в продольно-щелевом резонаторе близка к величине омической добротности и много меньше продольной дифракционной добротности при характерных длинах однородного участка резонатора. В то же время ТЕ-моды оказываются практически полностью подавленными, что исключает их паразитное возбуждение электронным пучком.

Раздел 2.3 посвящен моделированию взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с модами гиротронных резонаторов ТЕ- и ТМ-типов в Ка-диапазоне частот. Расчеты проводятся как на основе усредненных уравнений, а так и с помощью прямого трехмерного РЭС-моделирования.

В результате исследования продемонстрирована возможность получения выходного излучения более 200 МВт в гиротроне с классическим регулярным резонатором на моде $TE_{3,2}$ с частотой 30 ГГц, и с продольно-щелевым пластинчатым резонатором на моде $TM_{5,1}$ с частотой 35 ГГц. Используемые в расчетах параметры электронного пучка соответствуют значениям, полученным в разделе 2.1. При этом оптимальная длина резонатора с модой ТМ-типа оказывается на 30% больше по сравнению с классическим вариантом, что является преимуществом с точки зрения селекции мод и демонстрирует работоспособность предложенной системы.

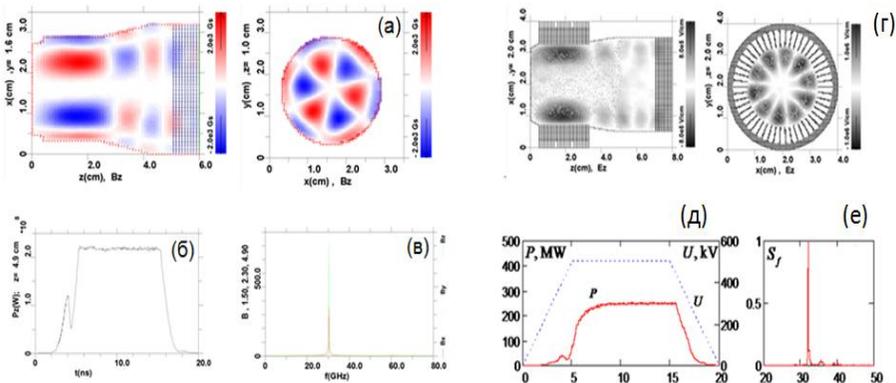


Рис. 6. Результаты PIC-моделирования электронно-волнового взаимодействия в сильноточных гиротронах Ка-диапазона. Пространственные структуры рабочих мод, огибающие импульсов выходного излучения и его частотный спектр для гиротрона на моде $TE_{3,2}$ регулярного резонатора (*a*, *б*, *в*) и моде $TM_{5,1}$ продольно-щелевого резонатора (*г*, *д*, *е*) соответственно

В разделе 2.4 приводятся результаты экспериментальных исследований сильноточного гиротрона на модах $TE_{3,2}$ и $TM_{5,1}$. Описывается методика и ход экспериментов [А6]. Особое внимание уделено обнаруженной в ходе первых тестов проблеме паразитного самовозбуждения участка, в котором происходит раскачка поперечных скоростей пучка (области кикера), в результате которого частицы в пучке получают скоростную модуляцию, исключаящую эффективное взаимодействие с полем резонатора.

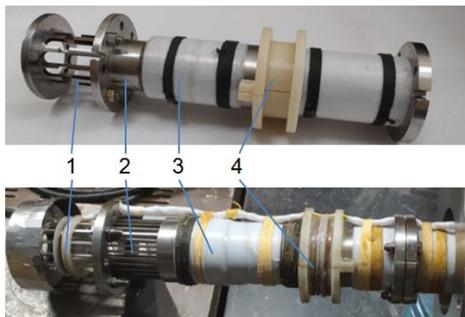


Рис. 7. Внешний вид сильноточных гиротронов Ка-диапазона с классическим регулярным резонатором (сверху) и продольно-щелевым резонатором (снизу). Цифрами обозначены: 1 – область раскачки поперечных скоростей пучка, 2 – резонатор, 3 – выходной волновод, 4 – осаждающая катушка

Для решения этой проблемы была предложена модифицированная версия кикера, выполненная, аналогично продольно-щелевому резонатору, из набора пластин, но разделенных существенно более широкими щелями, обеспечи-

вающими подавление паразитных колебания при сохранении возможности транспортировки пучка.

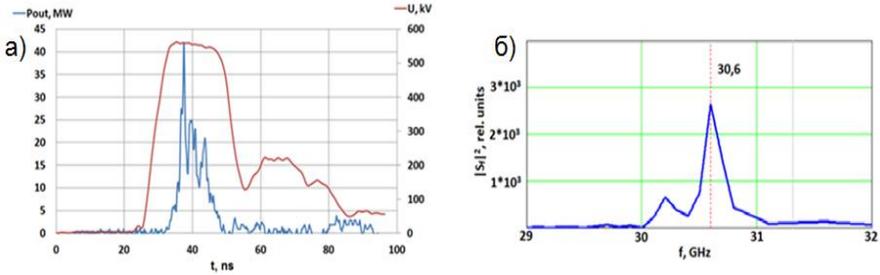


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований сильноточного гиротрона: осциллограмма ускоряющего напряжения и огибающая микроволнового импульса (а) и частотный спектр, соответствующий моде $TE_{3,2}$ (б)

При использовании модифицированной системы раскочки в сильноточных гиротронах с TE - и TM -модами удалось реализовать устойчивую генерацию излучения на расчетных частотах с выходной мощностью до 40 МВт. Предполагается, что снижение мощности по сравнению с расчетными значениями обусловлено увеличением скоростного и позиционного разброса частиц в пучке при его транспортировке в более сложном канале транспортировки.

Третья глава посвящена повышению рабочей частоты сильноточных релятивистских гиротронов до нескольких сотен гигагерц.

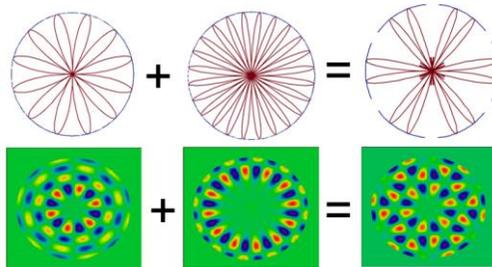


Рис. 9. Иллюстрация принципа образования высокодобротной моды в щелевом резонаторе: сложение двух мод с одинаковой амплитудой на стенке резонатора с M и $2M$ вариациями по азимуту в сумме дают моду с M вариациями с удвоенной и M вариациями с половинной амплитудой, что дает возможность осуществить поперечную дифракционную селекцию (сверху). Пример поперечной структуры высокодобротной моды резонатора с шестью щелями в виде суперпозиции мод $TE_{6,4}$ и $TE_{12,2}$ (снизу)

В разделе 3.1 предлагается новый тип резонатора гиротрона с повышенной модовой селективностью [A7, A8]. На основе аналитического подхода и численного моделирования показано, что в сверхразмерном цилиндрическом резонаторе с M продольно-щелевыми разрезами связь парциальных TE мод

регулярного волновода с разностью азимутальных индексов, кратной количеству щелей и близкими критическими частотами может приводить к формированию высокодобротных мод с малыми радиальными потерями на квазикритических частотах. При этом частотный спектр высокодобротных мод в такой системе будет существенно разрежен по сравнению со спектром цилиндрического резонатора со сплошными стенками, что может быть использовано для расширения полосы устойчивой одномодовой генерации в гиротронах.

Численный расчет показывает, что при угловом размере щелей равном угловому размеру оставшейся стенки в резонаторе с шестью щелями существует мода с поперечной структурой в виде суперпозиции мод круглого волновода $TE_{6,4}$ и $TE_{12,2}$ с поперечной добротностью ~ 2400 , а в резонаторе с восемью щелями в виде суперпозиции мод $TE_{8,7}$ и $TE_{16,4}$ с поперечной добротностью ~ 6800 , что существенно больше добротностей соседних мод щелевых резонаторов. Стоит отметить, что характерная для сильноточных релятивистских гиротронов добротность, связанная с потерями на излучение в продольном направлении, составляет величину порядка нескольких сотен. Таким образом, поперечные дифракционные потери рассматриваемых мод можно считать достаточно малыми.

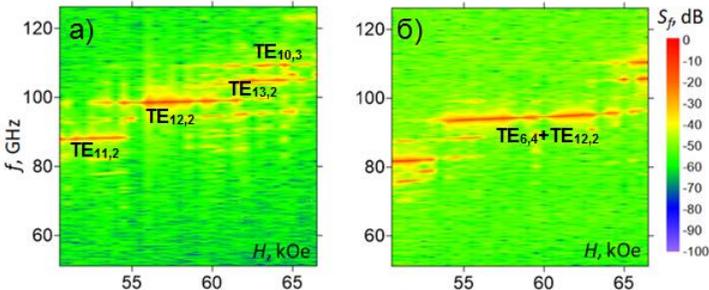


Рис. 10. Зависимость от величины ведущего магнитного поля спектра выходного излучения сильноточного релятивистского гиротрона диапазона 100 ГГц с регулярным (а) и щелевым (б) резонатором

Для демонстрации преимуществ щелевых резонаторов проведено РИС-моделирование сильноточного гиротрона ($U_a = 500$ кВ, $I_b = 2$ кА) диапазона 100 ГГц. В рамках моделирования электронный пучок устойчиво возбуждает связку мод $TE_{6,4}$ и $TE_{12,2}$. При этом полоса одномодового возбуждения такой моды при изменении ведущего магнитного поля более чем в два раза превышает ширину полосы одномодового возбуждения для случая регулярного резонатора, в котором при аналогичных условиях возбуждалась мода $TE_{12,2}$. Максимальная мощность выходного излучения в гиротроне со щелевым резонатором составляла ~ 100 МВт.

Представлены результаты моделирования гиротронов субтерагерцового диапазона частот для пучка с аналогичными параметрами. Рассматривалось

взаимодействие со связкой мод $TE_{6,4}+TE_{12,2}$ в шестищелевом резонаторе с рабочей частотой порядка 0.3 ТГц и связкой $TE_{8,7}+TE_{16,4}$ в восьмищелевом резонаторе с рабочей частотой порядка 0.5 ТГц.

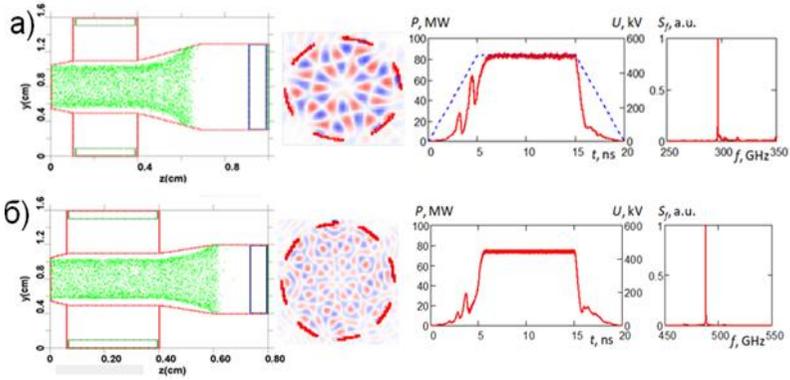


Рис. 11. Результаты PIC-моделирования сильноточных гиротронов субтерагерцового диапазона: сечения пространства взаимодействия, пространственная структура рабочей моды, импульс ускоряющего напряжения (штриховая линия) и выходная мощность (сплошная линия) и соответствующий спектр выходного сигнала для гиротрона с частотой 0,3 ТГц на связке мод $TE_{6,4}+TE_{12,2}$ (а) и гиротрона с частотой 0,5 ТГц на связке мод $TE_{8,7}+TE_{16,4}$ (б)

Моделирование показало, что электронный пучок в достаточно широкой полосе по магнитному полю устойчиво возбуждает соответствующие высокочастотные моды. Максимальная мощность выходного излучения при этом составляет 70–80 МВт, что соответствует КПД 7–8%.

В разделе 3.2 в исследована генерация излучения на высоких циклотронных гармониках в режиме умножения частоты в сильноточном релятивистском гиротроне [A9, A10].

В отличие от режима селективного возбуждения высоких гармоник, трудно осуществимого в сильноточных гиротронах, в режиме умножения частоты генерация излучения на высоких гармониках происходит одновременно с генерацией на основной гармонике. Данный механизм основан на нелинейных свойствах электронного пучка и подразумевает, что группировка в низкочастотной волне приводит к тому, что компоненты электронного тока возникают не только на частоте этой волны, но также и на ее гармониках, которые, в свою очередь, уже инициируют высокочастотное излучение на соответствующих частотах.

Существенным недостатком данного режима является низкий коэффициент нелинейной трансформации (КНТ), соответствующий отношению мощности излучения на высокой гармонике к мощности излучения на основной гармонике, который для слаборелятивистских гиротронов

составляет величину порядка 10^{-4} – 10^{-6} [37]. В то же время хорошо известно, что степень спада коэффициентов связи на гармониках уменьшается с увеличением энергии электронов [38]. Таким образом, для сильноточных релятивистских гиротронов, обладающих мощностью излучения на первой гармонике порядка 100–200 МВт можно ожидать субмегаваттной мощности на высоких гармониках.

Другим достоинством сильноточных релятивистских гиротронов с точки зрения реализации режима умножения частоты является возможность эффективного взаимодействия с ТМ-модами. Эффективное умножение частоты имеет место при соотношении $m_s = sm_1$, где m_1 – азимутальный индекс моды, соответствующей основной циклотронной гармонике, m_s – азимутальный индекс моды, соответствующей гармонике с номером s , и асимптотическом условии кратности критических частот $f_{cn} = nf_{c1}$. Для возбуждаемых на первой гармонике ТЕ мод круглого волновода, например для $n = 3$, наиболее точно данным условиям будут удовлетворять высокочастотные моды ТМ-типа, для которых связь с электронным пучком в классических слабoreлятивистских гиротронах слишком мала.

Генерация высоких гармоник в сильноточных релятивистских гиротронах в режиме умножения частоты исследуется на основе усредненных уравнений и с помощью трехмерного PIC-моделирования.

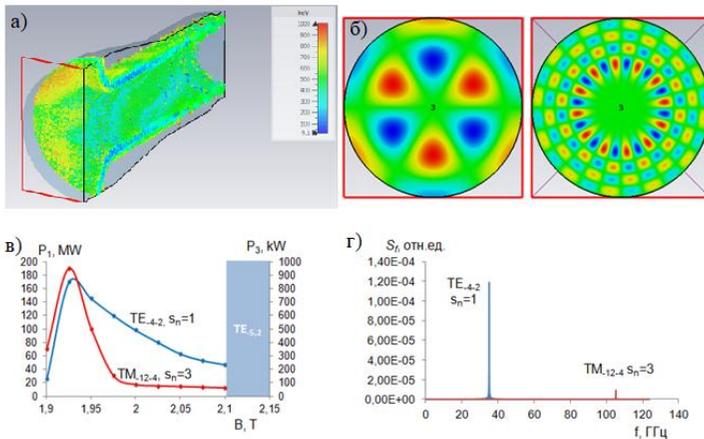


Рис. 12. Результаты PIC-моделирования генерации третьей гармоники в сильноточном релятивистском гиротроне Ка-диапазона: а – мгновенное положение частиц в резонаторе; б – поперечные структуры мод $TE_{4,2}$ и $TM_{12,4}$; в – зависимость мощности генерации на основной гармонике и 3-й гармонике от величины магнитного поля; г – частотный спектр выходного сигнала

Для рассмотренного в **главе 2** сильноточного гиротрона с регулярным резонатором максимальная мощность излучения на моде $TE_{4,2}$, взаимодействующей с пучком на первой гармонике, составляет около 170 МВт. Одновремен-

менно происходит генерация излучения мощностью около 950 кВт на моде $TM_{12,4}$, взаимодействующей с электронным пучком на третьей гармонике. При этом частота высокой моды $TM_{12,4}$ в точности совпадает с утроенной частотой основной моды. Таким образом, КНТ для третьей гармоники составляет ~ 0.55 , что на несколько порядков выше значений, характерных для слабoreлятивистских гиротронов.

Генерация излучения на третьей гармонике в имеющемся сильноточном релятивистском гиротроне также наблюдалась экспериментально, для чего одновременно использовалось две микроволновых измерительных системы Ка- и W-диапазона. В ходе эксперимента измерительной системой Ка-диапазона был зафиксирован сигнал на частоте 35,7 ГГц, соответствующий расчетной частоте моды $TE_{4,2}$. При этом одновременно в системе W-диапазона наблюдался сигнал на частоте 107,1 ГГц, что точно соответствует тройной частоте низкочастотного сигнала и предположительно соответствует излучению в моду $TM_{12,4}$ на третьей циклотронной гармонике.

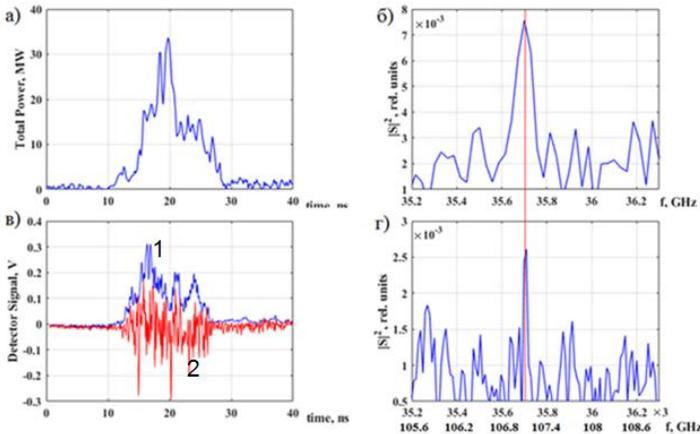


Рис. 13. Экспериментальное наблюдение излучения на третьей циклотронной гармонике: *a* – огибающая СВЧ-импульса в измерительной системе Ка-диапазона; *b* – частотный спектр сигнала в Ка-диапазоне; *в* – огибающая микроволнового импульса в измерительной системе W-диапазона (кривая 1), гетеродинированный сигнал при частоте опорного сигнала 104 ГГц (кривая 2); *г* – частотный спектр сигнала в W-диапазоне

Также представлены результаты численного моделирования режима умножения частоты в перспективном сильноточном гиротроне с частотой 100 ГГц на первой гармонике. Моделирование показало, что при мощности излучения на первой гармонике ~ 200 МВт мощность генерации на третьей гармонике достигает ~ 700 кВт, а на четвертой и пятой гармониках ~ 200 кВт.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан и экспериментально реализован релятивистский гиротрон с термоэмиссионным инжектором, работающий в 3-мм диапазоне длин волн. Мощность выходного излучения гиротрона в импульсах длительностью 300 нс составила более 5 МВт при КПД порядка 20%.

2. Для реализации суб-ГВт релятивистских гиротронов разработана и экспериментально протестирована электронно-оптическая система с взрывоэмиссионным катодом, способная формировать винтовые электронные пучки с энергией частиц 500 кэВ, током до 2 кА, питч-фактором порядка 1 и разбросом по поперечным скоростям порядка 40%.

3. Для оптимизации условий электронно-волнового взаимодействия в сильноточных релятивистских гиротронах предложено использовать резонаторы в виде набора радиально ориентированных металлических пластин, в которых обеспечивается эффективная дискриминация вращающихся мод ТЕ-типа. В результате оказывается возможным селективное возбуждение ТМ-мод, имеющих сравнительно низкий импеданс связи с электронами, что, как показывает численное моделирование, позволяет освоить высокие (килоамперные) токи с сохранением высокой (~20%) эффективности генерации.

4. Экспериментально продемонстрирована работоспособность релятивистских гиротронов 8-мм-диапазона с рабочими токами, составляющими около 40% от предельного тока транспортировки, при возбуждении мод ТЕ- и ТМ-типов. В результате получено выходное излучение с импульсной мощностью ~40 МВт.

5. Предложен новый тип сверхразмерных продольно-щелевых резонаторов, в которых обеспечивается связь ТЕ-мод с разностью азимутальных индексов кратной числу щелей. В результате формируется высокодобротная собственная мода с малыми радиальными потерями на критических частотах. В рамках трехмерного численного моделирования показано, что при использовании резонаторов такого типа возможна реализация субтерагерцовых сильноточных релятивистских гиротронов с мощностью выходного излучения в десятки мегаватт.

6. На основе численного моделирования исследован режим умножения частоты в релятивистских гиротронах. Показано, что при возбуждении высоких циклотронных гармоник в гиротронах с рабочими частотами 35 и 100 ГГц отношение мощности высокочастотного излучения к мощности излучения на основной гармонике составляет ~0.4–0.5% для третьей гармоники и ~0.1% для пятой гармоники, что на несколько порядков выше величин, характерных для традиционных гиротронов со слабoreлятивистскими пучками.

Список цитированной литературы

1. *Chang C., Shumail M., Tantawi S., Neilson J., Pellegrini C.* Electron dynamics and transverse-kick elimination in a high-field short-period helical microwave undulator // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101, № 12. Art. no. 161102.
2. *Kuzikov S.V., Savilov A.V., Vikharev A.A.* Flying radio frequency undulator // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105, № 3. Art. no. 033504.
3. *Zhang L., He W., Clarke J., Ronald K., Phelps A.D.R., Cross A.W.* Microwave Undulator Using a Helically Corrugated Waveguide // *IEEE Trans. on Electron Devices.* 2018. V. 65, № 12. P. 5499-5504.
4. *Toufexis F., Dolgashev V.A., Limborg-Deprey C., Tantawi S.G.* Compact linac-driven light sources utilizing mm-period RF undulators // *Advances in Laboratory-based X-Ray Sources, Optics, and Applications VI, Proceedings Volume 10387, San Diego, California, United States.* 2017.
5. *Винокуров Н.А., Левичев Е.Б.* Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // *УФН.* 2015. Т. 185, № 9. С. 917-939.
6. *Zvyagin S.A., Ozerov M., Čížmár E. et al.* Terahertz-range free-electron laser electron spin resonance spectroscopy: Techniques and applications in high magnetic fields // *Review of Scientific Instruments.* 2009. V. 80, № 7. Art. no. 073102.
7. *Knyazev B.A., Bagryanskaya E.G., Chesnokov E.N. et al.* Novosibirsk Free Electron Laser as a User Facility // *Physics Procedia.* 2016. V. 84. P. 27-34. 2016.
8. *Артемов К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосекова В.Д. и др.* Разряд в атмосфере в гауссовом пучке подпороговых миллиметровых волн // *Письма в ЖЭТФ.* 2018. Т. 107, № 4. С. 223-226.
9. *Hidaka Y., Choi E.M., Mastovsky I., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J., Edmiston G.F., Neuber A.A., Oda Y.* Plasma structures observed in gas breakdown using a 1.5 MW, 110 GHz pulsed gyrotron // *Phys. Plasmas.* 2009. V. 16, № 5. Art. no. 033504055702.
10. *Nakamura Y., Komurasaki K., Fukunari M., Koizumi H.* Numerical analysis of plasma structure observed in atmospheric millimeter-wave discharge at under-critical intensity // *J. Appl. Phys.* 2018. V. 124, № 3. Art. no. 033303.
11. *Водопьянов А.В., Разин С.В., Сафронова М.И., Сидоров А.В., Фокин А.П.* Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43, № 10. С. 10-17.
12. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И. и др.* Релятивистские много-волновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение. 1991. 296 с.
13. *Benford J., Swegle J., Schamiloglu E.* High power microwaves. Second ed. Taylor & Francis. 2007. 552 p.

14. Xiao R.Z., Zhang X.W., Zhang L.J., Li X.Z., Zhang L.G., Song W., Hu Y.M., Sun J., Huo S.F., Chen C.H., Zhang Q.Y., Liu G.Z. Efficient generation of multi-gigawatt power by a klystron-like relativistic backward wave oscillator // *Laser and Particle Beams*. 2010. V. 28, № 5. P. 505-511.

15. Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., Klimov A.I., Kopenkin A.D., Koshelev V.I., Popov V.A., Slepkov A.I. Relativistic multiwave Cherenkov generators // *IEEE Trans. On Plasma Sci*. 1990. V.18, № 3. P. 525.

16. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A., Mesyats G.A., Pedos M.S., Phelps A.D.R., Romanchenko I.V., Rostov V.V., Rukin S.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Yalandin M.I., Zotova I.V. Generation of Electromagnetic Fields of Extremely High Intensity by Coherent Summation of Cherenkov Superradiance Pulses // *Phys. Rev. Lett*. 2015. V. 115, № 11. Art. no. 114802.

17. Братман В.Л., Губанов В.П., Денисов Г.Г. и др. Экспериментальное исследование секционированного СВЧ генератора с релятивистским электронным пучком // *Письма в ЖТФ*. 1988. Т. 14, № 1. С. 9-13.

18. Wu D., Shu T., Ju J., Peng Sh. Gigawatt-class radiation generated by a Ka-band overmoded Cherenkov-type high power millimeter wave generator // *Review of Scientific Instruments*. 2015. V. 86, № 8. Art. no. 084706.

19. Rostov V.V., Totmeninov E.M., Tsygankov R.V. et al. Two-Wave Ka-Band Nanosecond Relativistic Cherenkov Oscillator // *IEEE Trans Electron*. 2018. Dev. V. 65, № 7. P. 3019.

20. Wang D., Teng Y., Li S., Shi Y., Cao Y. et al. Optimizing and experimental investigation of a Ka-band relativistic backward wave oscillator operating at TM₀₂mode // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, Japan, P. 1-2.

21. Li X., Wang J., Sun J., Song Z. et al. Experimental study on a high-power subterahertz source generated by an overmoded surface wave oscillator with fast startup // *IEEE Trans Electron. Dev*. 2013. V. 60, № 9. P. 2931-2935.

22. Wang J., Wang G., Wang D., Li S., Zeng P. A megawatt-level surface wave oscillator in Y-band with large oversized structure driven by annular relativistic electron beam // *Sci. Reports* 8 (2018) 6978.

23. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V. et al. Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a Free-Electron Maser // *Phys. Rev. Lett*. 2016. V. 117. Art. no.114801.

24. Peskov N.Yu., Ginzburg N.S., Malkin A.M. et al. Development of powerful long-pulse Bragg FELs operating from sub-THz to THz bands based on linear induction accelerators: recent results and projects // *EPJ Web of Conferences*. 2018. V. 195. Art. no. 01010.

25. Flyagin V.A., Gaponov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The Gyrotron // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1977. V. 25, № 6. P. 514-521.

26. *Ковалев Н.Ф., Петелин М.И.* Селекция мод в высокочастотных релятивистских электронных генераторах с распределенным взаимодействием // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения (Материалы II Всесоюзного семинара г. Томск 1980 г.), Горький, 1981. С. 62.
27. *Власов С.Н., Орлова И.М., Петелин М.И.* Резонаторы гиротронов и электродинамическая селекция мод // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький, 1981. С. 62
28. *Петелин М.И.* Электронная селекция мод в гиротроне // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький, 1981. С. 77.
29. *Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Мусеев М.А.* О повышении КПД релятивистского гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 4. С. 345.
30. *Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Мусеев М.А., Нечаев В.Е., Петелин М.И., Розенталь Р.М.* Десятимегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 914.
31. *Завольский Н.А., Иляков Е.В., Калынов Ю.К., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С.* Мощный релятивистский гиротрон миллиметрового диапазона длин волн на второй циклотронной гармонике // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 1. С. 44.
32. *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S.* Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers // Int. J. Electron. 1981. V. 51, № 4. P. 541.
33. *Destler W.W., Irwin K., Lawson W., Rodgers J., Segalov Z.* Intense beam fundamental mode large-orbit gyrotron studies // J. Appl. Phys. 1989. V. 66, № 9.
34. *Black W.M., Gold S.H., Fliflet A.W., Kirkpatrick D.A., Manheimer W.M., Lee R.C., Granatstein V.L., Hardesty D.L., Kinkead A.K., Sucey M.* Megavolt, multikiloamp Ka band gyrotron oscillator experiment // Phys. of Fluids B: Plasma Phys. 1990. V. 2, № 1. P. 193-198.
35. *Radack D.J., Ramaswamy K., Destler W.W., Rodgers J.* A fundamental mode, high-power, large-orbit gyrotron using a rectangular interaction region // J. Appl. Phys. 1993. V. 73, № 12. P. 8139.
36. *Планкин О.П., Семенов Е.С.* Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования пушки гиротрона. Инструкция для пользователя. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. 32 с.
37. *Glyavin M., Zotova I., Rozental R., Malkin A., Sergeev A., Fokin A., Rumyantsev V., Morozov S.* Investigation of the frequency double-multiplication effect in a sub-THz gyrotron // J. Infrared Millim. THz Waves. 2020. V. 41. P. 1245-1251.
38. *Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Юлтаев В.К.* Циклотронные и синхротронные мазеры / В кн. "Релятивистская высокочастотная электроника". – Горький: ИПФАН СССР, 1979. – С. 157-216.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

A1. *Abubakirov E.B., Chirkov A.V., Denisov G.G., Guznov Yu.M., Kornishin S.Yu., Leontyev A.N., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Tarakanov V.P., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Zapevalov V. E.* W-Band 5 MW Pulse Relativistic Gyrotron // *IEEE Trans. on Electron. Devices.* 2017. V. 64, № 4.

A2. *Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Fedotov A.E., Leontyev A.N., Rozental R.M., Tarakanov V.P.* Electron-optical system for a high-current Ka-band relativistic gyrotron // *Physics of Plasmas.* 2019. V. 26. Art. no. 033302.

A3. *Вилков М.Н., Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Тараканов В.П.* Моделирование сильноточного релятивистского гиротрона на ТМ-моду продольно-щелевого резонатора. // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].* 2019. № 2.

A4. *Леонтьев А.Н., Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Гузнов Ю.М., Розенталь Р.М., Федотов А.Э., Тараканов В.П.* Возможности увеличения мощности излучения сильноточных релятивистских гиротронов при использовании мод ТМ-типа // *Известия РАН: Серия Физическая.* 2020. Т. 84, № 1. С. 82-86.

A5. *Danilov Y.Y., Leontyev A.N., Leontiev N.V., Rozental R.M., Tarakanov V.P., Zheleznov I.V., Abubakirov E.B.* Slit-Type Cavities for Cyclotron Resonance Masers Operating at TM Modes // *IEEE Trans. on Electron. Devices.* 2021. V. 68, № 4. P. 2130-2132.

A6. *Данилов Ю.Ю., Денисенко А.Н., Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Тараканов В.П.* Разработка сильноточных релятивистских гиротронов с рабочей модой ТМ-типа // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2022. Т. 65, № 5. С. 448-464.

A7. *Гинзбург Н.С., Данилов Ю.Ю., Леонтьев А.Н., Малкин А.М., Розенталь Р.М., Щегольков Д.Ю.* Высокоселективные сверхразмерные щелевые резонаторы для релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона // *ДАН. Физика, технические науки.* 2022. Т. 504. С. 3-9.

A8. *Rozental R.M., Danilov Yu.Yu., Leontyev A.N., Malkin A.M., Shchegolkov D. Yu., Tarakanov V.P.* Spatial Synchronization of TE-Modes in a Slit-Type Gyrotron Cavity // *IEEE Trans. on Electron. Devices.* 2022. V. 69, № 3. P. 1451-1456.

A9. *Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С.* Возбуждение высоких циклотронных гармоник в сильноточном релятивистском гиротроне в режиме умножения частоты // *Письма в ЖТФ.* 2022. Т. 48, № 24. С. 11.

A10. *Леонтьев А.Н., Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Малкин А.М., Сергеев А.С.* Умножение частоты в сильноточном релятивистском гиротроне для получения мощного излучения терагерцового диапазона // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* 2023. № 1, том 87. С. 56-60.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	3
Глава 1. Релятивистский гиротрон W-диапазона на базе термоэмиссионной магнетронно-инжекторной пушки. Разработка и экспериментальное исследование.	12
Введение.....	12
1.1 Расчет и оптимизация параметров мультимегаваттного релятивистского гиротрона W-диапазона.	16
1.2 Экспериментальное исследование мультимегаваттного релятивистского гиротрона W-диапазона.	25
Заключение к главе 1.....	31
Глава 2. Исследование релятивистских гиротронов Ka-диапазона длин волн на базе взрывоэмиссионных катодов.	33
Введение.....	33
2.1 Разработка электронно-оптической системы гиротрона на базе взрывоэмиссионного катода.....	35
2.2 Продольно-щелевой резонатор для сильноточных гиротронов с сильной дискриминацией мод TE-типа.	47
2.3 Расчет и оптимизация взаимодействия сильноточного электронного пучка с модами TE и TM-типов.	57
2.4 Экспериментальное исследование сильноточных релятивистских гиротронов Ka-диапазона.....	65
Заключение к главе 2.....	74
Глава 3. Перспективы получения импульсного субтерагерцового излучения большой мощности с помощью сильноточных релятивистских гиротронов	75
Введение.....	75
3.1. Высокоселективные сверхразмерные щелевые резонаторы для релятивистских гиротронов субтерагерцового диапазона частот.	77
3.2. Генерация мощного субтерагерцового излучения в сильноточных релятивистских гиротронах в режиме умножения частоты.....	93
Заключение к главе 3.....	106
Заключение	107
Список трудов автора по теме диссертации	108
Список литературы.....	112

ЛЕОНТЬЕВ Александр Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ГИРОТРОНОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 15.06.2023.
Формат $60 \times 90^{1/16}$. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 19(2023).

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