

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

На правах рукописи

Фокин Андрей Павлович

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ С РЕКОРДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

01.04.03 – радиофизика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, доцент
Глявин Михаил Юрьевич

Нижний Новгород – 2018

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Стабилизация и управление параметрами излучения гиротронов среднего уровня мощности	12
1.1. Стабилизация частоты излучения отражением от нерезонансной нагрузки	13
1.1.1 Эксперимент с низкочастотным гиротроном с короткой линией задержки	14
1.1.2 Эксперимент с высокочастотным гиротроном с удлиненной линией задержки	26
1.2 Быстрая модуляция параметров излучения гиротрона	31
1.3 Стабилизация частоты излучения гиротрона при помощи системы фазовой автоподстройки частоты за счет управления анодным напряжением	38
Заключение к главе 1	42
Глава 2. Разработка мощных субтерагерцовых гиротронов для плазменных исследований	44
2.1 Гиротрон для перспективных установок управляемого термоядерного синтеза будущего поколения	44
2.1.1 Особенности конструкции и основные расчетные параметры	45
2.1.2 Испытательный стенд и экспериментальные результаты	53
2.2 Гиротрон для создания локализованного газового разряда	61
2.2.1 Конструкция и расчетные параметры гиротрона	62
2.2.2 Экспериментальное исследование гиротрона	66
Заключение к главе 2	70
Заключение	71
Приложение 1. Описание расчетных моделей гиротрона	72
Приложение 2. Компенсация эффектов провисания потенциала в мощных гиротронах с импульсным режимом работы	76
Список трудов автора по теме диссертации	86
Список цитированной литературы	90

Введение

Актуальность темы

Одним из аспектов современной радиофизики является активное продвижение источников излучения в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны. Это вызвано развитием таких перспективных фундаментальных и практических приложений этих источников, как, например, электронно-циклотронный нагрев плазмы и управление током [1], задачи биофизики [2], спектроскопия высокого разрешения [3], визуализация скрытых объектов [4]. Большинство таких приложений требуют не только повышения частоты излучения, но и увеличения выходной мощности источников. Среди применяющихся на практике источников терагерцового излучения можно выделить лампы обратной волны (ЛОВ), твердотельные источники (диоды Ганна и квантовые каскадные лазеры) и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [5]. Однако, часть таких источников, например, ЛОВ или твердотельные приборы, характеризуется относительно низким уровнем выходной мощности, на уровне от микроватт до десятков милливатт. Другие, например, ЛСЭ, обладают мощностями более киловатта, однако их размеры и стоимость не позволяют использовать их в качестве мобильных и технологичных приборов для получения излучения в терагерцовом диапазоне. С этой точки зрения во многих случаях наиболее перспективным вариантом являются гиротроны – разновидность мазеров на циклотронном резонансе, которая сочетает компактность, высокую мощность и высокий КПД. Принцип работы гиротрона основан на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [6]. Основной особенностью гиротронов, позволяющей достичь большой мощности и высокого КПД, является взаимодействие винтового электронного пучка с собственной модой круглого волновода около критической частоты [7]. Взаимодействие электронов с быстрыми волнами (фазовая скорость которых много больше скорости света), позволяет отказаться от использования замедляющих систем и тем самым исключить мелкомасштабные элементы с размером порядка длины волны, затрудняющие или делающие невозможным изготовление приборов на медленных волнах в суб-ТГц и ТГц диапазонах. В отличие от использования медленных волн, локализованных вблизи замедляющих систем, использование быстрых волн позволяет увеличить пространство взаимодействия и, тем самым, существенно повысить мощность выходного излучения.

Гиротрон сочетает в себе преимущества как классических электронных приборов, в которых каждый электрон может излучить большое число квантов, так и лазеров, в которых

электромагнитные волны взаимодействуют с протяженной активной средой. Взаимодействие электронов с электромагнитной волной в гиротроне происходит при выполнении условия циклотронного резонанса:

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} \approx n\Omega \quad (B1)$$

В (B1) Ω - циклотронная частота, n – номер циклотронной гармоники, k_{\parallel} - продольное волновое число волны с частотой ω , v_{\parallel} - дрейфовая (продольная) скорость электронов. Поскольку взаимодействие электронов происходит с быстрыми волнами, распространяющимися вблизи критической частоты практически поперек дрейфового движения электронов (с малым k_{\parallel}), то обеспечивается малая чувствительность к разбросу электронов по скоростям, что выгодно отличает гиротроны от классических приборов вакуумной электроники, основанных на взаимодействии с медленными волнами. Отсутствие замедляющих систем позволяет снимать проблему как уменьшения расстояния от электронного пучка до поверхности электродинамической системы, так и общей миниатюризации элементов, приводящей к резкому падению мощности с укорочением длины волны, и связанных с ней сложностей электрической прочности и отвода тепла.

Основными элементами современных гиротронов являются: электронно-оптическая система (катод 1 и анод 2 на Рисунке B1), формирующая винтовой электронный пучок (3), значительная доля энергии которого содержится во вращательной энергии электронов; электродинамическая система (4), обеспечивающая селекцию рабочей моды цилиндрического резонатора, с которой происходит взаимодействие электронного пучка; коллектор электронов (5) и система вывода излучения (6), включающая выходное окно и, при необходимости, квазиоптический преобразователь рабочей моды в вид, удобный для дальнейшей передачи по волноводному тракту или квазиоптической линии. Магнитное поле, необходимое для обеспечения циклотронного резонанса электронного пучка с высокочастотным полем создается при помощи различного типа магнитных систем (7). Для гиротронов суб-ТГц и ТГц диапазонов, как правило, используются либо импульсные магнитные системы, позволяющие достичь магнитных полей с индукцией порядка 30 Тл, достаточной для работы приборов на основном циклотронном резонансе, либо сверхпроводящие криомагниты с характерной величиной поля 10 – 15 Тл, для работы на гармониках циклотронной частоты.

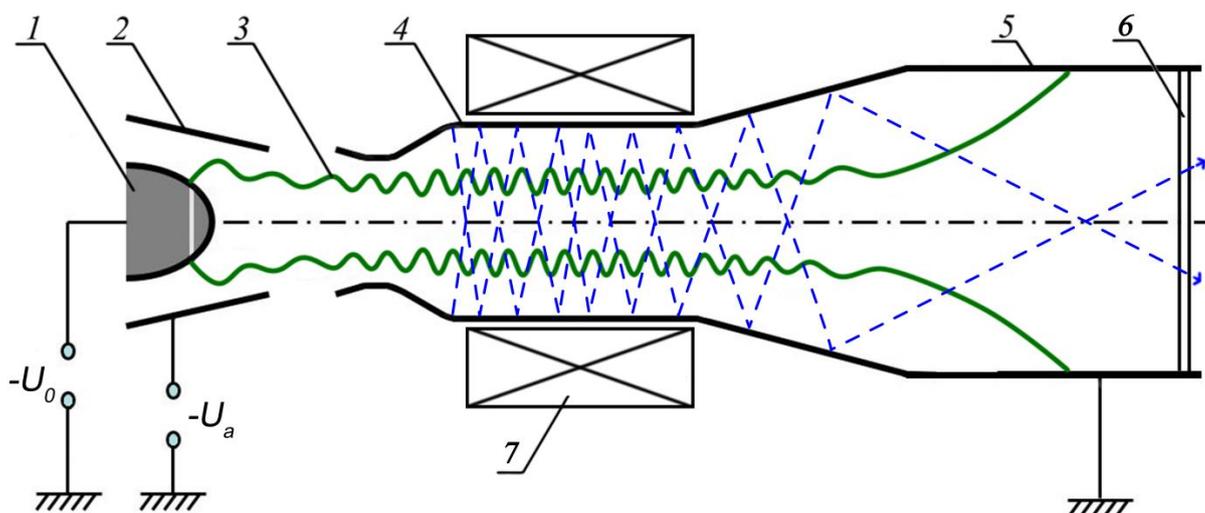


Рисунок В1: Общая схема гиротрона: 1 – катод, 2 – анод, 3 – электронный пучок, 4 – резонатор, 5 – коллектор, 6 – выходное окно, 7 – магнитная система

Результатом более чем полувековых исследований гиротронов [8] стало создание источников излучения с высоким значением КПД (до 70% в системах с рекуперацией энергии электронного пучка) и рекордной мощностью в различных частотных диапазонах (более 1 МВт на частоте 170 ГГц [9], 200 кВт на частоте 670 ГГц [10] и 0.5 кВт на 1.3 ТГц [11]). В суб-ТГц диапазоне [12], мощность и эффективность гиротронов на несколько порядков превосходят аналогичные параметры твердотельных генераторов [13,14] и приборов классической вакуумной электроники [15,16]. По сравнению с лазерами на свободных электронах [17,18], размеры, энергии электронов и стоимость установок на основе гиротронов оказываются существенно меньше, что позволяет использовать их в большем числе приложений. Гироприборы уже успешно используются в задачах электронно-циклотронного нагрева плазмы (ЭЦН) и управления током [19,20], диагностике плазмы [21,22], создании комплексов высокотемпературной обработки материалов [23], производстве нанопорошков [24], спектроскопии и других приложениях [25].

Развитие существующих и появление новых приложений стимулируют исследования в области создания новых источников излучения в суб-ТГц и ТГц диапазонах, при этом кроме задачи продвижения в область больших частот и больших мощностей, возникают задачи управления параметрами излучения, создания компактных источников, автоматизации и упрощения процесса работы комплексов. В связи с этим, в настоящее время работы по совершенствованию гиротронов суб-ТГц и ТГц диапазонов ведутся в ряде мировых ведущих научных центров, занимающихся приборами вакуумной электроники. Так, в исследовательском

центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония) исследуются различные подходы к созданию высокочастотных гиротронов [26] и возможности по стабилизации [27] и управлению параметрами излучения [28]. В Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Карлсруэ, Германия) разрабатываются и испытываются мощные гиротроны для нагрева и диагностики плазмы [20]. В Массачусетском технологическом институте (MIT, США) ведутся разработки гиротронов для спектроскопии [29] и ТГц видения [30]; в Университете Мэриленда (UMD, США) исследуются возможности удаленного детектирования источников ионизирующего излучения [31]. Исследования гиротронов и их компонентов ведутся в научно-исследовательской компании Calabasas Creek Research (США) [32] и Терагерцовом научном центре (THz RC, Чэнду, Китай) [33]. В области компонентов и источников для спектроскопии высокого разрешения созданы коммерческие компании, например Bridge 12 (США) [34] и подразделение Bruker-Biospin (использующее суб-ТГц гиротроны производства компании Communication & Power Industries, США) [35]. В Институте прикладной физики Российской академии наук также активно ведется разработка и исследование гиротронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Так в последние годы были достигнуты рекордные значения частоты и мощности как в импульсных системах (частота 1 ТГц при мощности более 1.5 кВт) [36], так и в гиротронах с непрерывным режимом работы (частота 0.3 ТГц и мощность более 2.5 кВт) [37].

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

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

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

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

Цели диссертации

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

Научная новизна

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

Апробация результатов работы

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

Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A49] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании взаимодействия электронов с полем резонатора, численном моделировании режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Экспериментальные исследования проводились в составе группы ученых и инженеров, обеспечивавших работу гиротронных комплексов. 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, двух глав, заключения, двух приложений, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 96 страниц, включая 53 иллюстрации, 4 таблицы и список литературы из 105 наименований. Список публикаций автора по теме диссертации содержит 49 наименований.

Краткое содержание работы

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

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

В п. 1.1 рассматривается возможность стабилизации частоты излучения гиротрона при помощи частичного отражения выходного сигнала от нерезонансной нагрузки. Приведены результаты экспериментов с несколькими гиротронами с различными частотами излучения (28 ГГц и 231 ГГц), в которых показана возможность стабилизации частоты и уменьшения ширины спектра излучения, а также продемонстрирована возможность плавной перестройки параметров излучения с характерными временами порядка секунды за счет механического изменения параметров нерезонансного отражателя.

В п. 1.2. обсуждаются возможности быстрого управления параметрами излучения гиротронов при помощи модуляции напряжения на аноде триодной магнетронно-инжекторной пушки. Выполнено моделирование зависимости частоты излучения от напряжения и соответствующих параметров электронного пучка, определены требования к параметрам и быстродействию системы управления. В реализованной на основе сделанных расчетов системе управления продемонстрирована возможность контроля частоты и мощности излучения с частотой модуляции до 1 МГц, и предложены дальнейшие пути усовершенствования системы. Продемонстрирована возможность использования возможностей по модуляции излучения гиротрона в задачах связи и телекоммуникаций.

В п. 1.3. рассмотрена система стабилизации частоты излучения гиротрона на основе цепи фазовой автоподстройки частоты с использованием системы управления, разработанной в п. 1.2. В исследуемой схеме продемонстрирована рекордная стабилизация частоты излучения гиротрона для спектроскопии с частотой 263 ГГц, позволяющая уменьшить ширину спектра излучения с 0.5 МГц до 1 Гц, реализуя относительную ширину линии равную $4 \cdot 10^{-12}$ при относительной долговременной стабильности до 10^{-12} . Полученные результаты открывают новые возможности для спектроскопических исследований и позволяют создавать "мастер-генераторы" для обеспечения когерентности большого количества гиротронов.

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

Так, в п. 2.1. приведены основные результаты теоретического исследования, выполненного в процессе разработки прототипа гиротрона для перспективных систем управляемого термоядерного синтеза будущего поколения, и показаны результаты экспериментального исследования прототипа. Продемонстрирована возможность достижения выходной мощности более 300 кВт на частоте генерации 250 ГГц в импульсном режиме с КПД генерации более 30%. В ходе проведенных экспериментальных исследований получены зависимости мощности от параметров для различных режимов работы, выполнено сравнение с результатами численного моделирования и сделаны выводы о соответствии реальных параметров электронного пучка результатам численного моделирования.

В п. 2.2. приводятся результаты долговременного исследования мощного импульсного гиротрона с частотой 670 ГГц для создания локализованного газового разряда. Показаны результаты исследования отдельных элементов электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона, предложены пути модернизации гиротрона для расширения области допустимых режимов работы.

В приложении 1 описаны основные аналитические модели гиротрона, использовавшиеся для численного моделирования нелинейных процессов электронно-волнового взаимодействия: с фиксированной продольной структурой поля, и самосогласованная модель с нефиксированной структурой поля.

В приложении 2 представлены результаты численного моделирования влияния провисания потенциала, связанного с пространственным зарядом электронного пучка на выходные параметры излучения гиротронов со сверхразмерными электродинамическими системами. Рассмотрено изменение рабочих параметров гиротрона, связанное с изменением энергии электронов в процессе ионной компенсации пространственного заряда, предложены пути компенсации снижения эффективности электронно-волнового взаимодействия вследствие падения энергии электронов, определена требуемая точность расчета уровня ионной компенсации для дальнейшей оптимизации параметров гиротронов.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

Глава 1. Стабилизация и управление параметрами излучения гиротронов среднего уровня мощности

Применение гиротронов субтерагерцового диапазона в задачах электронно-циклотронного нагрева плазмы и подавления плазменных неустойчивостей [38,39], создания источников многозарядных ионов для дальнейшего применения в медицине [40,41], в технологических приложениях [23] и в области спектроскопии [42] требует решения задачи контроля, управления и стабилизации параметров излучения гиротронов, а именно частоты и мощности. При этом должны учитываться как естественные процессы внутри гиротрона, связанные с формированием, прохождением и оседанием большой плотности тока, так и эффекты, связанные с флуктуациями параметров источников питания, систем охлаждения и магнитных систем. К внутренним процессам можно отнести флуктуации параметров электронных пучков с учетом отражения электронов от магнитной пробки [43], процессы термического расширения резонатора гиротрона в процессе работы [44], влияющие на частоту излучения. Внешние возмущения, такие как флуктуации технических параметров источников питания гиротрона также приводят к изменению условий взаимодействия электронов с высокочастотным полем, и, тем самым, к изменению частоты и мощности излучения [45].

Задача стабилизации или управления параметрами излучения гиротронов может быть решена несколькими путями, включающими в себя как активные, так и пассивные методы. Для типичного современного гиротрона с триодной магнетронно-инжекторной пушкой и системой вывода излучения с квазиоптическим преобразователем система управления и стабилизации может быть построена с применением:

1. Пассивных методов на основе:

1.1. Захвата гиротрона внешним сигналом [46], позволяющего осуществлять стабилизацию и перестройку частоты гиротрона за счет инъекции сигнала от внешнего стабилизированного и управляемого источника с мощностью, составляющей несколько процентов от мощности гиротрона;

1.2. Воздействия отраженного сигнала на режимы генерации гиротрона [47], путем ввода части выходного излучения гиротрона, отраженного от удаленной резонансной или нерезонансной нагрузки. Манипуляция параметрами отражателя позволяет осуществлять управление режимом генерации.

Недостатком пассивных методов является необходимость использования систем вывода излучения, допускающих ввод внешнего сигнала в резонатор гиротрона [48], а также повышение нагрузки на элементы электродинамической системы, что является особенно критичным для мощных гиротронов.

2. Активного управления одним или несколькими техническими параметрами гиротрона:

2.1. Ведущим магнитным полем – позволяет активно перестраивать частоту генерации гиротрона и мощность излучения за счет изменения циклотронной частоты; однако быстродействие данного метода существенно ограничено возможностями криомагнитов по скорости изменения тока сверхпроводящих соленоидов, а в случае использования дополнительных катушек – экранированием переменного магнитного поля [49].

2.2. Ускоряющим напряжением – активно используемый метод стабилизации частоты электронных приборов разных типов, требующий, однако, сложных и дорогостоящих источников питания, позволяющих быстро изменять ускоряющее напряжение при существенном (от единиц до сотни ампер) токе пучка [27].

2.3. Анодным напряжением – позволяет изменять питч-фактор (отношение поперечной и продольной скоростей электронов) электронного пучка, изменяя таким образом условия взаимодействия электронов с ВЧ полем в резонаторе гиротрона и результирующую частоту излучения [50].

Ниже приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований систем стабилизации и управления параметрами излучения гиротронов на основе обоих подходов к построению систем управления.

1.1. Стабилизация частоты излучения отражением от нерезонансной нагрузки

Теоретическое исследование возможности стабилизации частоты гиротрона за счет использования волны, отраженной от удаленной нагрузки исследовалось в большом количестве публикаций [51–53] в рамках различных моделей описания гиротрона, как с фиксированной структурой поля, так и в рамках самосогласованных моделей с нефиксированной продольной структурой поля. Однако, до недавнего времени [47] отсутствовали развернутые экспериментальные исследования воздействия отражений на режимы работы гиротрона и стабильность частоты излучения.

Для экспериментального исследования воздействия сигнала, отраженного от удаленной нерезонансной нагрузки, на режимы работы гиротрона и стабильность частоты излучения были проведены два эксперимента на базе гиротронов различных частотных диапазонов. Принципиальная схема экспериментов по воздействию отраженного сигнала приведена на Рисунке 1.1.1.

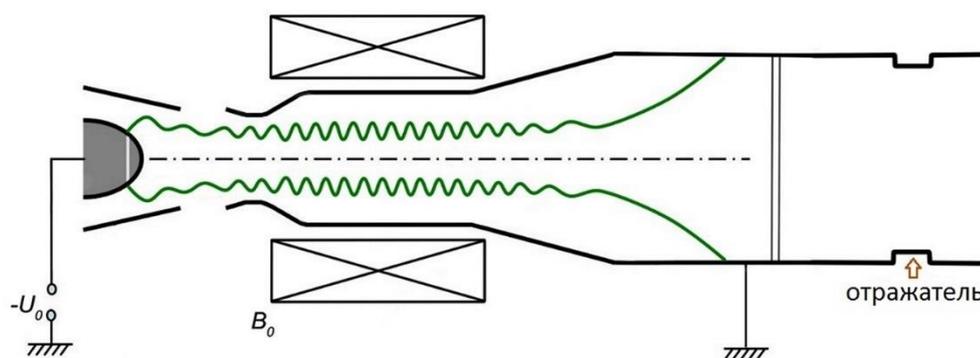


Рисунок 1.1.1: Принципиальная схема гиротрона с нерезонансным отражателем в выходном волноводном тракте

1.1.1 Эксперимент с низкочастотным гиротроном с короткой линией задержки

В первом эксперименте в качестве экспериментальной установки использовался технологический гиротронный комплекс с выходной частотой излучения 28 ГГц и мощностью до 10 кВт при токе пучка до 2 А и ускоряющем напряжении до 25 кВ [23]. Гиротрон работает на второй гармонике циклотронной частоты на симметричной моде TE_{02} . Преимуществом указанного гиротрона для экспериментов с отраженным сигналом является отсутствие встроенного квазиоптического преобразователя, что позволило отказаться от использования специальных квазиоптических систем ввода отраженного излучения [48]. Нерезонансный отражатель представлял собой диафрагму, расположенную в выходном тракте между гиротроном и калориметрической нагрузкой. Диафрагма представляет собой кольцо с внутренним проходным диаметром 27 мм и толщиной 10 мм, установленное в разрезе выходного волноводного тракта диаметром 32.6 мм (Рисунок 1.1.2). Кольцо с такими параметрами обеспечивает коэффициент отражения порядка 8% по мощности в широком диапазоне частот. Электродинамический расчет отражателя был произведен методом конечных разностей во временной области FDTD [54] с заданием на концах волновода поглощающих слоев UPML [55]. На Рисунке 1.1.3 приведена расчетная зависимость коэффициента отражения от частоты для

различных мод волновода. Для исследования влияния фазы отраженного сигнала на режимы работы гиротрона система крепления диафрагмы предусматривала возможность изменения расстояния от окна гиротрона (и, соответственно, резонатора) до отражателя в пределах нескольких длин волн с шагом 2 мм за счет установки проставочных колец.

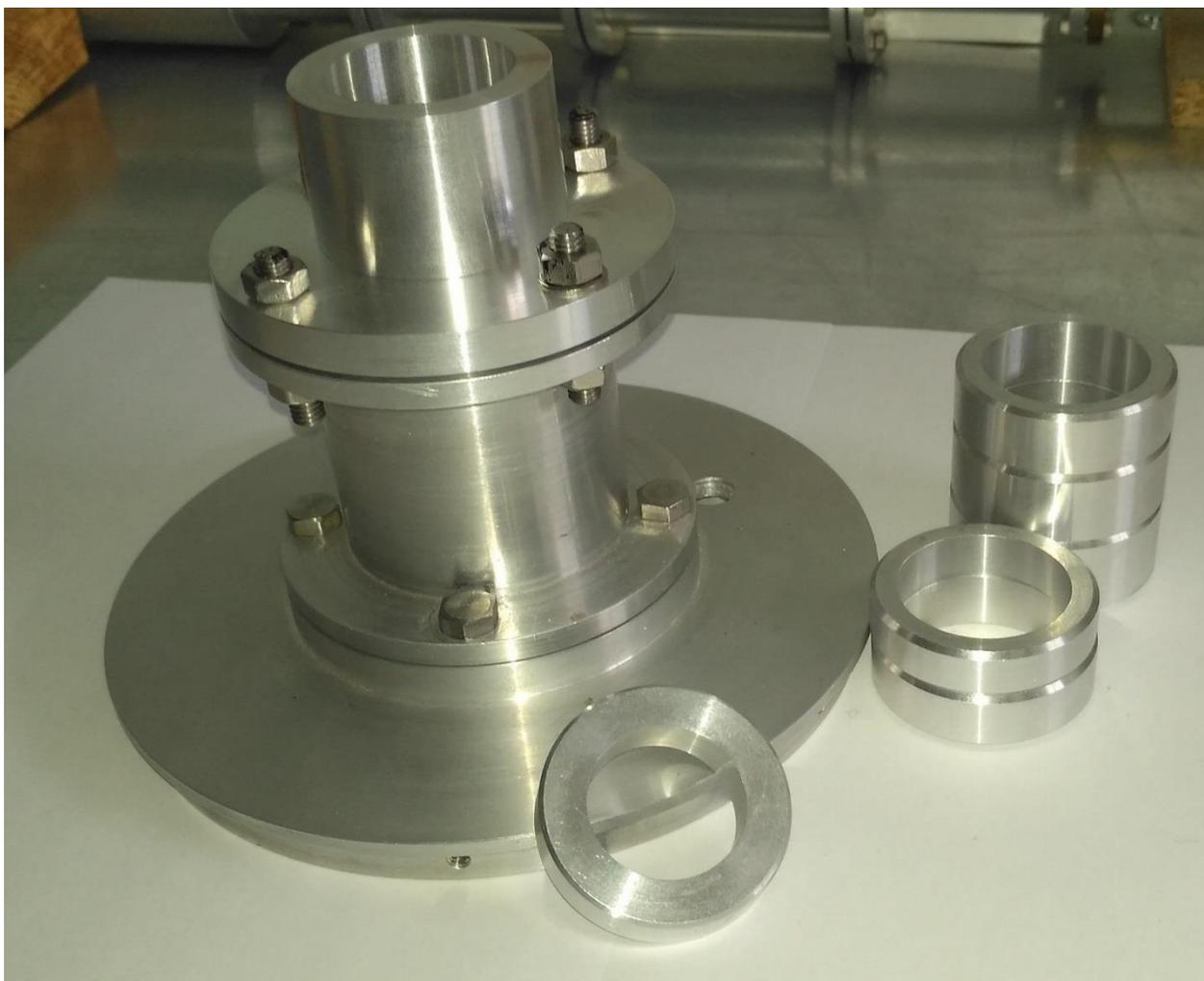


Рисунок 1.1.2: Нерезонансный отражатель (на переднем плане) с набором проставочных колец (справа) и системой крепления в выходном волноводном тракте

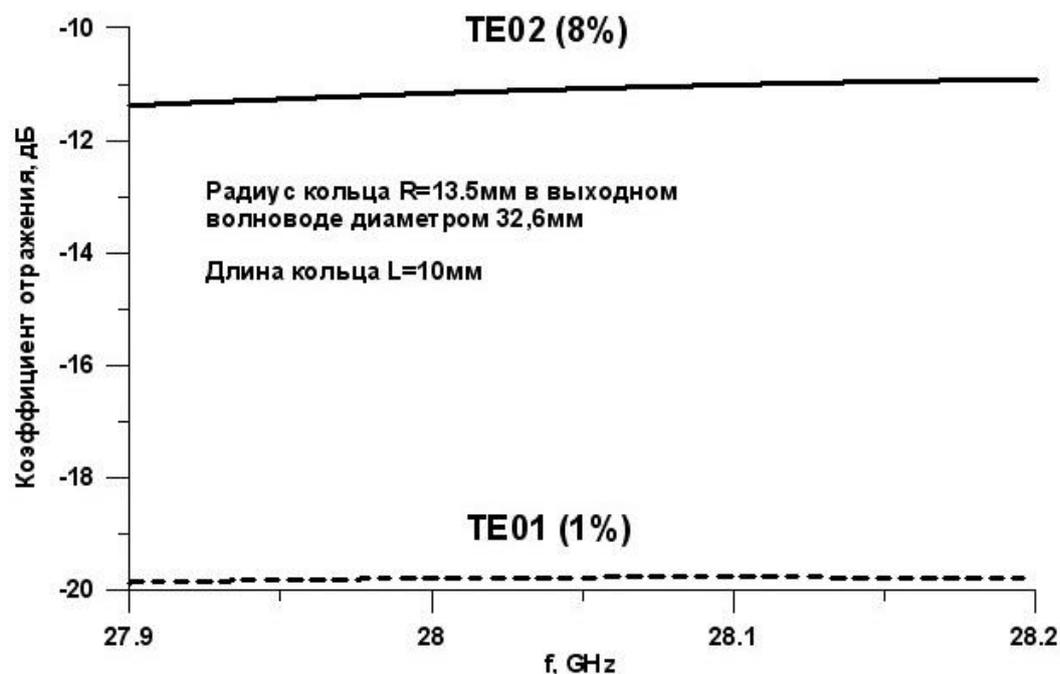


Рисунок 1.1.3: Коэффициент отражения диафрагмы для мод TE_{02} и TE_{01} в зависимости от частоты падающего излучения

Для измерения частоты часть излучения перед калориметрической нагрузкой ответвлялась, и направлялась в спектроанализатор Keysight N9010A [56], измерения мощности выходного сигнала производились при помощи водяного калориметра. Исследование режимов работы в отсутствие и при наличии отражений производились при фиксированном ускоряющем напряжении 19.4 кВ, токе электронного пучка 0.5 А и пич-факторе 1.3, что соответствует максимальной выходной мощности без отражений порядка 2 кВт. Ограничение тока электронного пучка и выходной мощности гиротрона в эксперименте связаны с факторами ограничения тепловых нагрузок на элементы электродинамической системы и стабильности режима генерации. Как было показано в работах [57,58], наличие отражений приводит к снижению бифуркационных значений токов и созданию условий для реализации нестационарных режимов генерации. Для исследования возможностей стабилизации частоты при помощи отражения, исследовалась зависимость частоты генерации от величины ведущего магнитного поля при фиксированных параметрах электронного пучка. Важно отметить, что при таком ограничении тока электронного пучка условия генерации оказываются не оптимальными с точки зрения электронного КПД, с чем в результате оказывается связан эффект возрастания выходной мощности гиротрона при наличии отражений.

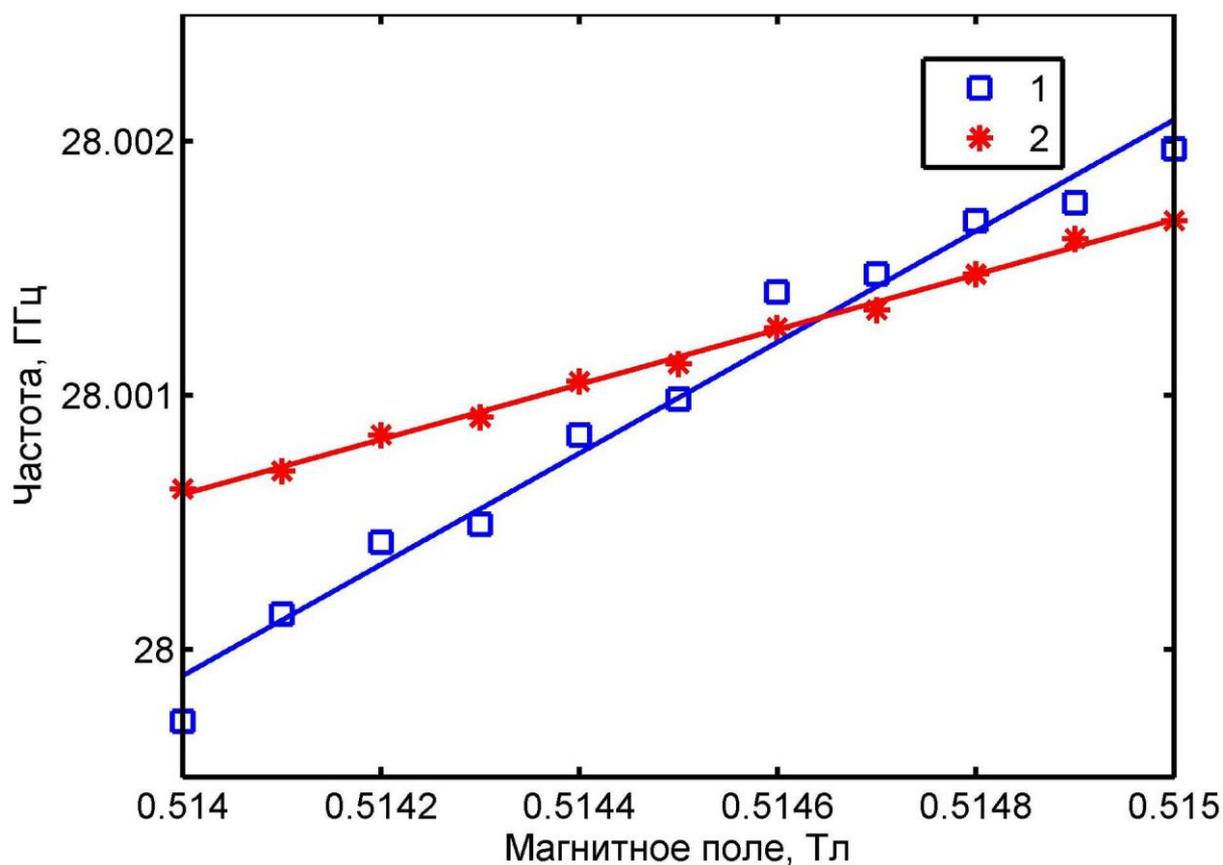


Рисунок 1.1.4: Зависимость частоты генерации гиротрона от магнитного поля без отражений (1) и при отражении 8% мощности (2). Диапазон магнитных полей соответствует области КПД более 20%.

В ходе эксперимента было установлено, что для некоторых положений отражателя, наличие отражения от диафрагмы позволяет получить эффект стабилизации частоты излучения гиротрона в области магнитных полей, соответствующих максимуму выходной мощности и КПД взаимодействия. Экспериментальные зависимости частоты излучения вблизи максимума КПД в случае без отражений и при отражении 8% мощности приведены на Рисунке 1.1.4. Как видно из приведенных графиков, наличие отражений позволяет вдвое сократить диапазон перестройки частоты гиротрона при колебаниях величины магнитного поля.

Исследование зависимости режимов генерации и стабильности частоты от фазы отраженного сигнала производилось путем изменения расстояния от резонатора гиротрона до отражателя путем установки дополнительных проставочных колец. На Рисунке 1.1.5 приведены характерные зависимости частоты (Рисунок 1.1.5, (а)) и мощности (Рисунок 1.1.5, (б)) излучения от величины магнитного поля для различных расстояний от окна гиротрона до отражателя. В ходе эксперимента была обнаружена периодическая зависимость параметров излучения (мощности и частоты) от положения отражателя с периодом, соответствующим длине волны

излучения. Так, пунктирная кривая «1» на Рисунке 1.1.5 соответствует случаю гиротрона без отражений. Кривые «2» и «3» на Рисунке 1.1.5(а) соответствуют разнице положений отражателя на $\lambda/2$, тогда как кривая «4» соответствует сдвигу на $\lambda/4$. При «благоприятной» фазе отраженного сигнала, определяемой набегом фазы $2\pi n$ (кривые «2» и «3»), происходит стабилизация частоты и возрастание мощности по измерениям калориметра, кроме того расширяется зона генерации (кривая «2» на Рисунке 1.1.5(б)). При сдвиге отражателя на величину порядка четверти длины волны от «благоприятного» положения (набег фазы $\pi(2n+1)$) наблюдается существенное падение выходной мощности (до 1 кВт), сужение рабочей зоны гиротрона и увеличение диапазона перестройки частоты вдвое по сравнению с безотражательной конфигурацией (кривая «4» на Рисунке 1.1.5(а)). Изменение длины линии задержки при сохранении «благоприятной» фазы отраженного сигнала позволяет перестраивать частоту излучения гиротрона в пределах 4-5 МГц с сохранением эффекта стабилизации частоты в области максимальной выходной мощности (области меньших магнитных полей).

В силу уменьшения зависимости частоты генерации от расстройки циклотронного резонанса Δ (зависящей как от магнитного поля, так и от энергии электронов, см. Приложение 1) [53,59], полученное снижение чувствительности частоты генерации к изменению величины магнитного поля должно сопровождаться и уменьшением ширины спектра излучения гиротрона, определяемой в основном флуктуациями ускоряющего напряжения. На Рисунке 1.1.6 приведены полученные спектры излучения гиротрона без отражения (Рисунок 1.1.6 «а») и при наличии отражений (Рисунок 1.1.6 «б»).

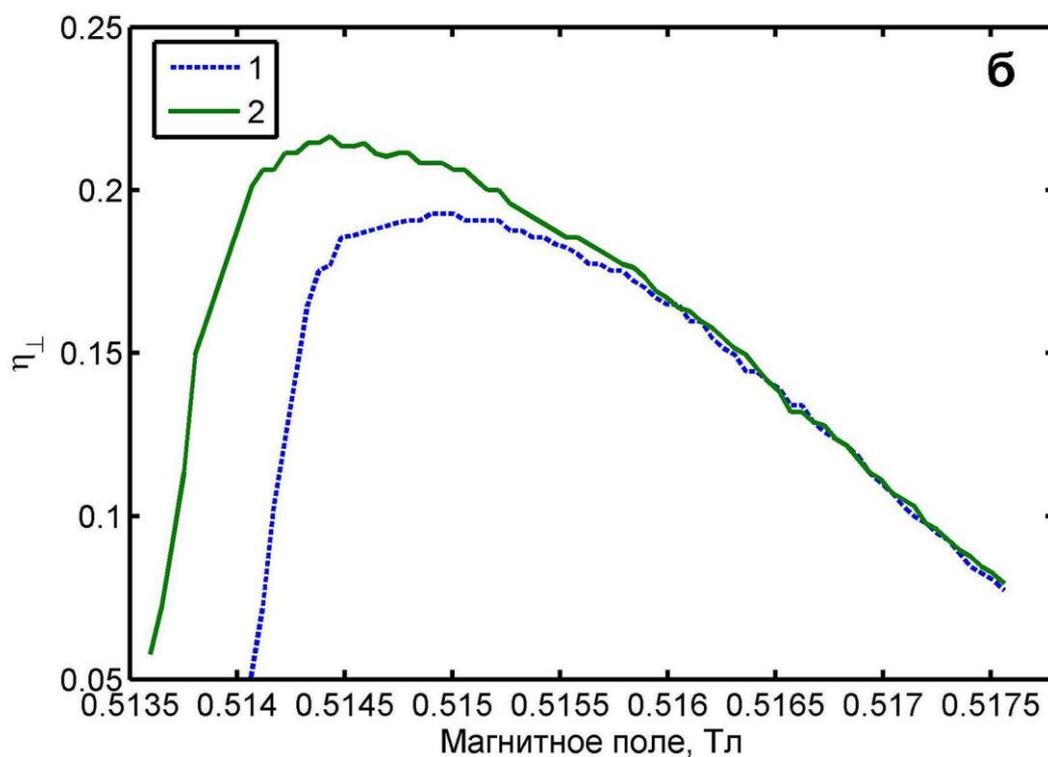
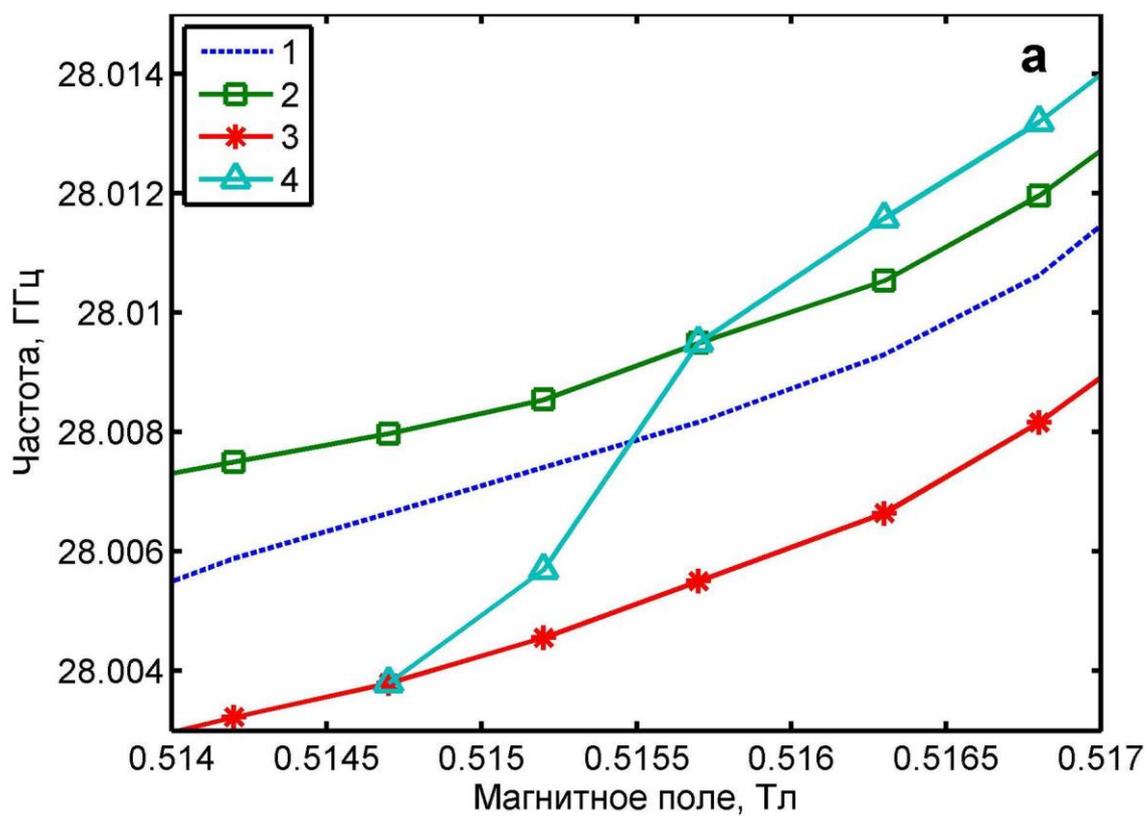


Рисунок 1.1.5: Зависимость частоты (а) и мощности (б) излучения гиротрона от магнитного поля при различных положениях отражателя. Пунктирной линией (1) показаны зависимости параметров в отсутствие отражения; (2), (3) – при набеге фазы $2\pi n$ и $2\pi(n+1)$ соответственно; (4) – при набеге фазы $2\pi n + \pi$. Коэффициент отражения 8% по мощности.

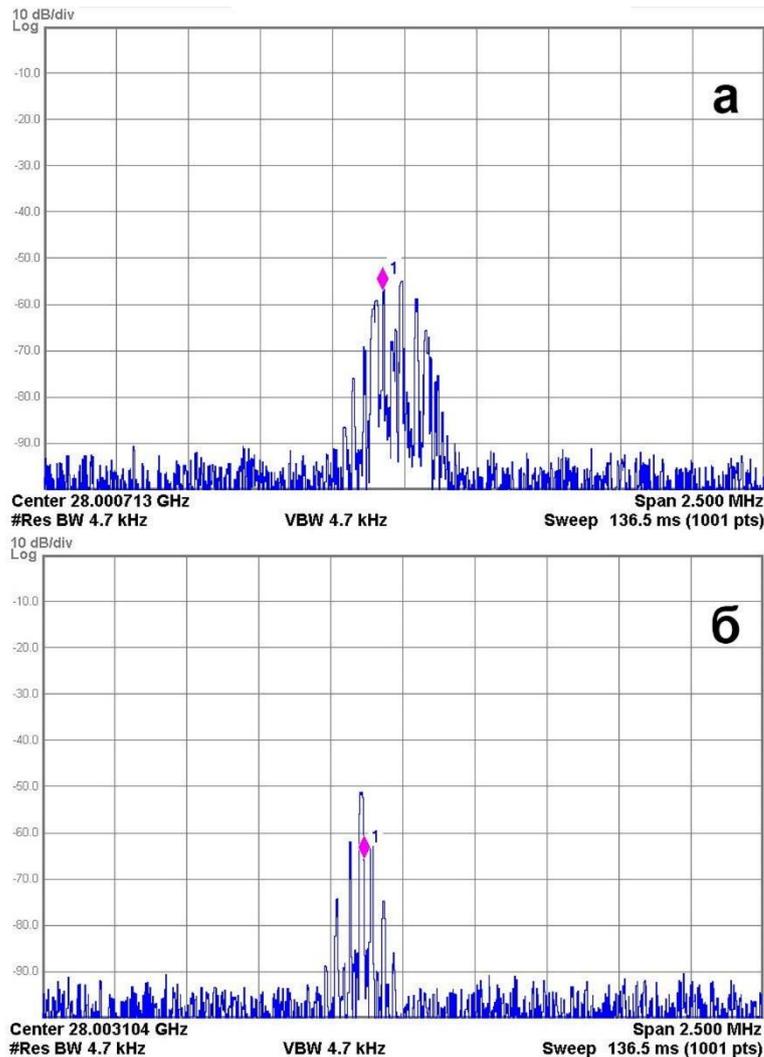


Рисунок 1.1.6: Спектр излучения гиротрона в отсутствии отражений (а) и при положительном воздействии отражений (набег фазы $2\pi n$) (б)

С точки зрения теории, условия данного эксперимента удовлетворяют случаю, при котором ширина полосы захвата гиротрона отраженным сигналом $\Delta\omega_R \approx |R|\omega_0/Q$, где R – коэффициент отражения, ω_0 – частота излучения, Q – добротность резонатора гиротрона, оказывается меньше, чем разность частот между продольными модами $\Delta\omega_m \approx \pi/T$, где T – время запаздывания отраженного сигнала. При этом в полосе захвата может возбуждаться лишь одна продольная мода полной электродинамической системы, включающей резонатор гиротрона и волноводный тракт с отражателем. Полученные в эксперименте результаты хорошо соответствуют результатам аналитических оценок и численного моделирования, проведенным в [51,53] – отсутствию резких скачков частоты из-за перехода между различными продольными модами и возможности стабилизации частоты приблизительно в два раза по сравнению с гиротроном без отражений.

Интерпретация зависимости выходной мощности гиротрона при наличии отражений от длины линии задержки производилась с использованием программного комплекса для численного моделирования гиротронов с нефиксированной продольной структурой поля в большой электродинамической системе [60]. Нахождение распределения поля в отношении системы «резонатор гиротрона – волновой переход – выходной волновод – диафрагма» позволило определить зависимость дифракционной и полной добротности такой системы от расстояния между критическим сужением на входе в резонатор и диафрагмой.

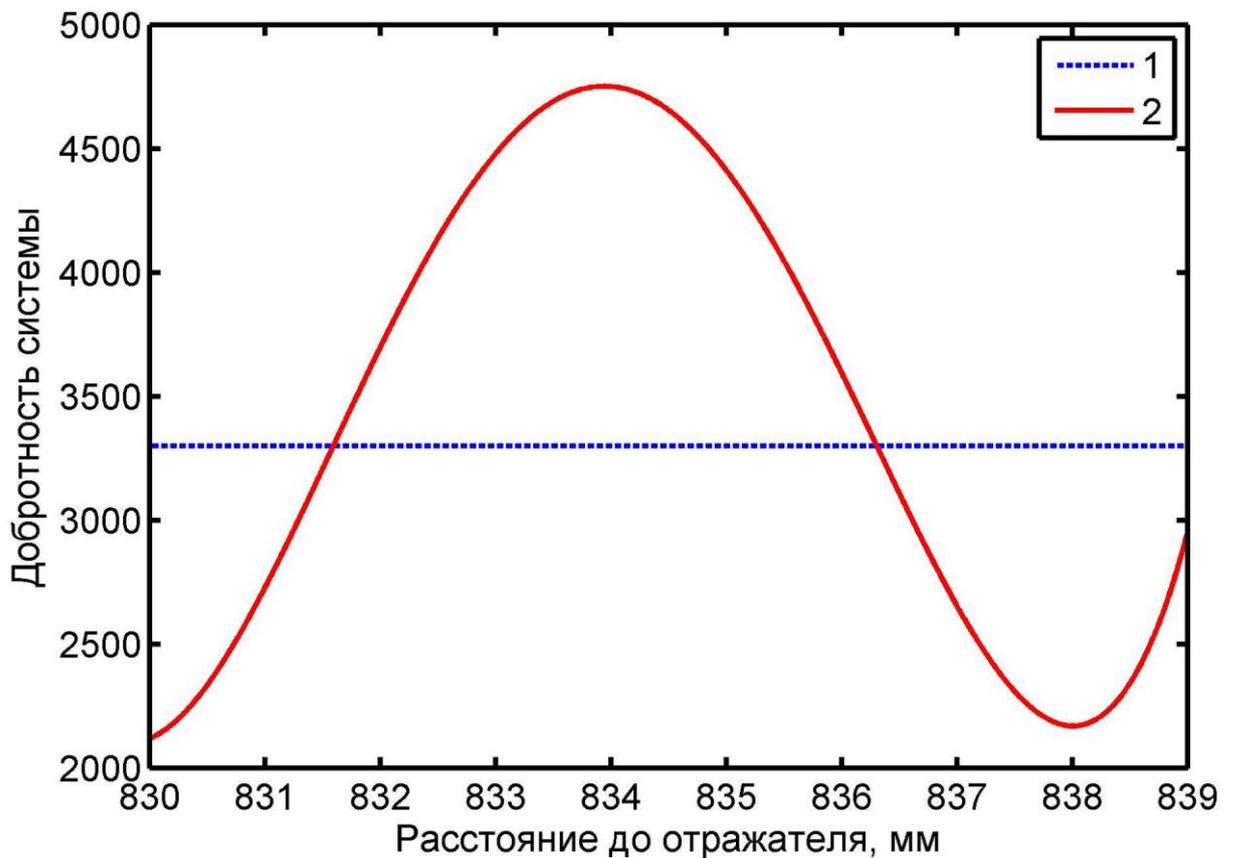


Рисунок 1.1.7: Зависимость полной добротности составной электродинамической системы гиротрона без отражателя (1) и с отражателем (2) от расстояния до отражателя.

Для резонатора технологического гиротрона, использованного в эксперименте омическая добротность $Q_{\Omega} = \frac{R_w}{\delta} \left(1 - \frac{m^2}{v_{m,p}^2} \right)$, где R_w – радиус однородного участка резонатора, δ – толщина скин-слоя на частоте излучения, m – азимутальный индекс рабочей моды и $v_{m,p}$ – соответствующий рабочей моде корень производной функции Бесселя, для моды TE_{02} составляет $Q_{\Omega} \approx 15700$. С учетом этого, полная добротность системы может изменяться в пределах от 2000 до 4600, при полной добротности резонатора гиротрона порядка 3300 (Рисунок 1.1.7). Так как

полоса перестройки частоты резонатора обратно пропорциональна его добротности, то при благоприятной фазе отраженного сигнала, соответствующей увеличению полной добротности системы, происходит сужение спектра излучения и наблюдается эффект стабилизации частоты. Кроме того, так как безразмерный параметр тока, входящий в уравнение баланса (П2.4) прямо пропорционален полной добротности системы, увеличение добротности приводит к возрастанию параметра тока. Как уже отмечалось ранее, параметры гиротрона, в особенности ток пучка, были не оптимальны для получения максимального КПД и мощности, поэтому при увеличении параметра тока за счет добротности произошло смещение рабочей точки системы и увеличение мощности. Оценки изменения параметров и КПД на основе простой теории с фиксированной структурой поля [61] с достаточной точностью описывают наблюдения – при увеличении безразмерного параметра тока вдвое, КПД возрастает на 30%. Моделирование на основе самосогласованной системы уравнений, описывающих электронно-волновое взаимодействие в модели с нефиксированной структурой высокочастотного поля и распространение волны до диафрагмы [60], показали хорошее соответствие экспериментальным данным как качественно, так и количественно при оценке изменения частоты. На Рисунке 1.1.8 приведены результаты численного моделирования зависимости частоты и мощности излучения для полной электродинамической системы технологического гиротрона с отражателем в выходном волноводном тракте. На графиках приведены зависимости частоты (пунктирные линии) и мощности (сплошные линии) для положений отражателя, соответствующих «благоприятной» и «неблагоприятной» фазе отраженного сигнала, и отличающихся сдвигом отражателя на $\lambda / 4$.

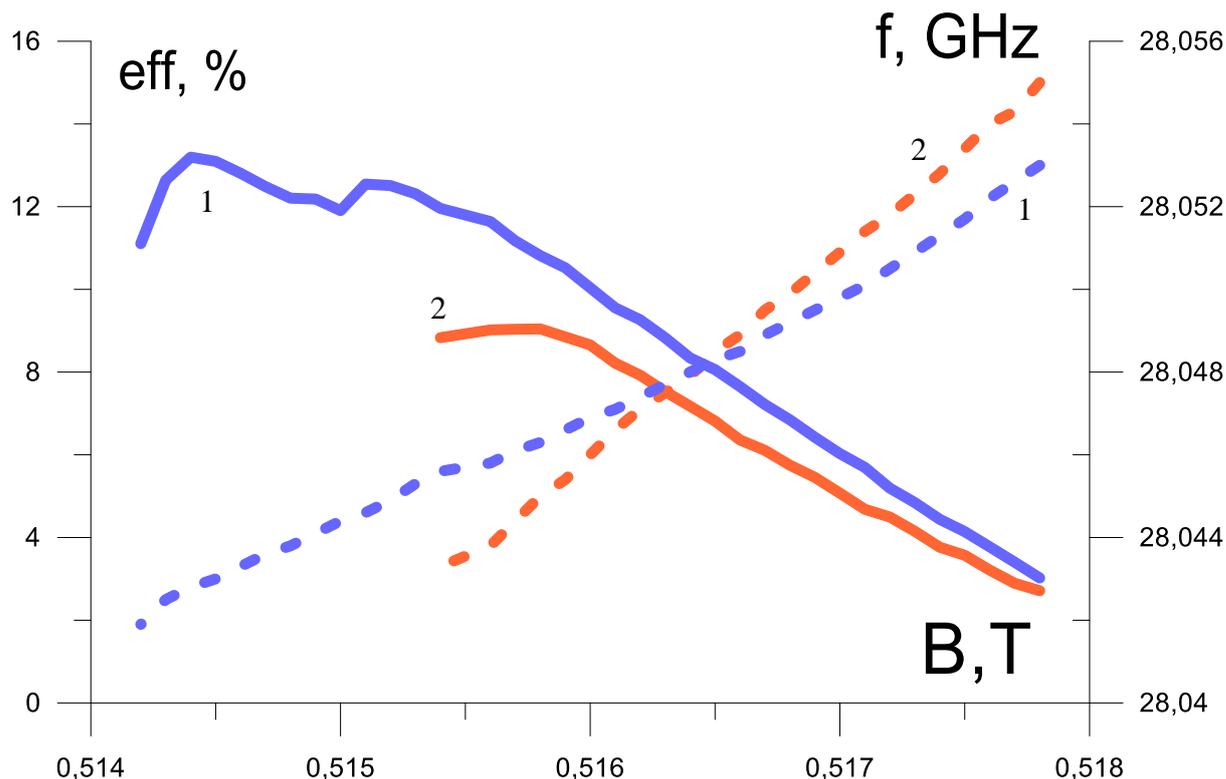


Рисунок 1.1.8: Результаты численного моделирования зависимости частоты (пунктирные линии) и мощности (сплошные линии) излучения гиротрона для положений отражателя соответствующих фазе отраженного сигнала 2π (1) и $2\pi+\pi$ (2)

Для более полной экспериментальной проверки зависимости частоты и мощности излучения гиротрона от положения отражателя был разработан вариант подвижного нерезонансного отражателя, аналогичного использованному ранее стационарному варианту. Основным отличием является возможность изменения расстояния до диафрагмы в процессе работы гиротрона, в то время как для изменения положения неподвижного отражателя требовалось выключать гиротрон и разбирать выходной волноводный тракт. Отражатель представляет собой участок волновода меньшего диаметра с неподвижной диафрагмой, расположенный в разрыве основного выходного волновода. Для изменения положения диафрагмы, участок волновода может перемещаться в продольном направлении при помощи шагового электродвигателя с винтовой передачей, обеспечивающей перемещение отражателя на 0.5 мм за 1 оборот вала (200 шагов на оборот) (Рисунок 1.1.9). Зависимость коэффициента отражения такой системы от частоты представлена на Рисунке 1.1.10. В пределах диапазона перестройки частоты гиротрона (порядка 5 МГц), определяемой добротностью резонатора подвижный отражатель обеспечивает коэффициент отражения 10% по мощности.



Рисунок 1.1.9: Подвижный моторизованный отражатель

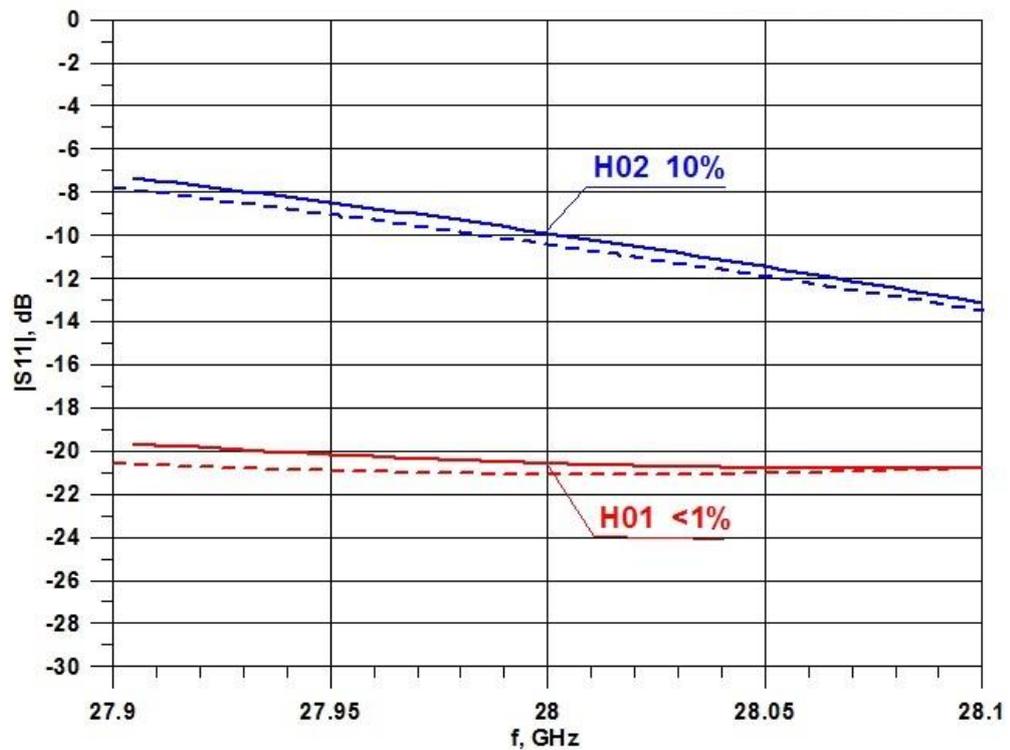


Рисунок 1.1.10: Зависимость коэффициента отражения подвижного отражателя от частоты

Такая конструкция позволила изучить воздействие отражений на режим генерации при непрерывном изменении расстояния до отражателя без выключения установки, и, тем самым, исключить влияние стартового сценария на установившийся режим работы. На Рисунке 1.1.11 приведены зависимости частоты (сплошная линия) и мощности (пунктирная линия) излучения

гиротрона при непрерывной перестройке расстояния до отражателя в пределах длины волны в волноводе, на Рисунке 1.1.12 – зависимость частоты излучения от магнитного поля без отражений и в положениях отражателя 4 мм и 9.5 мм. Полученные в результате эксперимента данные с достаточной точностью совпадают как с результатами теоретических оценок, так и с результатами численного моделирования. Полученные результаты по стабилизации частоты повторяют результаты экспериментов с неподвижным отражателем, что позволяет сделать вывод об отсутствии влияния стартового сценария на установление колебаний в проводившихся экспериментах. В результате эксперимента с подвижным отражателем была подтверждена возможность перестройки частоты излучения в пределах 5 МГц при помощи изменения положения нерезонансного отражателя в волноводном тракте, при этом такая перестройка сопровождается изменением мощности выходного излучения. Плавный сдвиг отражателя позволяет перестраивать режим гиротрона и достигать как сужения спектра и стабилизации частоты излучения в 1.6 раза (кривая «3» на Рисунке 1.1.12, соответствующая точке 9.5 мм на Рисунке 1.1.11), так и увеличивать чувствительность частоты излучения к колебаниям технических параметров установки (кривая «2» на Рисунке 1.1.12, соответствующая точке 4 мм на Рисунке 1.1.11).

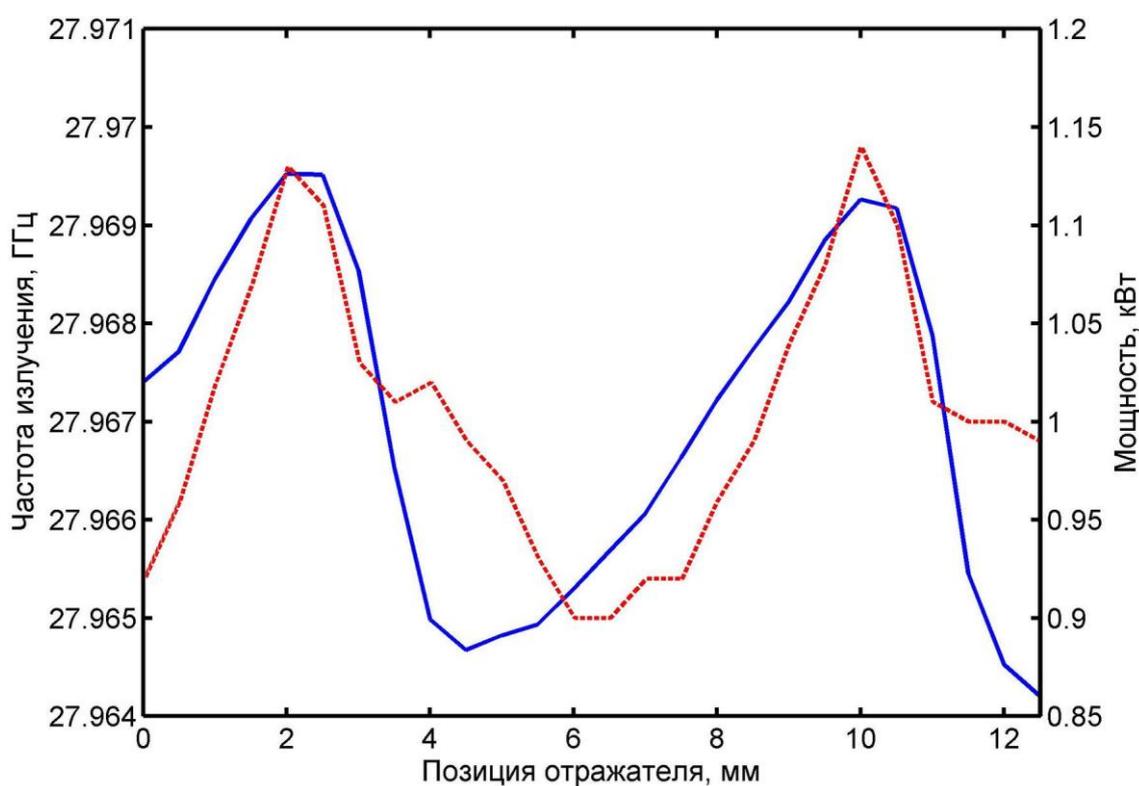


Рисунок 1.1.11: Зависимость частоты (сплошная линия) и мощности излучения (пунктирная линия) от позиции отражателя при магнитном поле $B_0 = 0.5142$ Тл

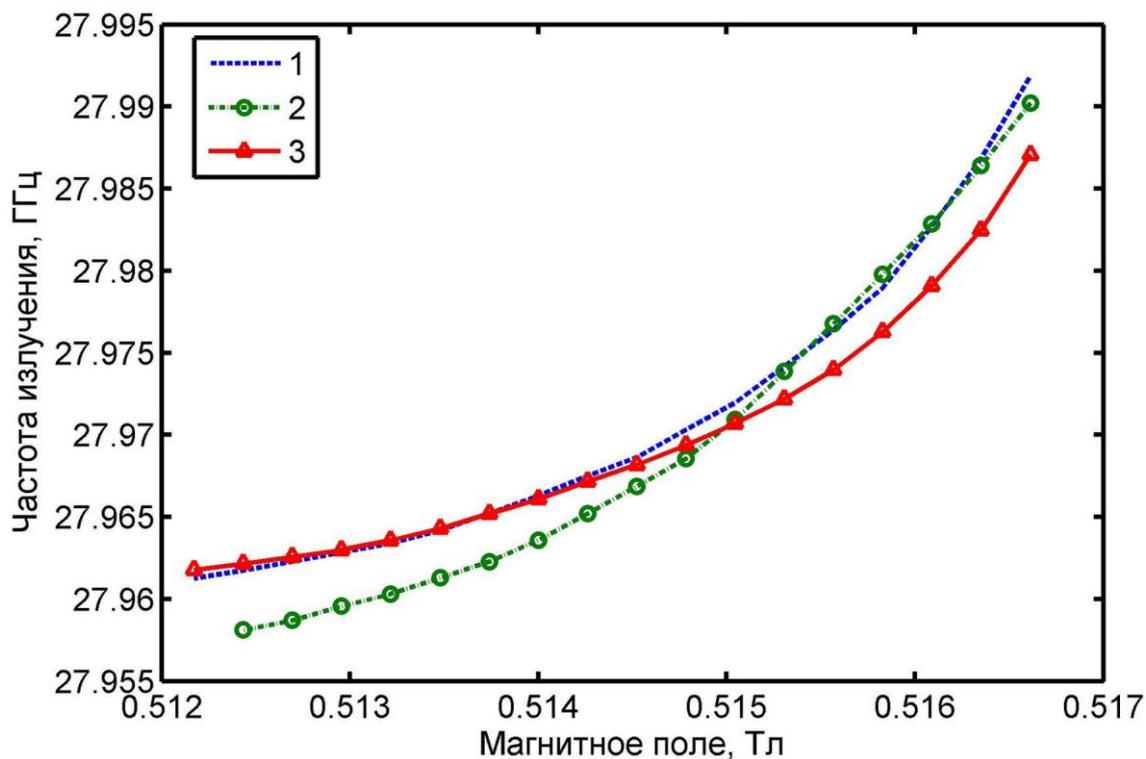


Рисунок 1.1.12: Зависимость частоты излучения от магнитного поля без отражений (1), при положении отражателя 4 мм (2) и 9.5 мм (3)

1.1.2 Эксперимент с высокочастотным гиротроном с удлиненной линией задержки

Второй эксперимент был выполнен на двухлучевом гиротроне для спектроскопии, созданным в исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония) при активном участии сотрудников ИПФ РАН [62,63]. Данный гиротрон спроектирован для работы на второй гармонике циклотронной частоты на моде $TE_{8,5}$ с частотой выходного излучения 780 ГГц. Гиротрон предназначен для работы в сухом криомагните производства компании Jastec с величиной магнитного поля до 15 Тл. Применение многолучевой электронно-оптической системы с двумя генерирующими электронными пучками позволило обеспечить устойчивое возбуждение выбранной рабочей моды на второй гармонике циклотронной частоты и достичь уровня выходной мощности порядка 10 Вт. Важной особенностью данного гиротрона, определившей выбор в качестве установки для исследования отражения от удаленной нагрузки, является прямой вывод излучения из вакуумного объема, без использования квазиоптического преобразователя. Указанная особенность позволяет получать при помощи этого гиротрона не только излучение на рабочей моде, но и реализовать генерацию

на других модах и гармониках циклотронной частоты. Так, для эксперимента с отражением в качестве рабочей моды была выбрана мода $TE_{0,3}$ на основном циклотронном резонансе, с частотой излучения 321 ГГц. Излучение гиротрона транспортировалось при помощи круглой волноводной линии с тремя узлами поворота на угол 90° , в последней секции волноводного тракта устанавливался отражатель. Расстояние до отражателя составляло величину порядка 3.5 м и могло изменяться путем движения отражателя внутри волновода.

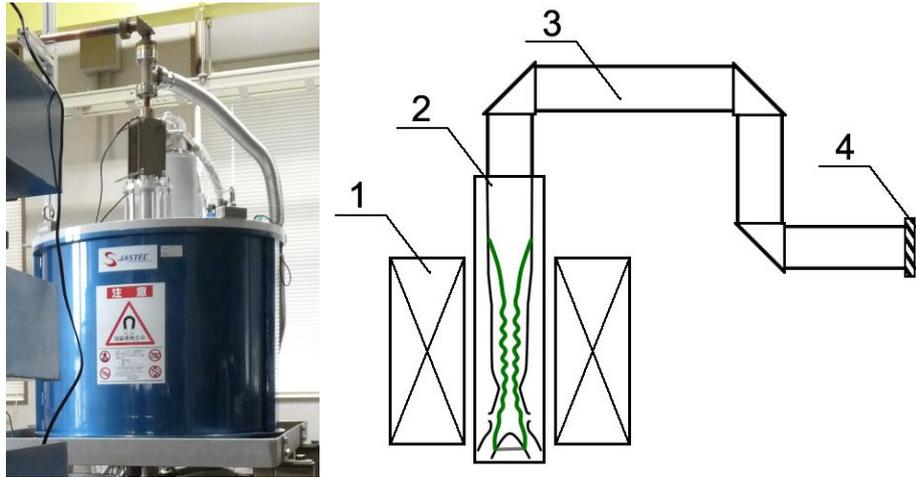


Рисунок 1.1.13: Общий вид установки и схема эксперимента. 1 – криомагнит, 2 – гиротрон, 3 – линия задержки, 4 – отражатель.

В качестве отражателя использовался диск из фторопласта-4 (тефлона) диаметром 2.5 см и толщиной $d = 5.0$ мм, коэффициент отражения которого может быть рассчитан по формуле [64]

$$R = \frac{(1 - \mu^2) \sin^2 \chi}{4\mu \cos^2 \chi + (1 + \mu)^2 \sin^2 \chi} \quad (\text{П1.1})$$

где $\mu = (\varepsilon - \sin^2 \theta) / \cos^2 \theta$, $\chi = (2\pi/d) \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$, θ – угол Бриллюэна падающей на отражатель волны. Для тефлонового отражателя, использованного в эксперименте, диэлектрическая проницаемость равна $\varepsilon = 2.045$, в результате коэффициент отражения составляет величину порядка 10% по мощности и слабо зависит от температуры материала. Зависимость коэффициента отражения моды $TE_{0,3}$ от частоты представлена на Рисунке 1.1.14:

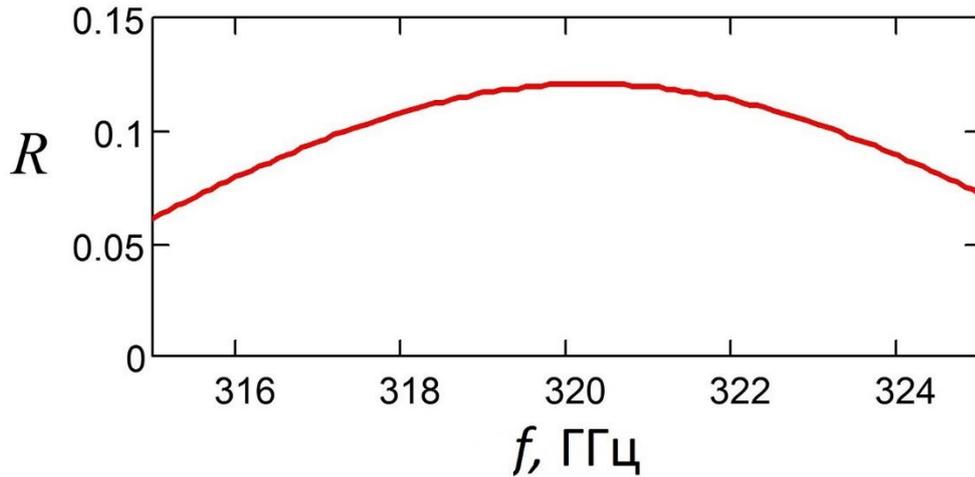


Рисунок 1.1.14: Зависимость коэффициента отражения от тефлонового диска от частоты излучения для моды $TE_{0,3}$

Параметры экспериментальной установки соответствовали присутствию нескольких продольных мод электродинамической системы в полосе захвата отраженным сигналом $\Delta\omega_R \approx |R|\omega_0/Q$, что означало возможность существенной стабилизации частоты гиротрона. Численное моделирование перестройки безразмерной частоты генерации $\Omega = 8\beta_{||}^2(\omega - \omega_c)/\beta_{\perp}^4\omega_c$ при изменении магнитного поля (и расстройки циклотронного резонанса Δ) для нескольких величин коэффициента отражения показывает возможность реализации различных режимов стабилизации в зависимости от полного коэффициента отражения линии задержки и отражателя (Рисунок 1.1.15). В случае большого коэффициента отражения и большой длины линии задержки перестройка частоты при изменении магнитного поля имеет ступенчатый характер, что соответствует последовательному возбуждению различных устойчивых продольных мод, попадающих в полосу захвата гиротрона, с резким переходом то одной продольной моды к другой. В этом случае возможна существенная стабилизация частоты гиротрона и уменьшение крутизны зависимости частоты от магнитного поля втрое. В случае уменьшения коэффициента отражения вследствие сужения полосы захвата $\Delta\omega_R$ уменьшается число продольных мод, попадающих в полосу захвата и зависимость частоты от расстройки циклотронного резонанса приобретает плавный характер, аналогично эксперименту с короткой линией с технологическим гиротроном; возможности по стабилизации частоты излучения при этом также уменьшаются.

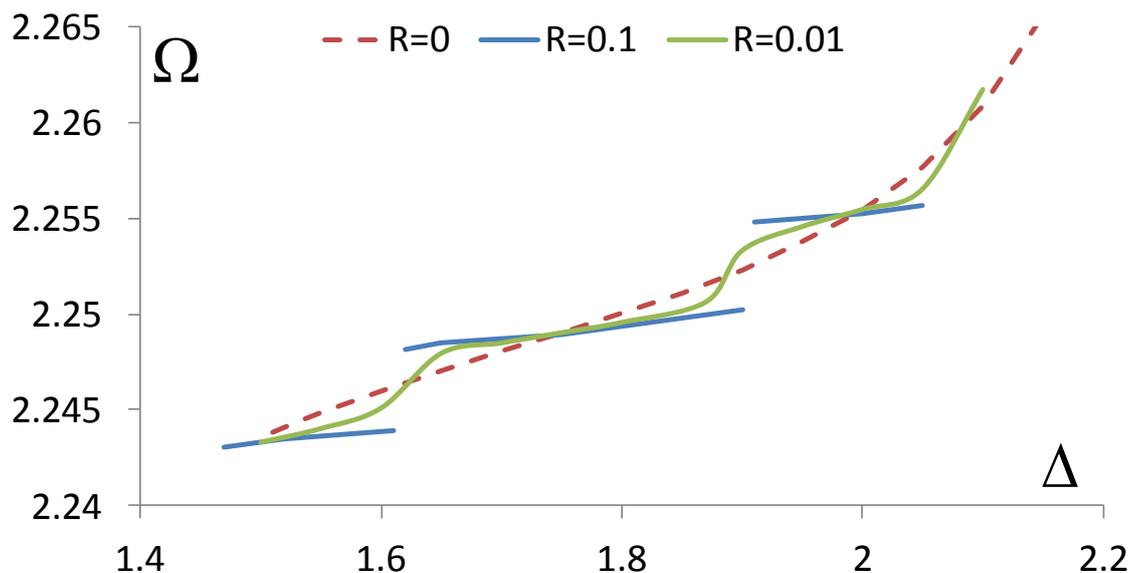


Рисунок 1.1.15: Зависимость сдвига частоты от расстройки циклотронного резонанса для различных коэффициентов отражения. Пунктирная линия соответствует случаю без отражений.

В эксперименте измерение частоты проводилось при помощи смесителя и спектроанализатора Anritsu MS710C, выходная мощность измерялась при помощи диода WR2.8EHM. Для выбранной высокочастотной рабочей моды на первой гармонике, как и в экспериментах с низкочастотным технологическим гиротроном и короткой линией задержки, исследовалась зависимость частоты излучения от величины основного магнитного поля. Магнитное поле изменялось в пределах 11.66 – 11.72 Тл при фиксированных параметрах электронного пучка: ускоряющее напряжение $U_0 = 16$ кВ, анодное напряжение $U_a = 10$ кВ, ток электронного пучка 50 мА, режим работы – импульсный, с частотой следования импульсов 10 Гц и длительностью импульса 20 мс. Экспериментальная зависимость частоты излучения гиротрона от магнитного поля приведена на рисунке 1.1.16:

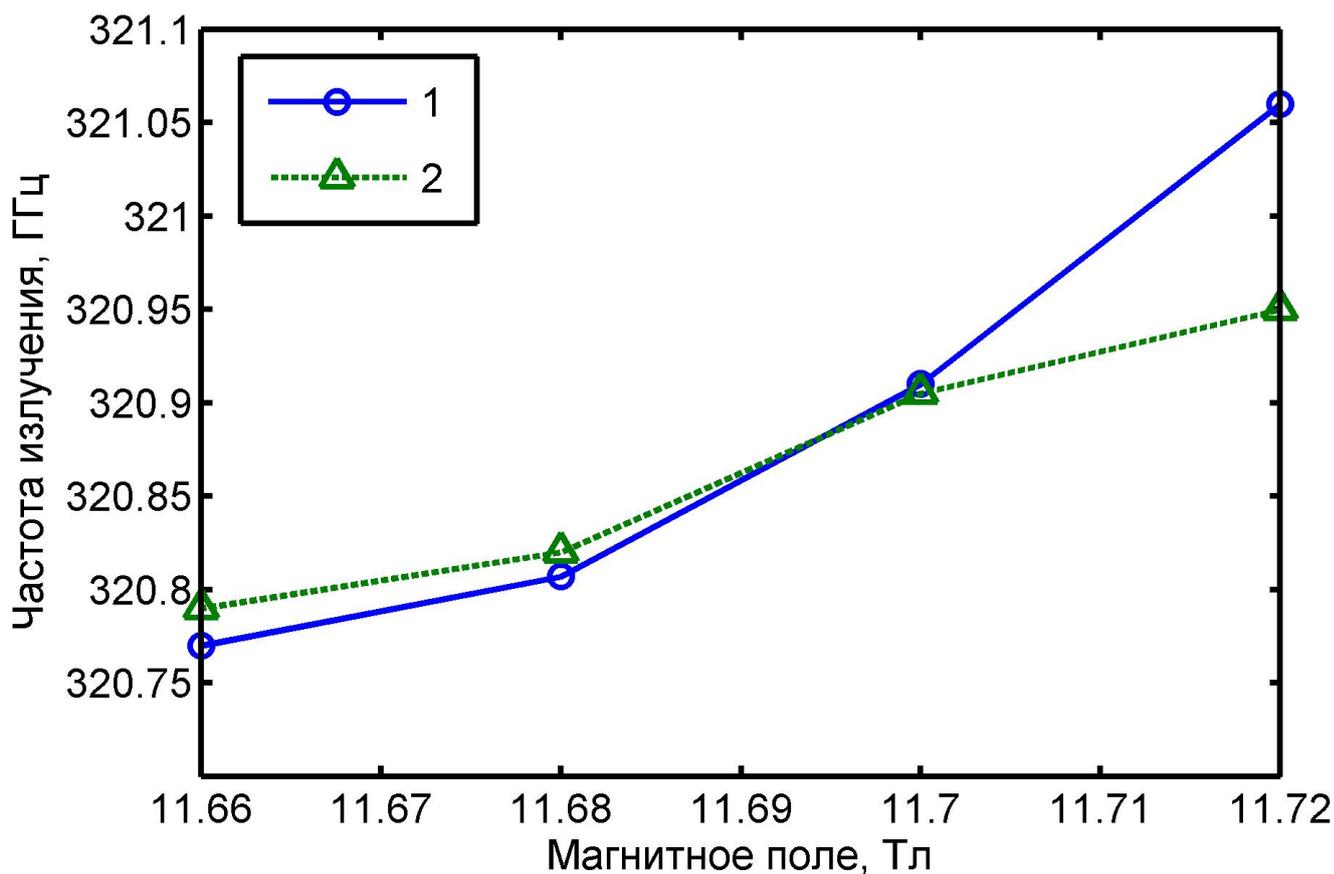


Рисунок 1.1.16: Зависимость частоты излучения гиротрона от магнитного поля при отсутствии отражений (1) и при отражении от тефлонового диска (2) на расстоянии 3.5 м

Как видно из графиков, в диапазоне магнитных полей 11.66 – 11.72 Тл введение отражений позволяет уменьшить зависимость частоты от изменения магнитного поля. При этом наблюдается уменьшение производной в 1.7 раз по сравнению с гиротроном без отражений, что оказывается меньше предсказанного по результатам численного моделирования уменьшения в 3 раза. В соответствии с теорией, такое различие может быть вызвано меньшим коэффициентом отражения полной системы линии задержки и тефлонового диска, в которую входят в том числе 3 поворота на 90^0 , которые могут вносить искажения в величину и зависимость коэффициента отражения от частоты.

Тем не менее, проведенные эксперименты как с низкочастотным технологическим гиротроном, так и с высокочастотным двухпучковым гиротроном подтверждают возможность применения пассивных систем на основе использования волны, отраженной от нерезонансной нагрузки, для стабилизации частоты гиротрона и ослабления зависимости параметров излучения от колебаний технических параметров установки. Использование систем с подвижным

отражателем также открывает возможности механического управления режимом генерации гиротрона.

1.2 Быстрая модуляция параметров излучения гиротрона

Применение пассивных методов воздействия на режим генерации гиротрона является привлекательным вследствие относительной простоты их реализации и отсутствия необходимости модифицировать систему электропитания гиротрона. Однако, такие методы обладают ограниченными возможностями как по сужению спектра излучения, так и по возможности быстрой перестройки параметров излучения. В гиротронах основным источником колебаний частоты и мощности излучения являются флуктуации параметров источников питания, как было исследовано в [45]. Для современных коммерческих источников питания колебания величины ускоряющего напряжения $\delta U_0 / U_0$ составляют от 2% до 0.2% для источников с повышенной стабильностью. На Рисунке 1.2.1 приведена осциллограмма пульсаций напряжения (относительно заданного уровня 15 кВ) источника ускоряющего напряжения Spellman ST20*12 [65] гиротронного комплекса, предназначенного для спектроскопии и диагностики различных сред [66].

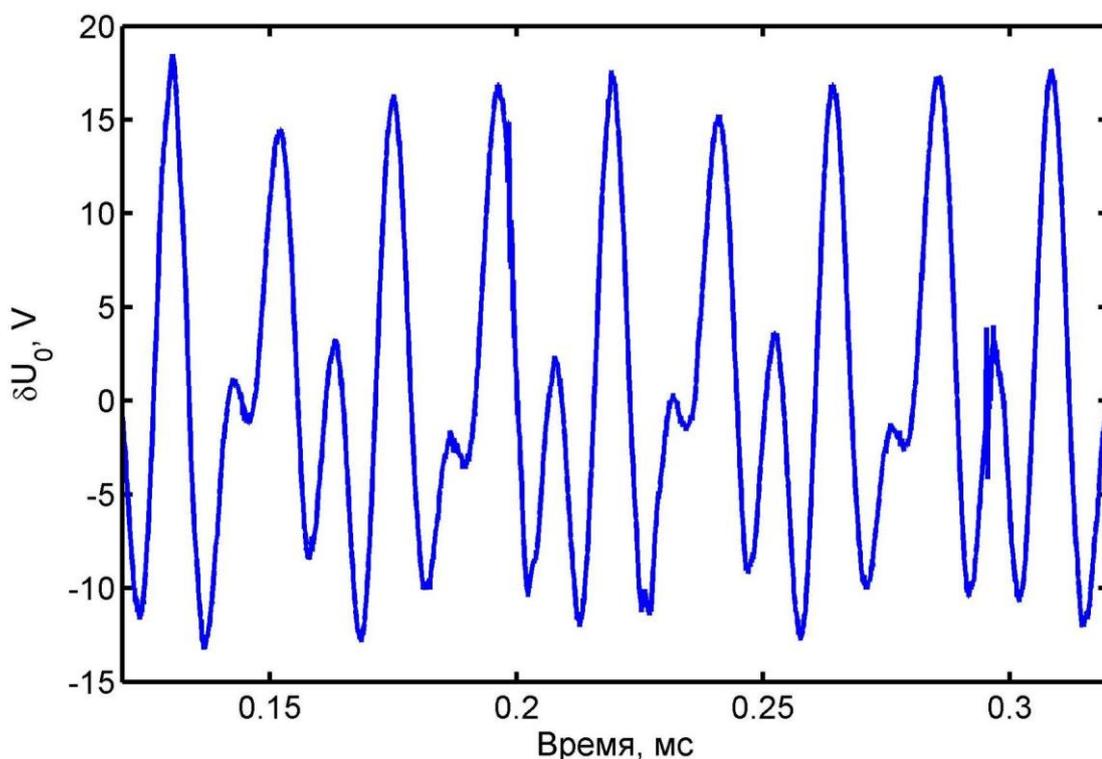


Рисунок 1.2.1 Осциллограмма пульсаций напряжения источника ускоряющего напряжения

Как видно из осциллограммы, характерной частотой пульсаций является частота порядка 100 кГц, с отдельными высокочастотными импульсами с частотой заполнения до 25 МГц. Таким

образом, для реализации системы, позволяющей подавить воздействие пульсаций напряжения и стабилизировать выходные параметры излучения гиротрона, эта система должна обладать возможностью управлять режимами генерации гиротрона с характерной частотой не менее 100 кГц.

Исходя из оценки характерного времени цепей питания $\tau = RC$, где R – сопротивление цепи, C – емкость электродов магнетронно-инжекторной пушки, и конструктивных особенностей гиротрона, предпочтительным является реализация управления при помощи напряжения на аноде магнетронно-инжекторной электронной пушки, так как именно этот способ обеспечивает наибольшее быстродействие и не требует мощных источников питания. Для современных гиротронов, применяемых как в технологических комплексах, так и в спектроскопии, характерная величина емкости анода по отношению к другим электродам составляет порядка 30 пФ. Учитывая наличие современных безындукционных сопротивлений, позволяющих рассеивать тепловые потери мощностью до 100 Вт, и необходимых для отсутствия паразитных индуктивностей в цепи, современная технологическая база позволяет реализовать систему управления с полосой до 1 МГц.

Таким образом, было предложено использовать управление путем изменения анодного напряжения. Вследствие того, что в схеме подключения гиротрона одна из выходных клемм источника питания анода заземлена, регулирующий элемент может располагаться лишь между анодом гиротрона и потенциальным выходом анодного источника (Рисунок 1.2.2). Таким образом, регулирующий элемент должен находиться под потенциалом анодного напряжения величиной до 10 кВ. Это определяет необходимость обеспечить не только достаточное быстродействие, но и изоляцию органов управления и корпуса регулирующего элемента от высокого напряжения для обеспечения безопасной эксплуатации. В результате было предложено разработать модуль, позволяющий обеспечить изменение анодного напряжения в пределах 800 В – 1 кВ, с временем полного изменения менее 5 мкс и оптической изоляцией органов управления от высоковольтной части прибора. Учитывая имеющиеся в наличии источники управляющего сигнала, например, генератора сигналов произвольной формы Agilent 33500B, для управляющего сигнала был определен диапазон 0-10 В. Предложенные спецификации определили выбор регулирующего элемента, в качестве которого был использован высоковольтный импульсный тетрод ГМИ-83В. Управление электронной лампой осуществляется через аналоговую оптронную пару (излучатель - HFBR-1414; приемник - HFBR-2416) с помощью быстродействующего операционного усилителя К574УД1А. Для развязки по высокому напряжению используется оптическое волокно длиной 30 см. Подобная комбинация позволила регулировать анодное

напряжение гиротрона на величину до 1 кВ при изменении управляющего сигнала от 0 до 10 В с линейностью порядка 5% за время менее 1 мкс. Разработанный модуль размещен в корпусе, предназначенном для установки в стандартные приборные стойки.

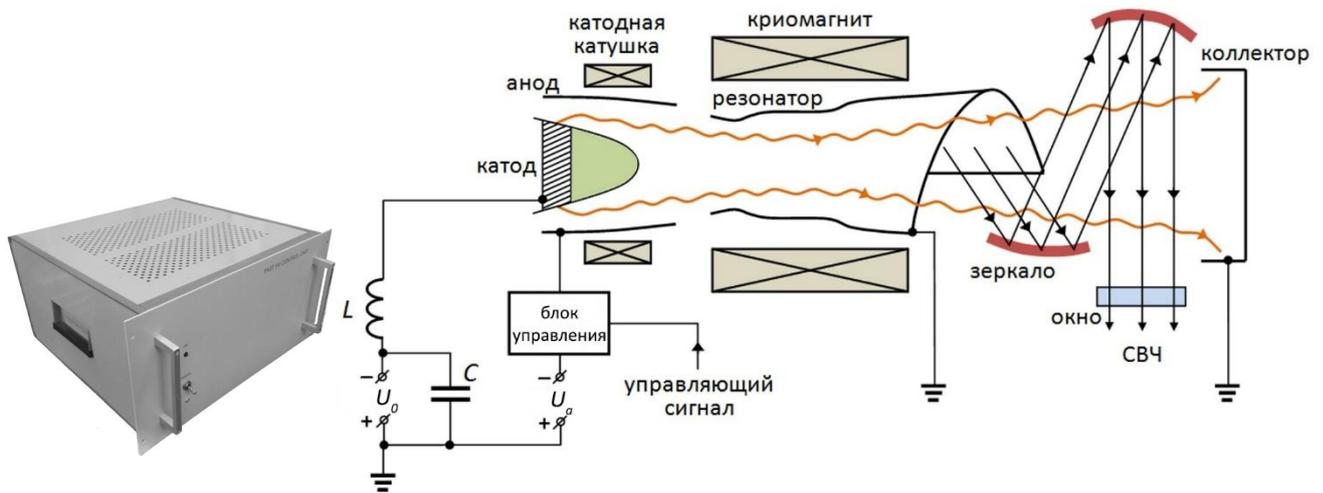


Рисунок 1.2.2: Внешний вид блока управления анодным напряжением и схема подключения.

Изменение параметров электронного пучка, в особенности питч-фактора электронов $g = v_{\perp}/v_z$ в зависимости от величины напряжения на аноде может быть оценено в рамках теории адиабатических магнетронно-инжекторных пушек [67]. В рамках этой теории, питч-фактор электронного пучка в резонаторе может быть определен как:

$$g = \frac{1}{\sqrt{\frac{2eU_0B_0^2}{mE_c^2\alpha^3\cos^2\varphi} - 1}} \quad (1.2.1)$$

где e , m – заряд и масса электрона, U_0 – ускоряющее напряжение, B_0 – величина магнитного поля в резонаторе гиротрона, E_c – величина электрического поля на катоде, α – коэффициент магнитной компрессии, φ – угол магнитной силовой линии к поверхности эмиттера. Для более точных расчетов необходимо учитывать полную геометрию электронно-оптической системы и распределение магнитного поля. В Таблице 2 приведены результаты численного моделирования параметров электронного пучка [68] в гиротроне для спектроскопии с рабочей частотой 263 ГГц в зависимости от величины напряжения на аноде. На основе полученных данных о пучке, в рамках самосогласованной модели гиротрона можно рассчитать зависимость изменения частоты генерации гиротрона от анодного напряжения. Из уравнения для комплексной амплитуды высокочастотного поля (П1.3) следует, что в стационарном режиме генерации выполняются следующие условия для действительной и мнимой компонент фактора возбуждения моды (П1.2) :

$$I\Phi' = \frac{1}{2Q}, I\Phi'' = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \quad (1.2.2)$$

Так как движение и взаимодействие электронов с ВЧ полем зависят от нескольких параметров, в том числе от питч-фактора, то его изменение будет приводить к изменению фактора возбуждения, определяемого движением электронов, влияя, тем самым, на частоту генерации в стационарном режиме. Результаты расчетов зависимости частоты излучения от напряжения на аноде и экспериментальные измерения приведены на Рисунке 1.2.3:

$U_a, \text{В}$	g_0
0.00	1.3661
300	1.2877
600	1.2183
900	1.1565
1200	1.1006

Таблица 1: Зависимость питч-фактора электронного пучка от величины напряжения анодного источника

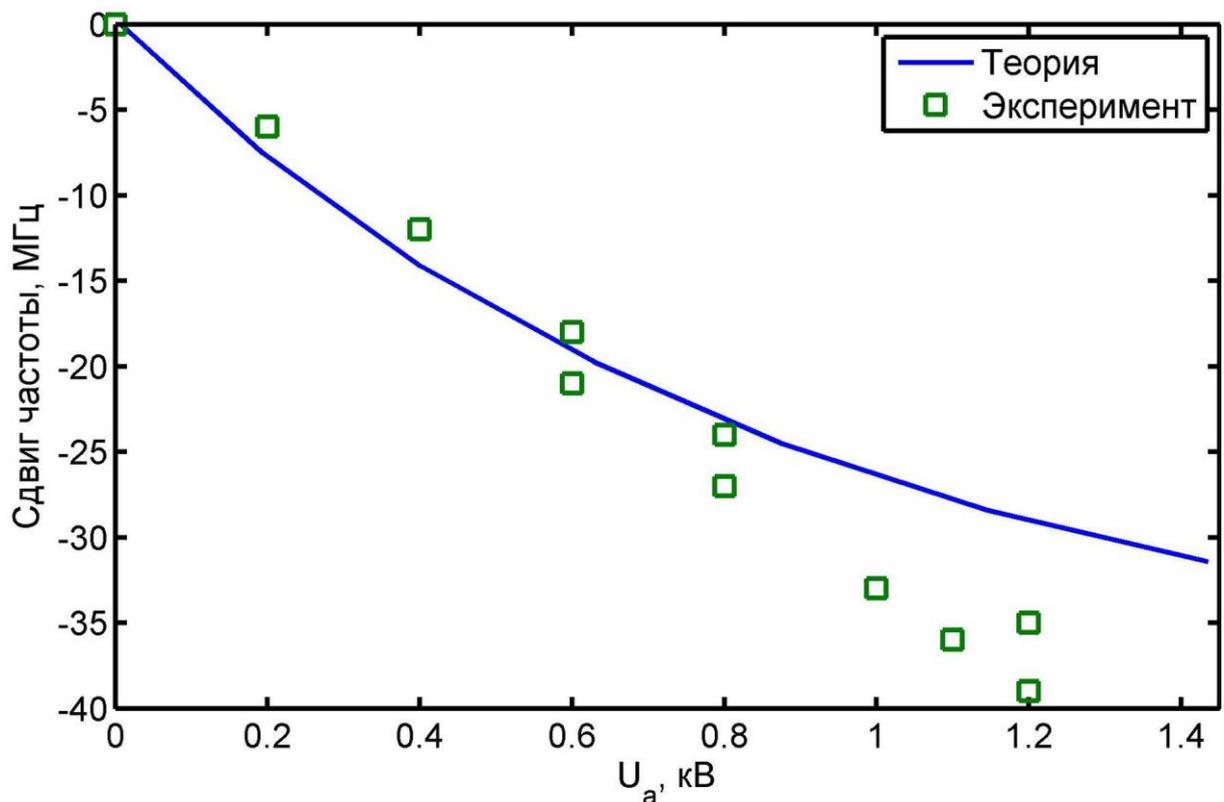


Рисунок 1.2.3: Теоретическая и экспериментальная зависимость сдвига частоты генерации от анодного напряжения

Как видно из рисунка, теоретические оценки частоты генерации дают хорошее соответствие с результатами эксперимента в области анодного напряжения менее одного киловольта, что подтверждает возможность использовать разработанный блок управления анодным напряжением для задач управления частотой и мощностью гиротрона. Для исследуемого гиротрона чувствительность частоты к анодному напряжению составляет до 29 МГц/кВ. Для определения максимальной частоты модуляции, достижимой в разработанной схеме, на вход блока управления анодным напряжением в качестве управляющего сигнала подавался синусоидальный сигнал фиксированной амплитуды 6 В, частота которого увеличивалась до тех пор, пока не переставал фиксироваться сдвиг частоты генерации гиротрона. В ходе тестирования было установлено, что предложенная схема управления позволяет перестраивать параметры гиротрона в полосе до 30 МГц с частотой модуляции до 1 МГц в зависимости от режима генерации. Характерная зависимость сдвига частоты генерации от частоты модуляции при фиксированной амплитуде управляющего сигнала в режиме близком к максимуму КПД ($U_0 = 15$ кВ, $I_b = 0.2$ А, $B_0 = 9.65$ Тл, $U_a = 2$ кВ) приведен на Рисунке 1.2.4. Наибольший диапазон управления параметрами излучения реализуется на склоне зоны генерации, в режимах с мощностью и КПД меньше максимальных (при больших магнитных полях).

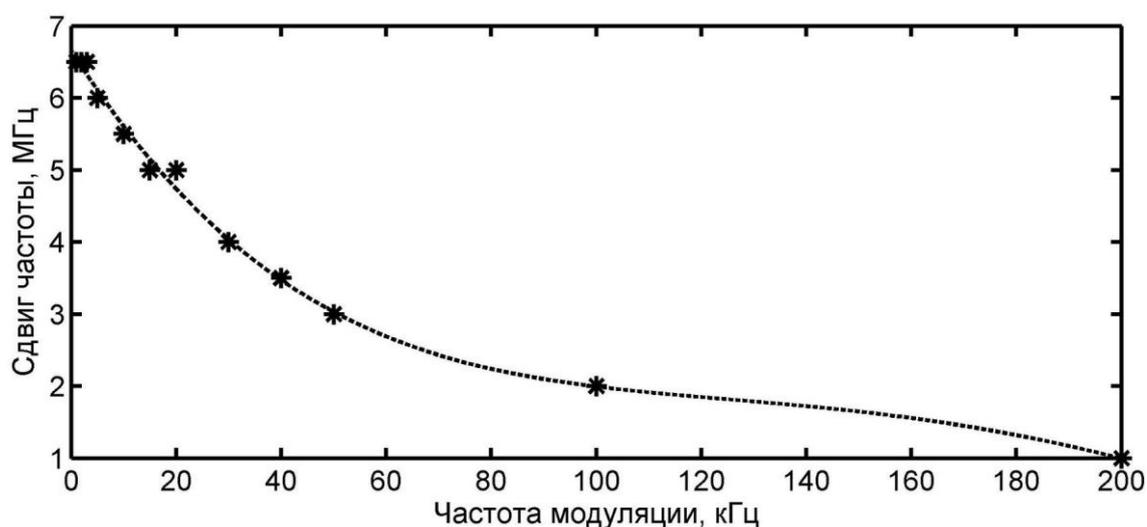


Рисунок 1.2.4: Характерная зависимость сдвига частоты гиротрона от частоты модуляции анодного напряжения для рабочей точки, близкой к максимуму мощности. Амплитуда управляющего сигнала фиксирована и равна 6 В.

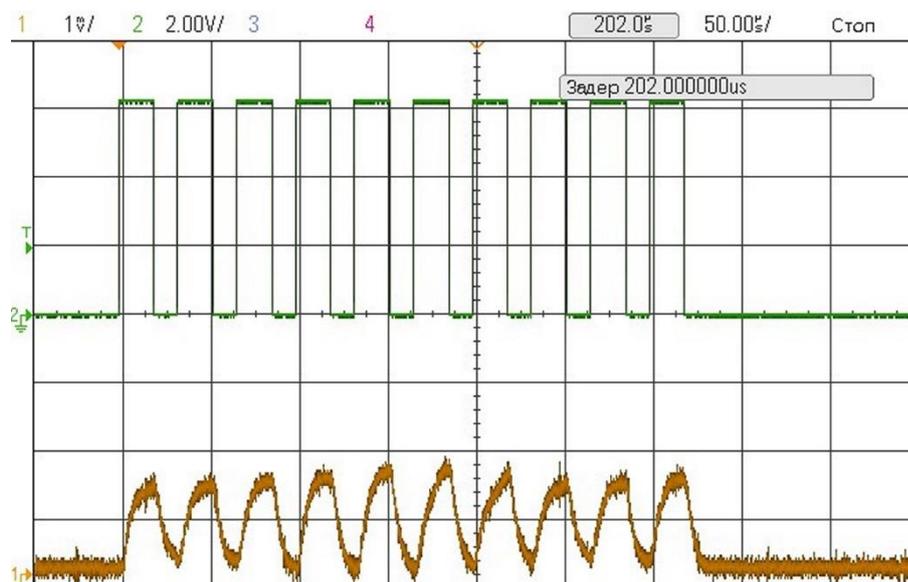


Рисунок 1.2.5: Полная модуляция мощности гиротрона (нижняя линия) при помощи управления анодным напряжением; верхняя линия - управляющий сигнал.

Дополнительной особенностью предложенной системы управления является возможность ее использования в гиротронах любых частотных диапазонов, в конструкции которых применена триодная магнетронно-инжекторная пушка. Для тестирования возможностей применения такого метода управления был проведен ряд экспериментов по модуляции выходной мощности технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц и мощностью до 10 кВт и уже упомянутого гиротрона для спектроскопии с рабочей частотой 263 ГГц и мощностью до 1 кВт. Так, на Рисунке 1.2.5 приведены результаты экспериментов по модуляции мощности технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц в режиме генерации, близком к максимальному. В системе без оптимизации величины безындуктивного сопротивления в цепи питания анода удалось достигнуть 100% модуляции мощности с частотой следования импульсов до 30 кГц. В экспериментах с высокочастотным гиротроном после оптимизации системы управления и подстройки режима генерации была продемонстрирована возможность частичной модуляции мощности с частотой до 1 МГц. Также, при выборе рабочей точки вблизи срыва колебаний, путем малого изменения величины анодного напряжения удалось добиться полной модуляции мощности излучения с короткими фронтами импульсов – до 1 мкс (Рисунок 1.2.6).

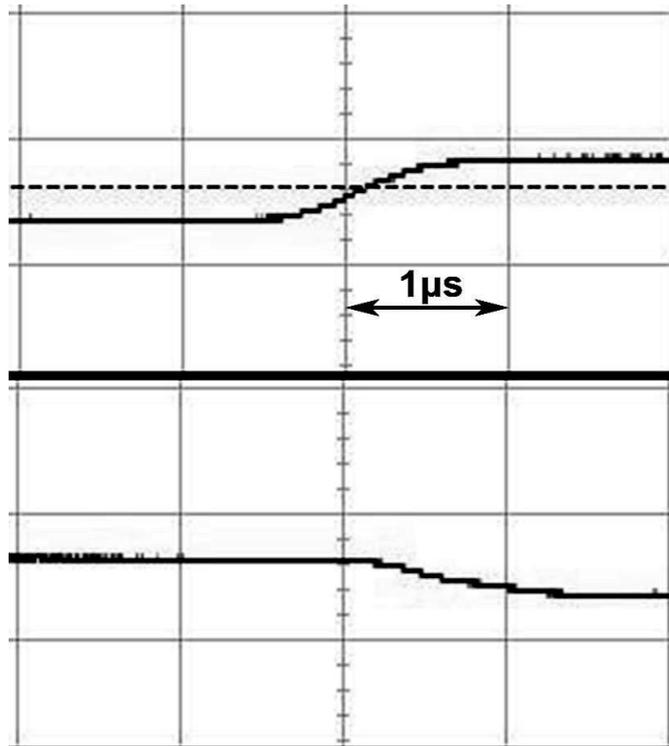


Рисунок 1.2.6: Фронты импульса мощности при управлении анодным напряжением вблизи точки срыва генерации гиротрона

Достигнутое быстродействие позволяет применить гиротрон для передачи информации. В качестве проверки возможностей системы передачи на основе гиротрона, был проведен эксперимент по передаче звукового сигнала за счет модуляции выходной мощности гиротрона. В качестве управляющего сигнала для блока управления анодным напряжением использовался сигнал со звукового выхода автомобильной магнитолы, амплитуда которого могла плавно изменяться. Колебания выходной мощности гиротрона детектировалась при помощи СВЧ-диода Д606, сигнал которого после усилителя использовался для записи или направлялся на аудиовход динамика. В ходе экспериментов удалось не только детектировать переданный сигнал, но и продемонстрировать малые искажения передаваемого звука. На Рисунке 1.2.7 приведены осциллограммы управляющего аудио сигнала, сигнала с детектора и величина анодного напряжения с высоковольтного делителя

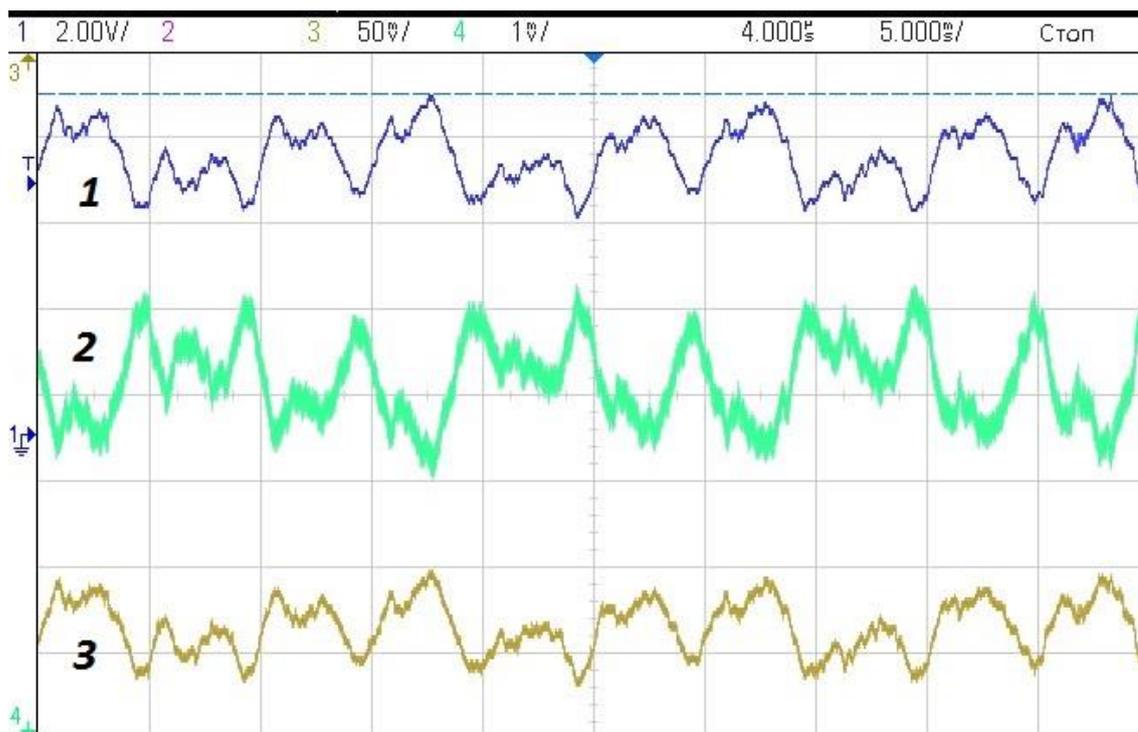


Рисунок 1.4.7: Осциллограммы управляющего звукового сигнала (1), сигнала с детектора (2) и напряжения на аноде гиротрона (3) в ходе эксперимента по передаче звука при помощи гиротрона

Таким образом были продемонстрированы широкие возможности разработанной системы управления по модуляции параметров гиротронов различных частотных диапазонов, что открывает новые перспективы как для технологических гиротронов, так и для высокочастотных гиротронов для спектроскопии.

1.3 Стабилизация частоты излучения гиротрона при помощи системы фазовой автоподстройки частоты за счет управления анодным напряжением

Возможности разработанной системы управления по модуляции частоты генерации гиротрона позволили экспериментально реализовать систему стабилизации частоты излучения непрерывного гиротрона, предназначенного для спектроскопии и диагностики различных сред [66].

Данный гиротрон обладает чувствительностью частоты по отношению к ускоряющему напряжению 33 МГц/кВ, что хорошо коррелирует с величиной вариаций ускоряющего напряжения (Рисунок 1.2.1) и измеренной шириной спектра излучения гиротрона без стабилизации (Рисунок 1.3.1), составляющей 0.5 МГц.

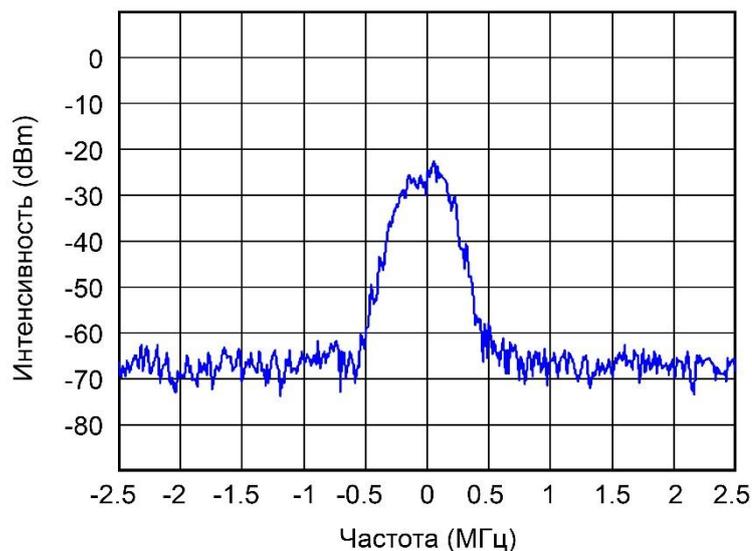


Рисунок 1.3.1: Спектр излучения гиротрона для спектроскопии с рабочей частотой 263 ГГц без стабилизации

Для эксперимента по стабилизации частоты выходная мощность гиротрона была ограничена на уровне 100 Вт, достаточных для современных спектроскопических приложений (например, ЯМР-ДПЯ или микроволновой газовой спектроскопии) путем ограничения тока электронного пучка до 200 мА и установкой величины магнитного поля в 9.67 Тл. Для уменьшения влияния высокочастотной составляющей колебаний ускоряющего напряжения был установлен фильтр нижних частот, состоящий из высоковольтного конденсатора $C = 0.22$ мкФ и катушки индуктивности $L = 160$ мГн. Для увеличения быстродействия величина безындуктивного сопротивления в цепи питания анода была уменьшена до 22.5 кОм.

Стабилизация частоты производилась путем подстройки частоты излучения к частоте высокостабильного опорного генератора малой мощности при помощи цепи обратной связи. Такие схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) широко применяются при создании высокостабильных источников на основе ламп обратной волны, позволяя получить ширину линии излучения менее 1 Гц [69], однако уровни выходной мощности в таких системах составляют порядка милливатт. Блок-схема системы, примененной в эксперименте по стабилизации частоты гиротрона приведена на Рисунке 1.3.2:

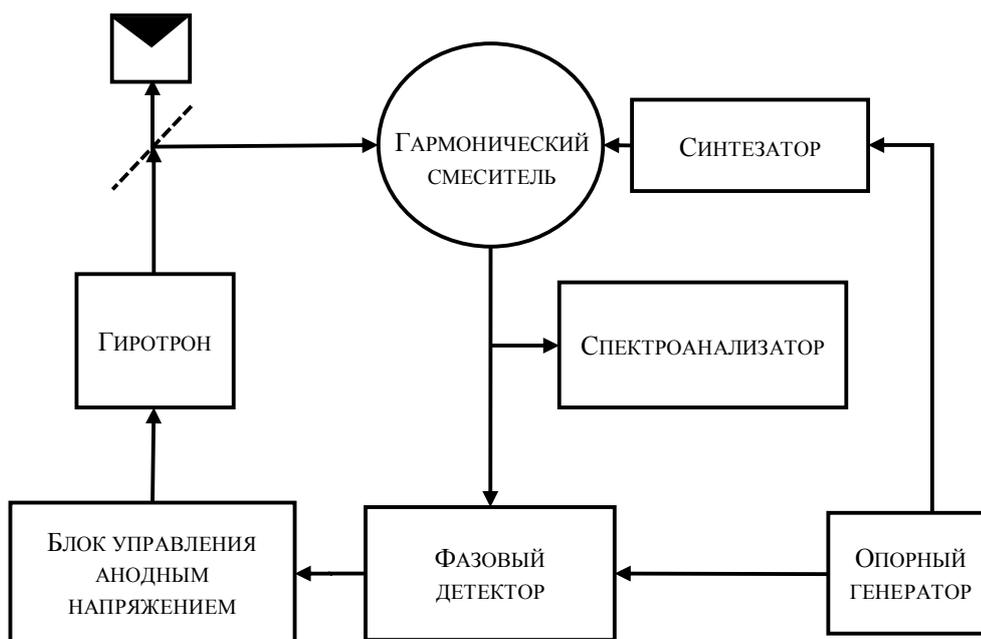


Рисунок 1.3.2: Схема системы стабилизации частоты гиروتрона

Часть излучения гиروتрона на частоте 263 ГГц ответвлялась в гармонический смеситель, где смешивалась с 54й гармоникой сигнала с микроволнового синтезатора PTS 6400 с частотой порядка 4.8796 ГГц. Полученный таким образом сигнал на промежуточной частоте, равной 350 МГц направлялся на частотно-фазовый детектор, где происходило сравнение с сигналом высокостабильного опорного генератора – кварцевого осциллятора. Сигнал ошибки с фазового детектора использовался в качестве управляющего сигнала для блока управления анодным напряжением, замыкая таким образом петлю обратной связи. Сигнал на промежуточной частоте также направлялся на спектроанализатор R&S FSL6 spectrum analyzer 9 kHz-6 GHz [70].

В результате работы системы фазовой автоподстройки частоты ширина спектра излучения гиروتрона, измеренная на промежуточной частоте, была уменьшена до величины в 1 Гц, ограниченной возможностями используемого для измерений спектроанализатора. Полученная ширина спектра соответствует относительной ширине $\Delta f / f = 3 \cdot 10^{-12}$ при времени измерения равном нескольким секундам. Спектр излучения гиروتрона с системой стабилизацией частоты на основе ФАПЧ приведен на Рисунке 1.3.3:

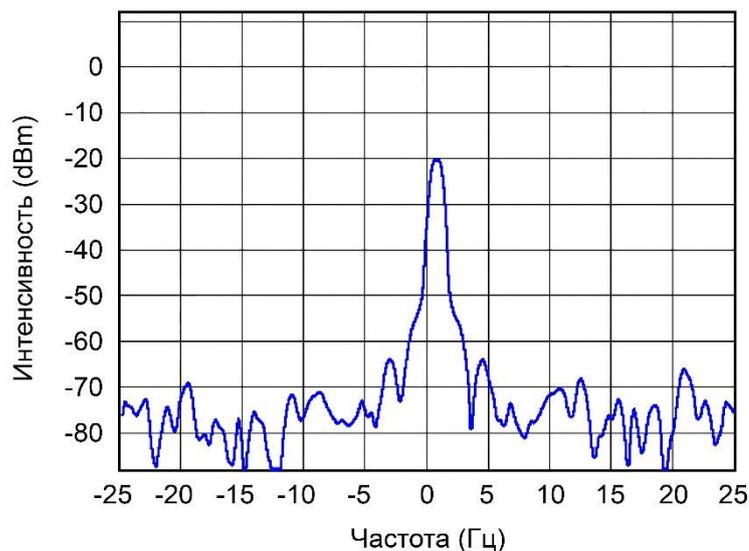


Рисунок 1.3.3: *Спектр выходного излучения гиротрона со стабилизацией частоты в диапазоне 25 Гц от несущей частоты*

Положительной особенностью гиротрона со стабилизацией частоты также является «плоская» зависимость фазовых шумов (SSB) в полосе 10-1000 Гц относительно несущей, с величиной, не превышающей -60 дВтс. Данные характеристики определялись параметрами системы ФАПЧ, позволяющей настроить характеристики фильтра управления (пропорционально-интегральный фильтр, ПИФ) как для уменьшения шумов вблизи несущей частоты (вызывая при этом возрастание шумов на краю полосы системы), так и для случая снижения уровня шумов в большей полосе. Характерный вид спектра при настройке ПИФ для уменьшения уровня шума в полосе менее 10 кГц приведен на Рисунке 1.3.4. Хорошо заметен низкий уровень шумов вблизи несущей частоты, и возрастание уровня шума на границе полосы системы управления, соответствующей измеренным в разделе 1.2 величине 150 кГц для выбранного режима генерации.

Долговременная стабильность частоты излучения комплекса определяется стабильностью опорного генератора. Для генератора на основе кварца, использованного в эксперименте, относительный уход частоты может составлять до $\delta f/f \sim 10^{-9}$, что может быть недостаточным для приложений, требующих сбор данных за продолжительный период времени. Для этого в рассматриваемой системе опорный генератор может быть заменен современными высокостабильными опорными генераторами, стабильность частоты которых может достигать величин $\delta f/f \sim 10^{-12}$ для рубидиевых часов [71].

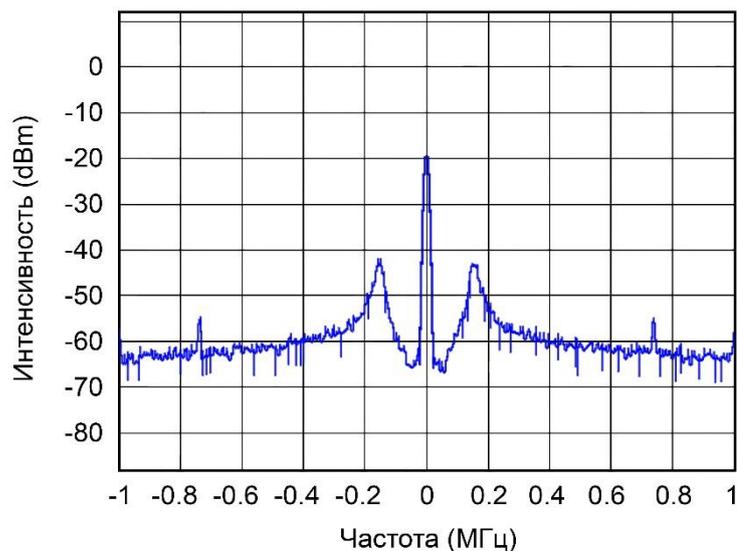


Рисунок 1.5.4: Характерный вид спектра излучения гиротрона со стабилизацией в диапазоне 2 МГц.

Стабилизированный таким образом гиротрон позволяет прецизионное управление частотой генерации в пределах 20-50 МГц в зависимости от выбранного режима генерации с сохранением ширины спектра и долговременной стабильности.

Реализация субтерагерцового источника средней мощности (порядка 100 Ватт) с шириной спектра излучения в 1 Гц и долговременной стабильностью на уровне 10^{-12} должно существенно продвинуть развитие методов ЯМР-ДПЯ спектроскопии, повысить разрешение микроволновой газовой спектроскопии и открыть новые возможности применения гиротронов.

Заключение к главе 1

В данной главе рассмотрены

- задачи управления и стабилизации параметров излучения гиротронов при помощи воздействия отраженного сигнала на режимы генерации и при помощи управления параметрами электронного пучка путем вариации напряжения на аноде магнетронно-инжекторной пушки;
- представлены результаты аналитических и численных оценок изменения параметров излучения при изменении технических параметров гиротронного комплекса;
- приведены результаты сравнения полученных теоретических результатов с данными эксперимента.

В п. 1.1 представлены результаты экспериментов по стабилизации частоты гиротронов различных частотных диапазонов при помощи отражения выходного сигнала от удаленной на различные расстояния нерезонансной нагрузки. Для двух гиротронов с рабочими частотами 28 ГГц и 321 ГГц продемонстрирована возможность двукратного уменьшения чувствительности частоты излучения гиротрона к колебаниям технических параметров установки, таких как величина магнитного поля или ускоряющее напряжение. Предложен метод плавного управления параметрами излучения гиротронов за счет использования подвижного нерезонансного отражателя. Полученные в ходе экспериментов данные сопоставлены с результатами численного моделирования, показано хорошее соответствие теоретических расчетов и экспериментальных измерений.

В п. 1.2 рассматривается способ быстрого управления параметрами выходного излучения гиротронов различных частотных диапазонов, в конструкции которых применена триодная магнетронно-инжекторная пушка. Представлена система управления, основанная на изменении частоты и мощности излучения при управлении напряжением на аноде, за счет изменения питч-фактора винтового электронного пучка. Для гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц выполнено численное моделирование зависимости частоты генерации от питч-фактора электронов, проведено сравнение с экспериментальными данными. Для гиротронов различных частотных диапазонов экспериментально продемонстрирована возможность управления частотой и мощностью с частотой модуляции до 1 МГц, показана возможность полной модуляции мощности с короткими фронтами импульса.

В п. 1.3 представлены результаты экспериментов по стабилизации частоты излучения гиротрона для спектроскопии и диагностики различных сред, основанные на реализации фазовой автоподстройки частоты за счет системы управления, описанной в п. 1.2. В результате применения системы стабилизации ширина спектра излучения при мощности в 100 Вт была уменьшена более чем на 5 порядков, с 0.5 МГц до 1 Гц, что соответствует относительной ширине линии $\Delta f / f \sim 3 \cdot 10^{-12}$. Долговременная стабильность, определяемая характеристиками опорного генератора, в эксперименте составляла порядка $\delta f / f \sim 10^{-9}$, и может быть улучшена до 10^{-12} и выше путем замены кварцевого опорного генератора на высокостабильный источник на основе рубидия.

Глава 2. Разработка мощных субтерагерцовых гиротронов для плазменных исследований

Приведены результаты экспериментального исследования мощных высокочастотных гиротронов с частотами генерации 250 ГГц и 670 ГГц. В прототипе гиротрона для перспективных установок термоядерного синтеза продемонстрировано достижение мощности 330 кВт в коротком импульсе на частоте 250 ГГц. Для гиротрона на основном циклотронном резонансе с импульсным магнитным полем проведено долговременное исследование стабильности генерации и эксплуатационных качеств.

2.1 Гиротрон для перспективных установок управляемого термоядерного синтеза будущего поколения

Развитие современных международных установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) в соответствии с European Fusion Roadmap [72] предполагается в виде трех глобальных этапов. Первым этапом является создание и испытания международного экспериментального термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). В состав ITER входят 24 гиротрона с частотой генерации 170 ГГц, мощностью в 1 МВт, КПД свыше 50% гауссовым выходным пучком и длительностью непрерывной работы свыше 1000 секунд [73]. Производство этих комплексов разделено между Россией [19], Японией [74], Европейским Союзом [20] и Индией [75], при этом часть участников уже продемонстрировали серийные образцы гиротронных комплексов. Следующим этапом развития установок УТС является демонстрационный источник энергии DEMO (DEMOstration Power Plant) – переходное звено между экспериментальной установкой ITER, предназначенной для отработки сложных физических и инженерно-технических задач создания мощных термоядерных реакторов, в которой генерируемое тепло рассеивается в пространство, и коммерческими термоядерными реакторами. Установка DEMO должна стать первым термоядерным реактором, генерирующим электрическую энергию, с тепловой мощностью, превышающей 2 ГВт. В соответствии с планами развития, к 2020 году должно быть выполнено концептуальное проектирование реактора и вспомогательных систем [76], включая систему электронно-циклотронного нагрева плазмы (ECRH, ЭЦР), поэтому большинство участников проекта ITER, задействованных в создании

систем ECRH уже начали разработку прототипов источников излучения, удовлетворяющих требованиям проекта DEMO [77].

В процессе работы реактора, максимальная мощность системы ЭЦР нагрева плазмы должна составлять порядка 50 МВт. В настоящее время существует несколько проектов, предложенных группами из разных стран, в которых ЭЦР нагрев и управление током плазмы рассматривается в качестве основного метода нагрева плазмы. Эти проекты предполагают использование гиротронов с частотами генерации свыше 200 ГГц как источников излучения для нагрева. Как уже отмечалось, концептуальное проектирование в настоящий момент еще не выполнено, и потому в зависимости от проекта требования к частоте генерации могут существенно отличаться, попадая в диапазон от 200 до 300 ГГц. Одним из перспективных направлений, исследования в котором ведутся сразу несколькими группами ученых, является разработка источников, генерирующих излучение с частотой порядка 230-250 ГГц [77,78] и подходящих для поэтапного перехода ITER – DEMO – коммерческие реакторы [79]. В рамках такого подхода, в ИПФ РАН и НПП Гиком был разработан и протестирован прототип гиротрона для перспективных установок УТС с частотой генерации 250 ГГц.

2.1.1 Особенности конструкции и основные расчетные параметры

Основным фактором, ограничивающим выходную мощность в гиротронах для управляемого термоядерного синтеза, является ограничение тепловых нагрузок на резонатор. Поэтому для увеличения выходной мощности необходимо увеличивать размеры пространства взаимодействия (радиус однородного участка резонатора) и использовать моды высокого порядка. Однако, для прототипа гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц максимальный размер резонатора и электронно-оптической системы был ограничен возможностями магнитной системы. Для генерации на первой гармонике циклотронной частоты необходимо магнитное поле величиной свыше 9.5 Тл, которое в ИПФ РАН доступно в сухом криомагните JASTEC JM7D10T100, имеющем теплое отверстие диаметром 100 мм, и позволяющем создавать магнитные поля величиной до 10 Тл. Так как для стабильной работы гиротронов с большой мощностью электронного пучка и СВЧ-излучения необходимы условия высокого вакуума, возможность создания разборного варианта не рассматривалась, что определило размеры электронной оптики, которая по геометрическим размерам не должна была превышать 100 мм с учетом систем охлаждения и высоковольтных изоляторов. Ограничение параметров

магнетронно-инжекторной пушки в свою очередь определили возможные положения электронного пучка в резонаторе, тем самым сузив возможность выбора рабочей моды. В результате, для обеспечения генерации на выбранной частоте, в качестве рабочей моды была выбрана мода $TE_{19,8}$ при радиусе резонатора 9.34 мм. Сложность получения выходной мощности на уровне нескольких сотен киловатт в резонаторе большой сверхразмерности определяется достаточно густым спектром собственных мод резонатора вблизи выбранной моды (Рисунок 2.1.1).

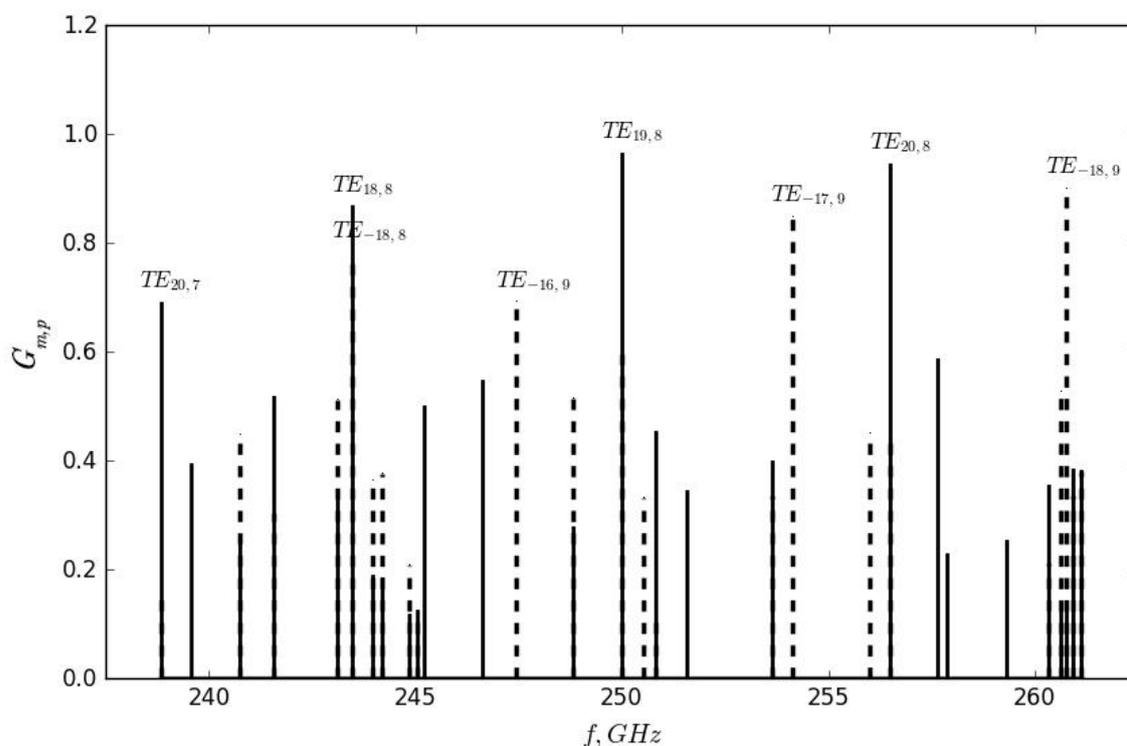


Рисунок 2.1.1: Спектр собственных мод резонатора около рабочей моды

Основными конкурентами выбранной моды, как показано на спектре мод являются моды $TE_{18,8}$, $TE_{-16,9}$, $TE_{-17,9}$ и $TE_{20,8}$. Исследование факторов связи электронного пучка с модами цилиндрического резонатора $G_{m,p}$, вычисленных по формуле (П1.6), позволило определить оптимальный радиус электронного пучка в резонаторе, обеспечивающий одновременно как большой коэффициент связи с рабочей модой, так и наименьшую возможную связь с паразитными модами (Рисунок 2.1.2). В связи с близкими зависимостями факторов связи рабочей моды $TE_{19,8}$ и паразитных мод с тем же вращением $TE_{18,8}$ и $TE_{20,8}$ и мод противоположного вращения $TE_{-16,9}$ и $TE_{-17,9}$ от радиуса электронного пучка в резонаторе, оптимальным радиусом

является величина $R_{beam} = 3.93$ мм, несколько отличающаяся от точки максимума связи с рабочей модой $R_{opt} = 3.85$ мм.

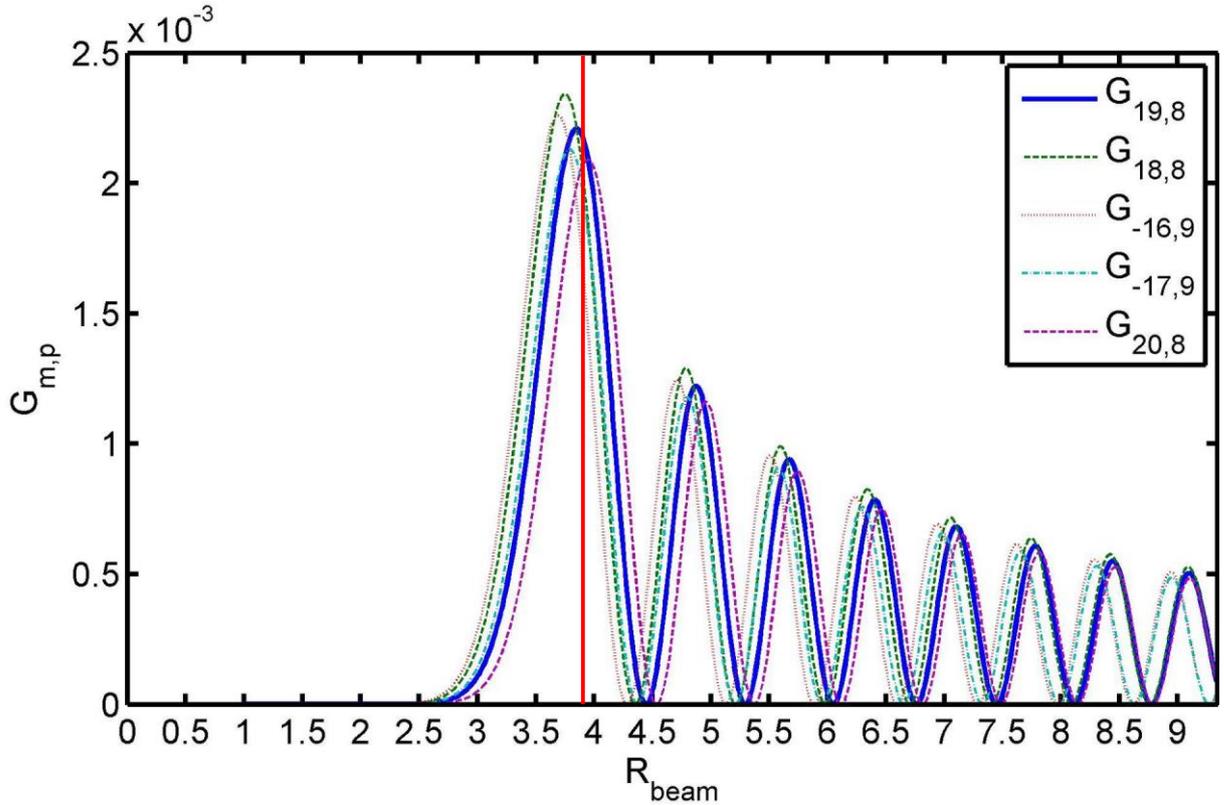


Рисунок 2.1.2: Факторы связи электронного пучка с модами резонатора. Вертикальной линией отмечено выбранное положение электронного пучка.

Для обеспечения эффективного взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем и вывода излучения были оптимизированы параметры резонатора, а именно длина однородного участка и параметры перехода от резонатора к квазиоптическому преобразователю. В результате моделирования длина однородного участка была выбрана равной $L = 10$ мм. Выбор длины определяется компромиссом между увеличением КПД взаимодействия электронов с ВЧ полем и ограничением омических потерь в стенках резонатора. При учете возможностей системы охлаждения, максимальная мощность омических потерь в резонаторе не должна превышать $p_{\Omega}^{max} < 3$ кВт/см². Для цилиндрического резонатора максимальная мощность излучения, ограниченная омическими потерями в резонаторе определяется как:

$$P^{max} \sim P_{\Omega}^{max} R_w L \frac{Q_{\Omega}}{Q_D} \sim P_{\Omega}^{max} \lambda^2 \frac{R_w^2}{L \delta} \left(1 - \frac{m^2}{v_{m,p}^2} \right) \quad (2.1.1)$$

где $\delta = (1/2\pi)\sqrt{\lambda c/\sigma}$ - толщина скин-слоя в идеальной меди на частоте излучения. При разработке гиротрона применяется корректирующий коэффициент для омической добротности $Q_\Omega = Q_\Omega^{ideal} / k$, обусловленный главным образом свойствами материала резонатора и качеством обработки поверхности, и имеющий величину порядка 1.5 – 2 [80]. На Рисунке 2.1.3 приведены расчетные зависимости КПД и плотности омических потерь в идеальной меди от длины однородного участка резонатора для различных токов пучка.

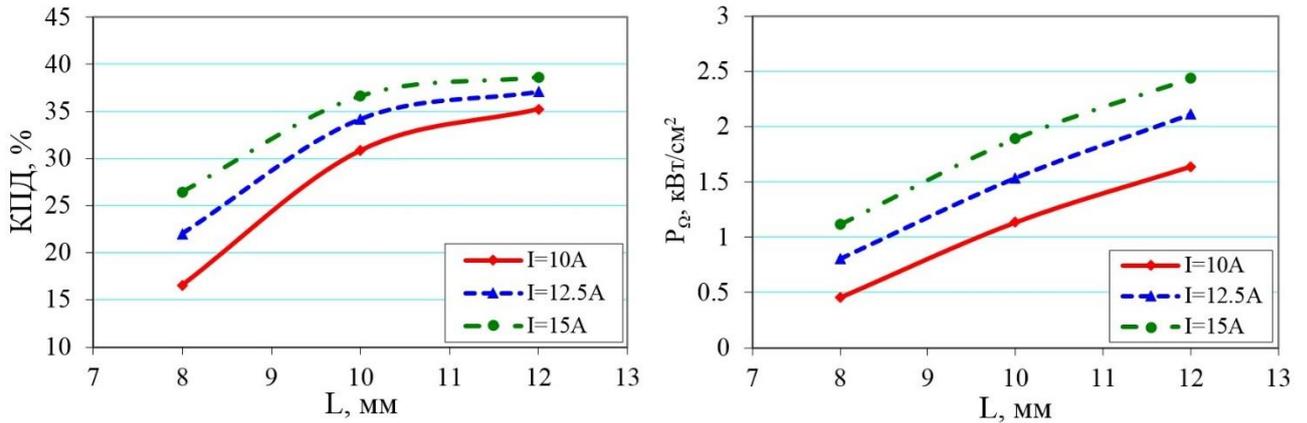


Рисунок 2.1.3: Зависимости КПД и плотности омических потерь в идеальной меди от длины однородного участка резонатора для различных токов электронного пучка.

Таким образом, исходя из максимальной плотности омических потерь, для которой возможно обеспечение надежной работы резонатора без перегрева отдельных участков, величиной не более 3 кВт/см² и с учетом корректирующего коэффициента максимальная мощность излучения в непрерывном режиме $P_{CW}^{max} = p_\Omega^{max} \lambda^2 v_{m,p} \frac{L Q_\Omega}{\lambda Q_D}$ для тока пучка 12.5 А ограничена величиной порядка 200 кВт с КПД около 35%.

Профиль резонатора и продольная структура высокочастотного поля представлены на Рисунке 2.1.4; полная добротность резонатора составляет $Q \approx 1600$. Для выбранных параметров резонатора был разработан профилированный квазиоптический преобразователь [81], позволяющий трансформировать рабочую моду TE_{19,8} в гауссов пучок и состоящий из профилированного волновода, параболического зеркала, 4 плоских зеркал для вывода излучения из отверстия соленоида и поворотного профилированного зеркала, позволяющего направить сформированный пучок в выходное окно гиротрона. Для первоначальных испытаний было использовано выходное окно, представляющее собой диск из нитрида бора BN диаметром 66 мм. Толщина окна $d = N(\lambda/2\sqrt{\epsilon})$ подбиралась исходя из минимального коэффициента отражения

для излучения на рабочей частоте 250 ГГц. Для такой толщины поглощаемая в окне мощность $P_{window} = P * \frac{\pi d}{\lambda} (\epsilon + 1) \tan \delta$ [82] составляет величину порядка 11% от падающего излучения, для отведения поглощенной в окне энергии предусмотрена система охлаждения торца VN диска проточной водой. Конструкция узла вывода излучения предполагает дальнейшую замену VN окна на алмазное окно, предназначенное для долговременной работы на большой выходной мощности в непрерывном режиме.

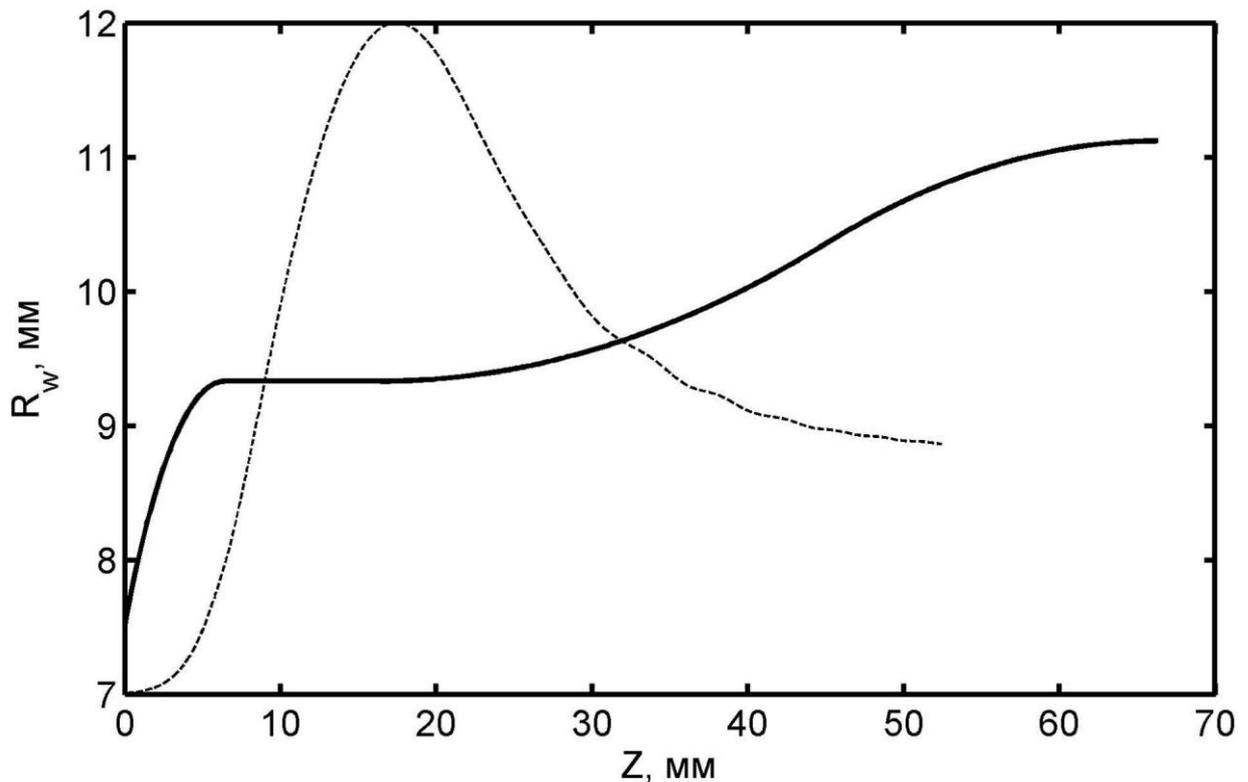


Рисунок 2.1.4: Профиль резонатора для моды $TE_{19,8}$ и продольная структура высокочастотного поля $f(z)$

Используя выбранные параметры резонатора и предполагаемые параметры электронного пучка (ускоряющее напряжение $U_0 = 55$ кВ, питч-фактор $g = 1.3$), были оценены величины стартовых токов для рабочей моды и соседних паразитных мод. Для расчетов стартовых токов в модели с фиксированной продольной структурой поля $f(\zeta)$ использовалась расчетная структура поля в резонаторе по формуле [83]:

$$I_{st} Q \chi G_{m,p} (R_{beam}) = 1 \quad (2.1.2)$$

$$\chi = 8 \frac{e}{mc^3} \cdot \frac{\beta_{\perp}^{2(s-2)}}{\gamma \beta_{\parallel}} \cdot \frac{1}{\int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} |f(\zeta)|^2 d\zeta} \cdot \left(\frac{n^n}{2^n n!} \right)^2 \cdot \left(-n - \frac{d}{d\Delta} \right) \left| \int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} f(\zeta) \exp \left(i \int_{\zeta_{in}}^{\zeta} \Delta d\zeta' \right) d\zeta \right|^2 \quad (2.1.3)$$

где обозначения совпадают с определениями в Приложении 1. На Рисунке 2.1.5 приведены рассчитанные в приближении фиксированной структуры поля величины стартовых токов рабочей моды и ближайших паразитных мод.

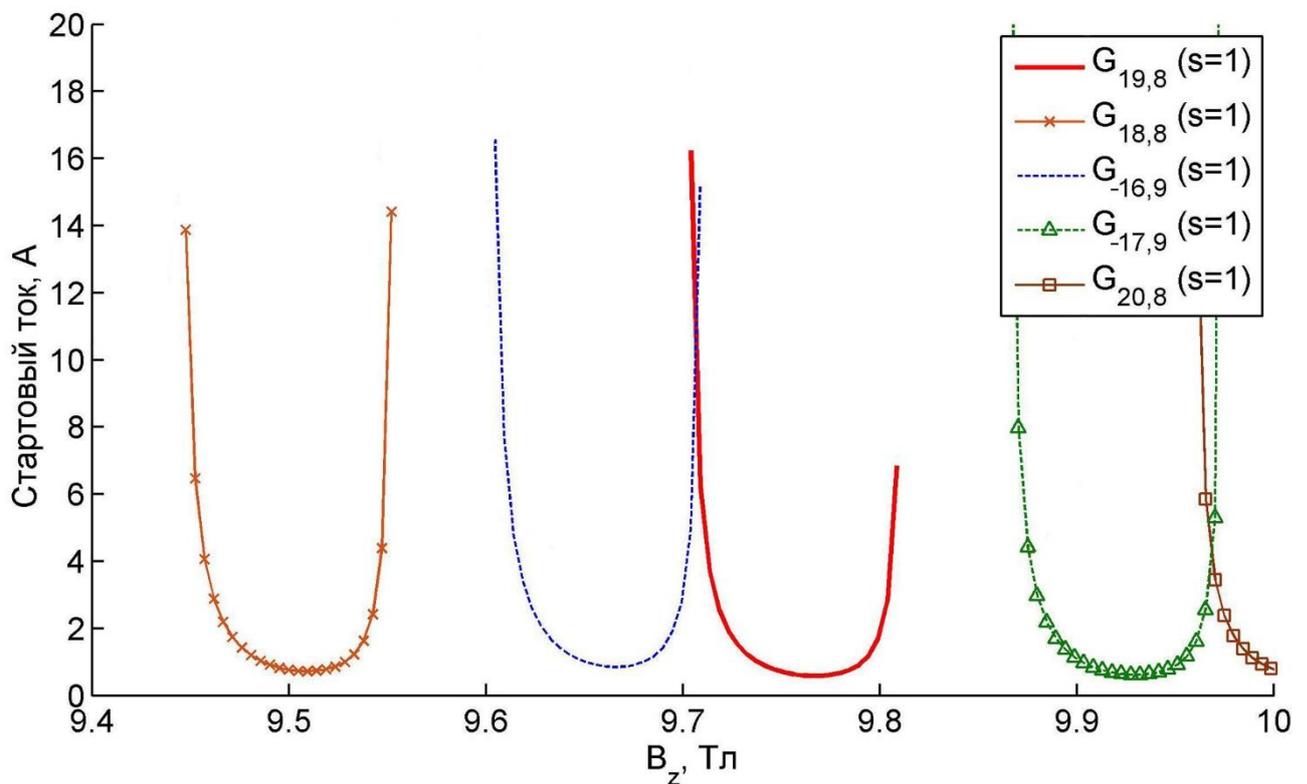


Рисунок 2.1.5: Стартовые токи рабочей моды (жирная сплошная линия) и ближайших конкурентов. Моды обратного вращения изображены пунктирными линиями.

Как следует из расчета стартовых токов, для выбранной рабочей моды $TE_{19,8}$ обеспечивается устойчивое возбуждение в широком диапазоне магнитных полей. Наиболее близким конкурентом является мода $TE_{16,9}$ обратного вращения по отношению к электронам, однако в области сопоставимых величин стартовых токов, рабочая мода обладает существенно большей эффективностью взаимодействия электронов с волной, что обеспечивает установление требуемого типа колебаний в процессе нарастания тока и напряжения при включении установки.

Исходя из расчетов эффективности взаимодействия электронов с волной в зависимости от ускоряющего напряжения, тока электронного пучка и ограничений на геометрические размеры

отдельных элементов, определяемых размерами теплого отверстия соленоида, параметры рабочего режима были выбраны в диапазоне ускоряющих напряжений 50-60 кВ и токов пучка порядка 12 А. Учитывая диаметр теплого отверстия соленоида Jastec 10T100, равный 100 мм, требуемые значения тока электронного пучка могут быть получены при использовании катода диаметром 48 мм и ширине эмиттера 3.6 мм. При средней плотности тока 2.5 - 3 А/см² катодный узел гиротрона позволяет сформировать винтовой электронный пучок с полным током до 20 А и умеренным разбросом скоростей электронов $\delta v_{\perp} < 30\%$. Основные параметры гиротрона приведены в Таблице 3.

Параметр	Ед. изм.	Значение
Рабочая частота	ГГц	250
Рабочая мода		TE _{19,8}
Номер гармоники		1
Ускоряющее напряжение, U ₀	кВ	55
Напряжение рекуперации	кВ	30
Магнитное поле в резонаторе	Тл	9.6-9.7
Ток пучка (номинальное значение в непрерывном режиме)	А	12
Ток пучка (в импульсном режиме)	А	20
Радиус резонатора	мм	9.34
Длина однородного участка	мм	10
Средний радиус электронного пучка в резонаторе	мм	3.93
Относительная осцилляторная энергия, не менее		0.54
Питч-фактор, не менее		1.1

Таблица 2: Основные параметры гиротронного комплекса

Для номинального ускоряющего напряжения 55 кВ были рассчитаны зависимости КПД генерации гиротрона от тока электронного пучка для различных питч-факторов электронов, показанные на рисунке 2.1.6.

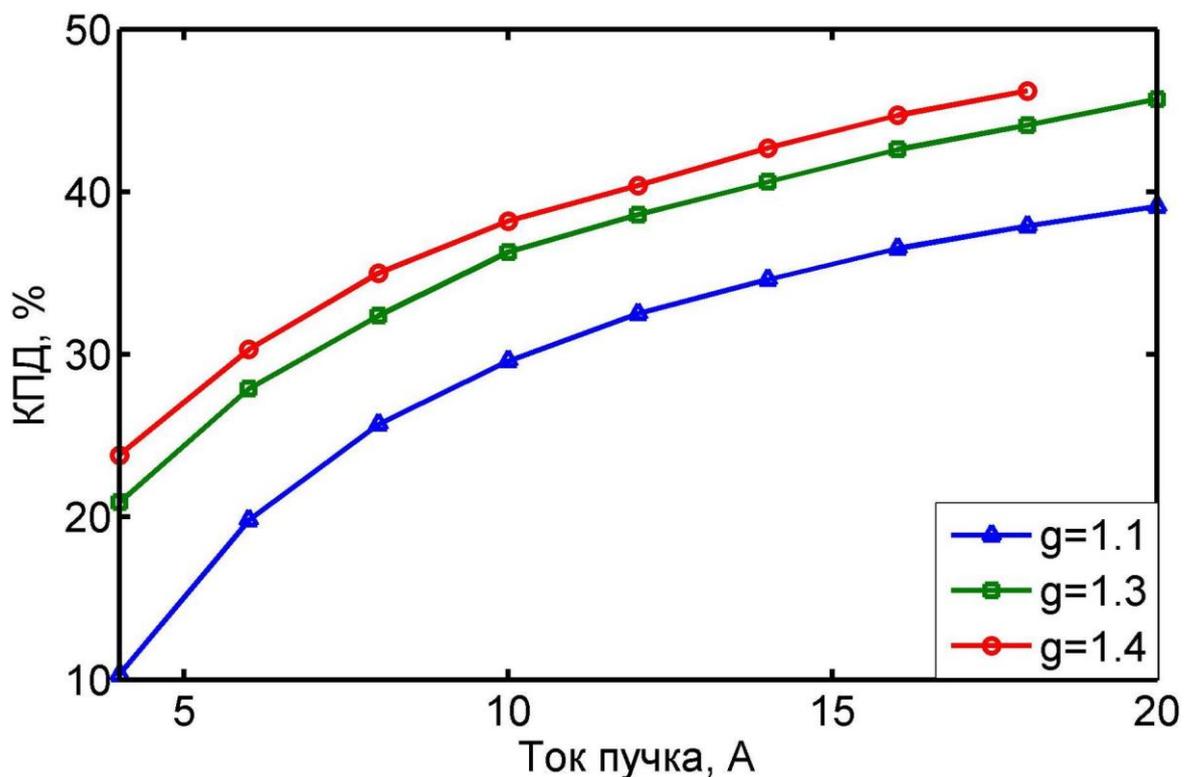


Рисунок 2.1.6: Зависимости КПД от тока электронного пучка и питч-фактора электронов

Как следует из оценок тепловых нагрузок на стенки резонатора, максимальная мощность, ограниченная омическими потерями в резонаторе, равна 220 кВт. Эта мощность при типичном для магнетронно-инжекторных пушек питч-факторе $g = 1.3$ достигается при токе электронного пучка $I = 12$ А и КПД генерации порядка 35%, ограничивая тем самым параметры гиротрона в режиме непрерывной генерации. Перспективы использования гиротрона в импульсном режиме с большой скважностью импульсов, снижающем среднее тепловыделение в резонаторе и элементах квазиоптического преобразователя, позволяет при теоретических оценках увеличить рабочий ток до близкого к максимальному для катода выбранного размера 20 А, а мощность излучения до величины порядка 450-500 кВт с КПД генерации до 45%. На Рисунке 2.1.7 приведены расчеты зоны генерации гиротрона при увеличении рабочего тока до 20 А при ускоряющем напряжении 55 кВ:

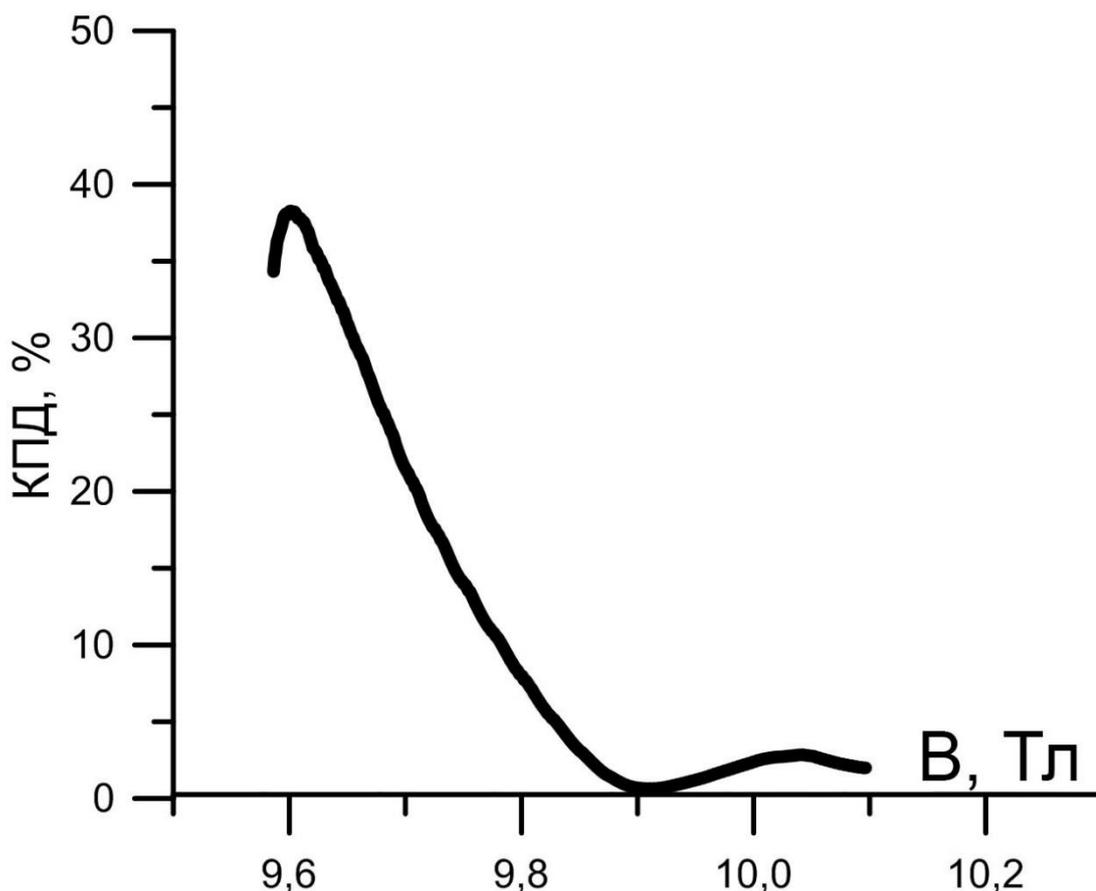


Рисунок 2.1.7: Зона генерации гиротрона при токе пучка $I_b = 20$ А, питч-факторе $g = 1.1$ и ускоряющем напряжении 55 кВ.

2.1.2 Испытательный стенд и экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование гиротрона проводилось на высокочастотном гиротронном стенде ИПФ РАН, оборудованном сухим криомагнитом Jastec JM10T100 с теплым отверстием диаметром 100 мм и магнитным полем величиной до 10 Тл. Имеющиеся в наличии источники питания не позволяли провести испытания с системой рекуперации энергии, поэтому коллектор и резонатор гиротрона находились при одинаковом потенциале, равном нулю. Ускоряющее напряжение величиной до 60 кВ обеспечивалось импульсным источником питания. Характеристики источника питания позволяли реализовать импульсно-периодический режим работы с частотой следования импульсов до 10 Гц, длительностью импульса от 20 до 40 мкс и током электронного пучка до 20 А. Режим непрерывной работы не мог быть реализован из-за ограничений системы охлаждения и возможностей источников питания. Для подстройки параметров электронного пучка была изготовлена специальная катодная катушка, позволяющая

дополнительно изменять питч-фактор и радиус электронного пучка в резонаторе. Анод, резонатор, квазиоптический преобразователь и коллектор охлаждались проточной водой. В контуре охлаждения резонатора был установлен специализированный чиллер (система термостатирования жидкостей), позволяющий контролировать и стабилизировать температуру резонатора.



Рисунок 2.1.8: Общий вид гиротрона в криомагните

Для испытаний лампа была установлена в криомагните вертикально, коллектором вверх, после чего путем изменения положения резонатора гиротрона в магнитном поле (малых перемещений гиротрона в вертикальном направлении) определялось оптимальное положение лампы в магнитном поле с точки зрения КПД и мощности. Измерение мощности производилось при помощи водяного калориметра, оснащенного термодатчиками во входном и выходном патрубках, калибровка осуществлялась при помощи нагревателя в контуре калориметра с известной мощностью равной 100 Вт. Выходная мощность гиротрона рассчитывалась на основе

измерения установившейся средней мощности в импульсном режиме, с учетом скважности импульсов, равной 2500.

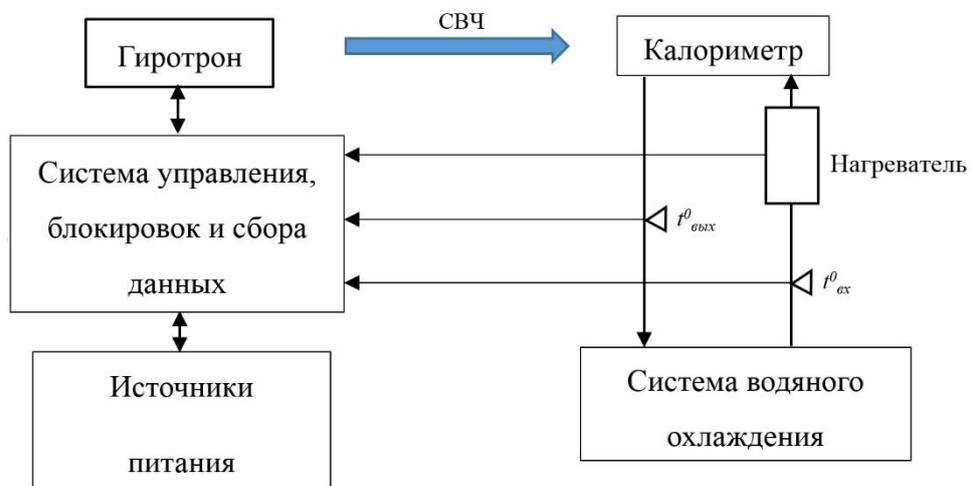


Рисунок 2.1.9: Блок схема калориметрических измерений

Для измерения и регистрации импульсов ускоряющего напряжения был использован быстрый высоковольтный делитель Northstar PVM-5 1:1000, позволяющий измерять высоковольтные импульсы величиной до 100 кВ и частотой следования до 80 МГц с точностью порядка 1.5%. Измерения импульсного тока проводились при помощи катушки Роговского с чувствительностью 50 мВ/А. На рисунке 2.1.10 приведены характерные формы импульсов ускоряющего напряжения и тока электронного пучка.

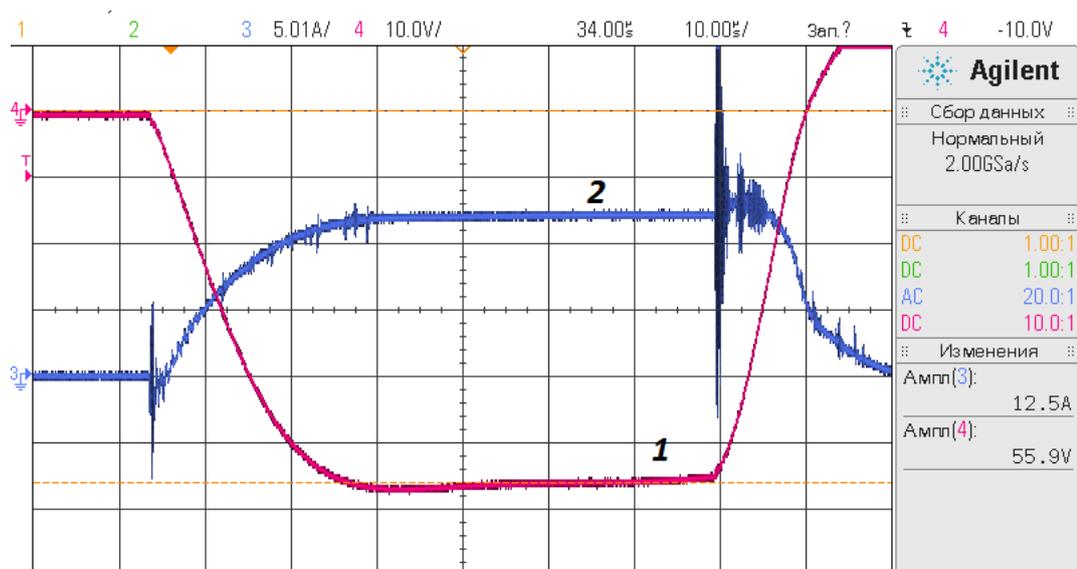


Рисунок 2.1.10: Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (1) и тока электронного пучка (2)

В ходе исследования гиротрона был проведен ряд измерений выходной мощности в зависимости от изменения технических параметров системы. Во всех экспериментах температура воды, охлаждающей резонатор, поддерживалась постоянной на уровне 25°C с точностью 0.5°C при помощи чиллера. Так, на рисунке 2.1.11 представлена характерная зависимость выходной мощности излучения гиротрона от величины основного магнитного поля при ускоряющем напряжении $U_0 = 55\text{ кВ}$ и токе электронного пучка 12.5 А . Выходная мощность более 200 кВт была достигнута при расчетных параметрах электронного пучка, магнитном поле $B_0 = 9.605\text{ Тл}$ с КПД генерации 30% , что хорошо согласуется с результатами расчетов, проведенных на этапе разработки и проектирования гиротрона. С увеличением магнитного поля от точки максимума выходная мощность почти линейно спадает с магнитным полем, и уменьшается в 2 раза при увеличении магнитного поля на 0.05 Тл . Использование дополнительной катушки, расположенной в области катода, позволяет изменять мощность излучения в пределах $8\text{-}10\%$ в зависимости от выбранного режима.

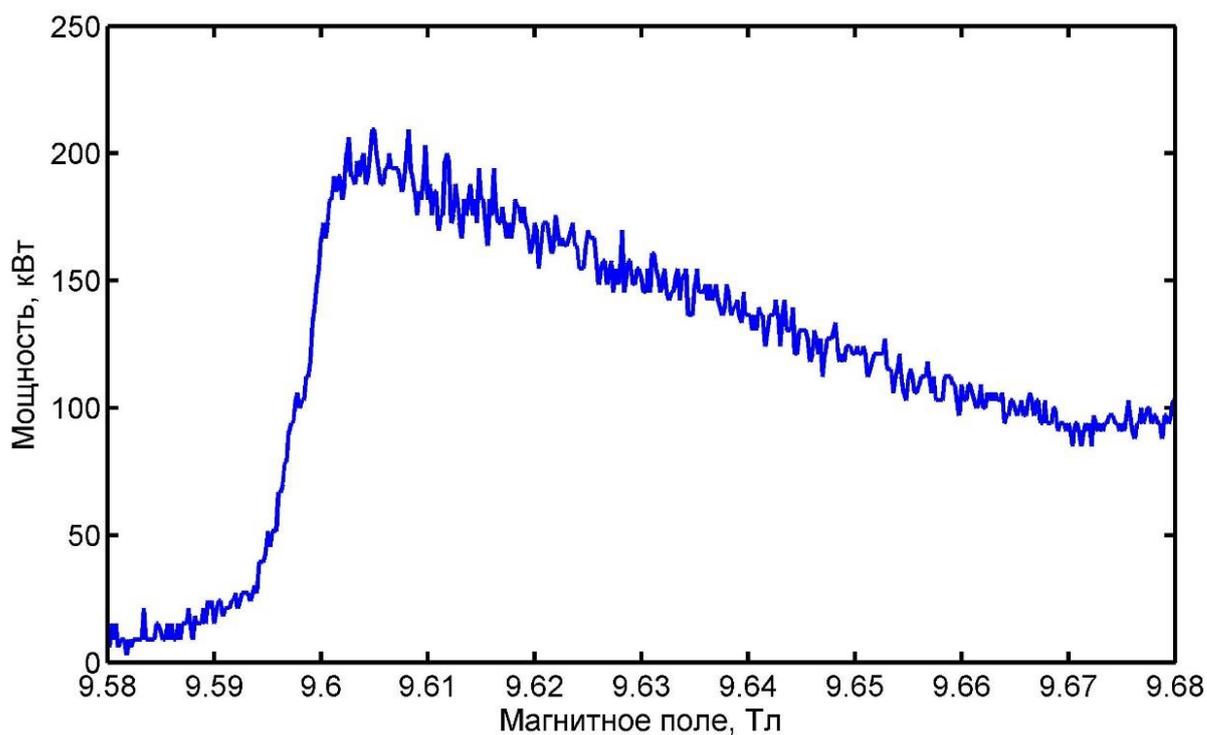


Рисунок 2.1.11: Экспериментальная зависимость мощности генерации от величины магнитного поля при ускоряющем напряжении 55 кВ , токе электронного пучка 12.5 А , токе дополнительной катушки 3 А .

Исследование стартового режима гиротрона показало минимальное значение стартового тока $I_{\text{start}} = 2.5\text{ А}$ при магнитном поле $B_0 = 9.79\text{ Тл}$. В данном режиме система калориметрии позволяла детектировать излучение с мощностью порядка 8 кВт в импульсном режиме.

Полученные значения стартового тока и соответствующего ему магнитного поля согласуются с результатами численного моделирования.

Снижение тепловой нагрузки на резонатор при работе в импульсном режиме позволило провести испытания гиротрона с параметрами, превышающими номинальные расчетные значения. Так, при увеличении тока электронного пучка удалось достичь мощности 330 кВт при токе пучка $I_b = 20$ А и ускоряющем напряжении 55 кВ. Полученные зависимости выходной мощности и КПД от тока электронного пучка и ускоряющего напряжения представлены на Рисунках 2.1.12 и 2.1.13 соответственно.

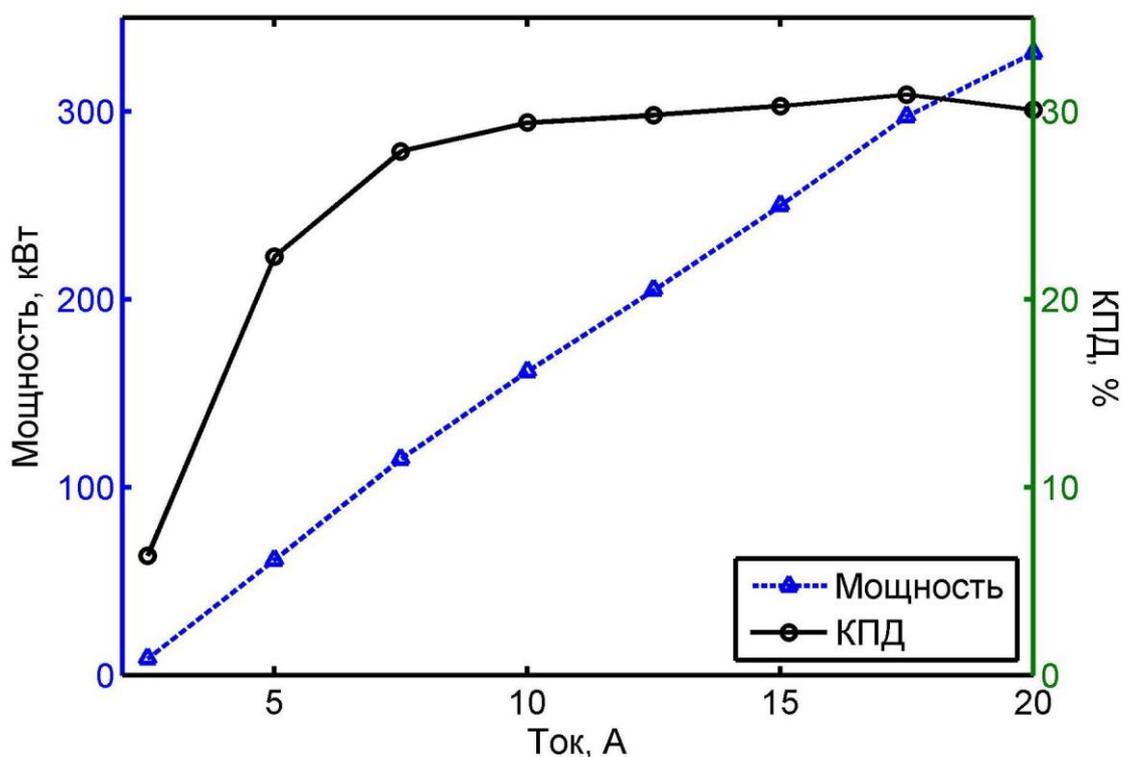


Рисунок 2.1.12: Зависимость выходной мощности и КПД генерации от тока электронного пучка при ускоряющем напряжении $U_0 = 55$ кВ

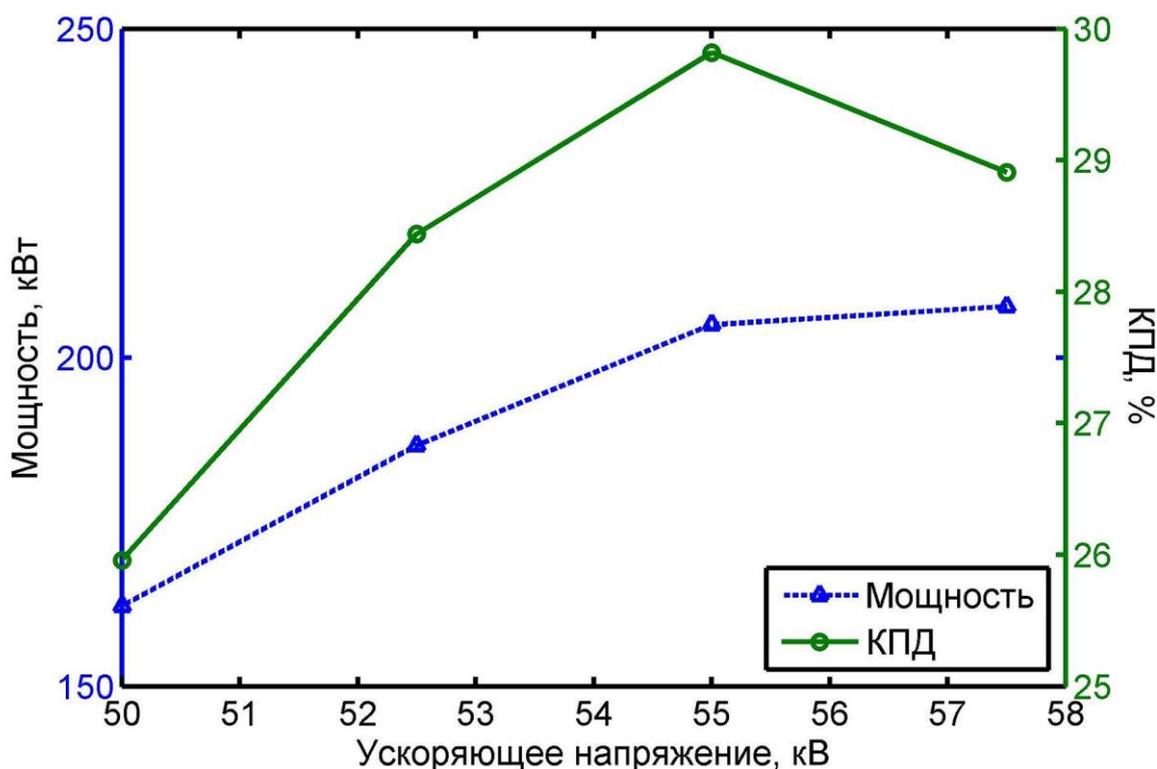


Рисунок 2.1.13: Зависимость выходной мощности и КПД генерации от ускоряющего напряжения U_0 при токе пучка $I_b = 12.5$ А.

На основе зависимости КПД от тока электронного пучка, представленной на рисунке 2.1.6, можно сделать оценку питч-фактора электронного пучка. Полученная в эксперименте зависимость в области токов 2 - 12 А с достаточной точностью соответствует расчетной зависимости КПД при питч-факторе $g = 1.1$. Этому значению питч-фактора соответствует и измеренная величина стартового тока $I_{st} = 2.5$ А. Отсутствие увеличения КПД при дальнейшем росте тока электронного пучка вызвано ростом разброса скоростей электронов, связанным с увеличением пространственного заряда пучка, и связанной с ним неоднородностью электрического поля [84]. Увеличение разброса электронов по скоростям приводит к снижению КПД электронно-волнового взаимодействия по сравнению со случаем без или с малым разбросом скоростей [85], что и наблюдалось в эксперименте.

Измерение частоты выходного излучения при помощи волномера показали значение 249.74 ГГц при $U_0 = 55$ кВ, $I_b = 12.5$ А, $V_0 = 9.625$ Тл, что соответствует расчетным параметрам. Принципиально импульсный режим работы установки не позволил произвести измерения ширины спектра излучения при помощи имеющихся в распоряжении смесителей и спектроанализаторов.

В ходе экспериментального исследования гиротрона были проведены измерения поперечного распределения СВЧ пучка, сформированного встроенным квазиоптическим преобразователем гиротрона и оценено содержание волны TEM_{00} (Гауссова пучка). Измерение производилось по тепловизионной методике [86] в нескольких поперечных сечениях при распространении волнового пучка. Схема измерений приведена на рисунке 2.1.14:

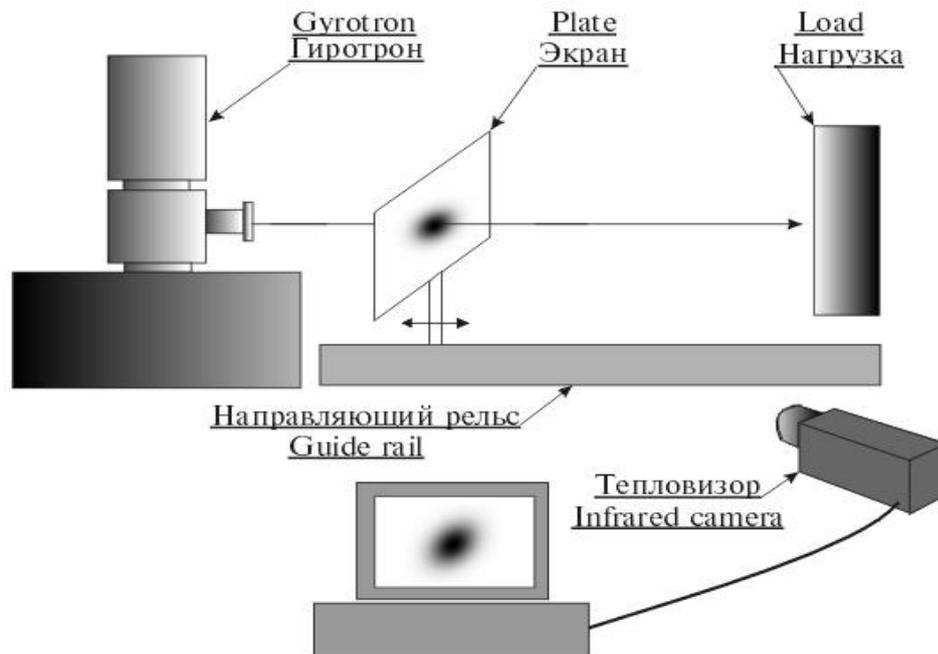


Рисунок 2.1.14: *Схема измерений распределения мощности выходного СВЧ излучения гиротрона при помощи инфракрасной камеры.*

Для измерений использовалась инфракрасная камера “VarioScan 3021 ST”, имеющая высокое разрешение по температуре 0.03° , что позволило иметь динамический диапазон измеряемых данных не менее 30 дБ. Распределение температуры на диэлектрическом экране соответствует проходящему сквозь экран и нагревающему его распределению мощности выходного СВЧ излучения гиротрона. Измерения проводились в нескольких сечениях, что позволяет реконструировать распределение фазы [87]. Присущую обратным задачам некорректность в данном случае можно контролировать, используя очевидный критерий: полученное решение должно подчиняться волновому уравнению [88] – поперечные амплитудные распределения реконструированного поля должны совпадать, с точностью до экспериментальных погрешностей, с измеренными амплитудными распределениями в произвольных контрольных сечениях, не используемых в процедуре реконструкции.

Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка гиротрона представлены на Рисунке 2.1.15. На этом же рисунке приводятся реконструированные

распределения фазы в этих сечениях, обеспечивающие взаимную трансформацию измеренных амплитудных распределений вследствие дифракции с эффективностью более 99%.

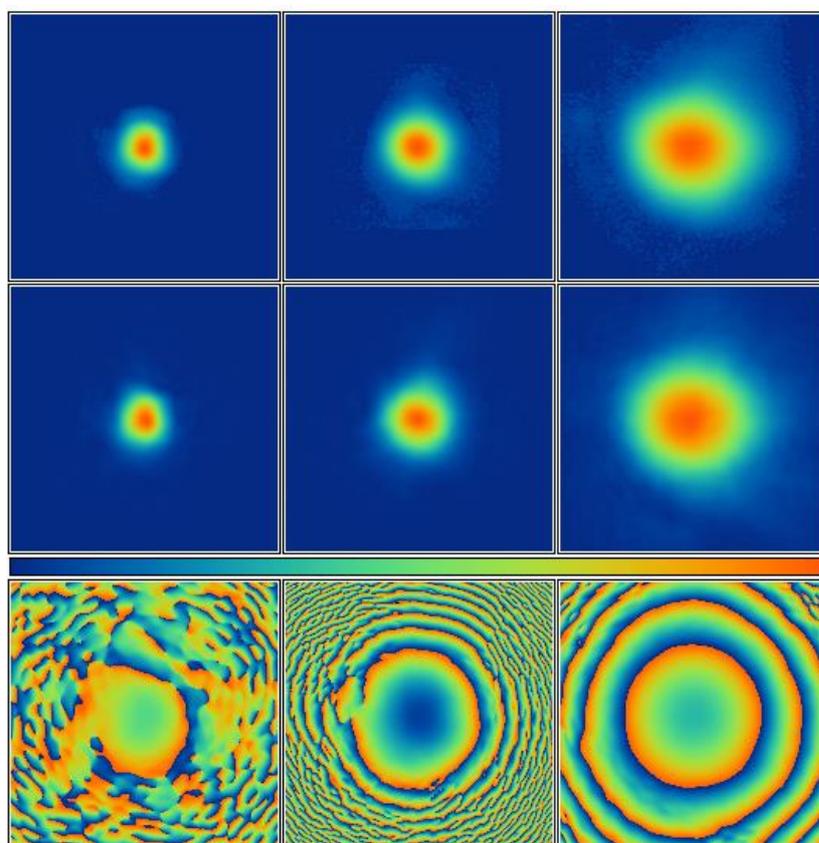


Рисунок 2.1.15: Измеренные распределения амплитуды поля в поперечных сечениях волнового пучка на различных расстояниях от окна гиротрона (533 мм, 1000 мм и 2000 мм) (верхний ряд), реконструированные распределения амплитуды (средний ряд) и фазы (нижний ряд) в этих сечениях. Частота СВЧ излучения гиротрона - 249.74 ГГц. Апертура - 220 мм×220 мм.

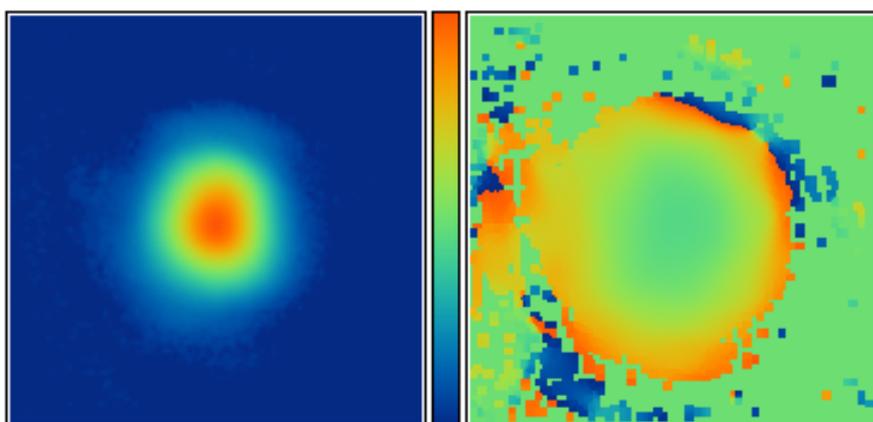


Рисунок 2.1.16: Распределения амплитуды и реконструированной фазы СВЧ излучения на расстоянии $Z = 533$ мм от окна гиротрона. Апертура - 120 мм×120 мм.

Как показывает анализ, содержание волны TEM_{00} (Гауссов волновой пучок) в реконструированном волновом пучке составляет 98.6 % (рис. 2.1.16). По результатам анализа волнового пучка, радиусы гауссова пучка по мощности составляют: $r_x = 12.4$ мм, $r_y = 14.5$ мм; радиусы кривизны фазового фронта гауссова пучка: $R_x = 1336$ мм, $R_y = 1441$ мм. Реконструировав распределение фазы в поперечных сечениях, и, зная распределения амплитуды волнового пучка, можно рассчитать распределение поля, используя метод Кирхгофа, в любой точке пространства.

2.2 Гиротрон для создания локализованного газового разряда

Применение мощных источников суб-ТГц излучения не ограничивается задачами нагрева плазмы и управления током. В последние годы активно ведутся исследования по применению мощного излучения в диапазоне от сотен гигагерц до терагерца для дистанционного детектирования источников ионизирующего излучения [89,90] и для создания источников точечного ультрафиолетового излучения [91]. Для реализации такого рода проектов необходимо создание источника излучения, обладающего не только требуемыми характеристиками по мощности и эффективности работы, но и обладающего достаточной надежностью и стабильностью для долговременной работы с хорошей повторяемостью результатов. Требования приложений по мощности и частоте излучения для достижения определенной напряженности поля в малом объеме обуславливают применение в качестве источников излучения суб-ТГц гиротронов. При этом возможностей существующих криомагнитов уже недостаточно для реализации мощных гиротронов на основном циклотронном резонансе в суб-ТГц диапазоне частот, что обуславливает применение технологии создания сверхсильных импульсных магнитных полей. Такие поля величиной до 50 Тл позволяют создавать мощные гиротроны с длительностью импульсов суб-ТГц и ТГц излучения в несколько десятков микросекунд. С целью уменьшения энергоёмкости соленоиды для гиротронов с импульсным магнитным полем должны иметь как можно меньший размер, ограниченный лишь условием его достаточности для размещения резонатора гиротрона. Миниатюризация проходного отверстия соленоида приводит к необходимости использовать внешние квазиоптические преобразователи излучения в узконаправленные волновые пучки, что является отличительной особенностью гиротронов с импульсным магнитным полем. Необходимость использования интенсивных электронных пучков определяет применение катодов большого размера, что в совокупности с резкой компрессией и декомпрессией электронного пучка, вызванной малыми размерами соленоида, приводит к неадиабатичности электронно-оптической системы формирования электронного

пучка. Это усложняет как задачу формирования пучка с малым разбросом скоростей, так и задачу создания коллекторных систем, способных перехватить мощный электронный пучок без перегрева отдельных участков. Поэтому необходимы экспериментальные исследования надежности и устойчивости работы импульсного гиротрона

В данном разделе приведены результаты долговременного исследования субтерагерцового гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц с импульсным магнитным полем [10].

2.2.1 Конструкция и расчетные параметры гиротрона

В задачах, связанных с созданием локализованного газового разряда в воздухе, для превышения амплитудой электромагнитного поля пороговых значений, излучение с мощностью свыше 100 кВт должно быть сфокусировано в апертуру с характерным диаметром порядка 1 мм. Исходя из желания иметь достаточно малый объем сфокусированного поля, и приемлемые потери при транспортировке излучения от источника до исследуемого объекта, была выбрана частота 0.67 ТГц, попадающая в одно из окон прозрачности атмосферы. Исходя из требуемой частоты и мощности компактного источника субтерагерцового излучения, в качестве такого источника может рассматриваться только гиротрон на основном циклотронном резонансе. Работа на гармониках циклотронной частоты в этом случае оказывается затруднена, так как при работе на гармониках не только усиливается проблема конкуренции мод, особенно с модами на первой гармонике, но и уменьшается связь электронного пучка с полем резонатора, что требует увеличения тока электронного пучка для достижения сопоставимого КПД и мощности излучения. Однако, требуемое для обеспечения условий циклотронного резонанса магнитное поле величиной порядка 27 Тл может быть реализовано только в импульсном режиме, так как возможности современных криомагнитов ограничены полями порядка 20 Тл, а магниты на основе катушек Биттера [92] требуют больших токов и высокопроизводительных систем охлаждения.

Таким образом, для реализации гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц на основном циклотронном резонансе была выбрана схема с импульсным соленоидом. Магнитное поле создавалось при помощи соленоида, намотанного из медного провода непосредственно на корпус гиротрона, для уменьшения энергии магнитного поля. В процессе работы соленоид находился в емкости с жидким азотом для стабилизации его температуры, уменьшения сопротивления проводника и снижения теплоемкости [93].

С учетом параметров магнитного поля, создаваемого соленоидом, была разработана электронно-оптическая система, позволяющая сформировать винтовой электронный пучок с требуемой энергией и питч-фактором при минимально возможном разбросе скоростей электронов. Для перехвата отработанных электронов был использован коллектор из молибдена, представляющий собой конус, образующая которого составляет угол порядка 5° с силовой линией магнитного поля для увеличения площади токооседания пучка. Общая схема гиротрона, включая магнитную и электродинамическую системы приведен на Рисунке 2.2.1.

В качестве рабочей моды гиротрона была выбрана мода круглого волновода $TE_{31,8}$ [94], возможность возбуждения которой в мощных гиротронах была продемонстрирована на частоте 170 ГГц [95]. Необходимость перехода на моду с большим индексом определена требованием достижения существенной выходной мощности, которая может быть реализована только в резонаторе большой сверхразмерности. Переход к модам высокого порядка обостряет проблему конкуренции мод, ввиду увеличения плотности спектра мод, однако предварительное численное моделирование показывало возможность возбуждения выбранной моды в процессе возбуждения.

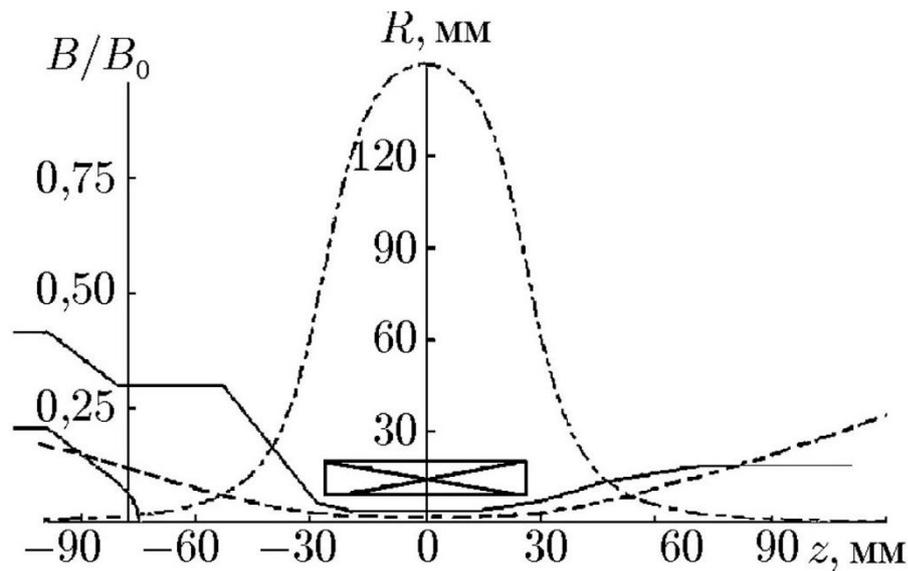


Рисунок 2.2.1: Общий вид магнитной и электродинамической системы гиротрона; показаны продольное распределение магнитного поля (штрих-пунктир) и траектория ведущего центра орбит электронов (пунктир).

Оптимизация параметров резонатора производилась исходя из баланса между эффективностью взаимодействия электронов с волной и величиной омических потерь в стенках резонатора. Так как конструкция лампы предусматривала возможность ее разборки и замены

резонатора, в ходе начальных испытаний гиротрона длина однородного участка резонатора была выбрана равной 6 мм, радиус резонатора $R_w = 4.54$ мм. Для выбранного профиля резонатора омические потери составляют порядка 20% от выходной мощности гиротрона. На Рисунке 2.2.2 приведен профиль резонатора и продольный профиль высокочастотного поля.

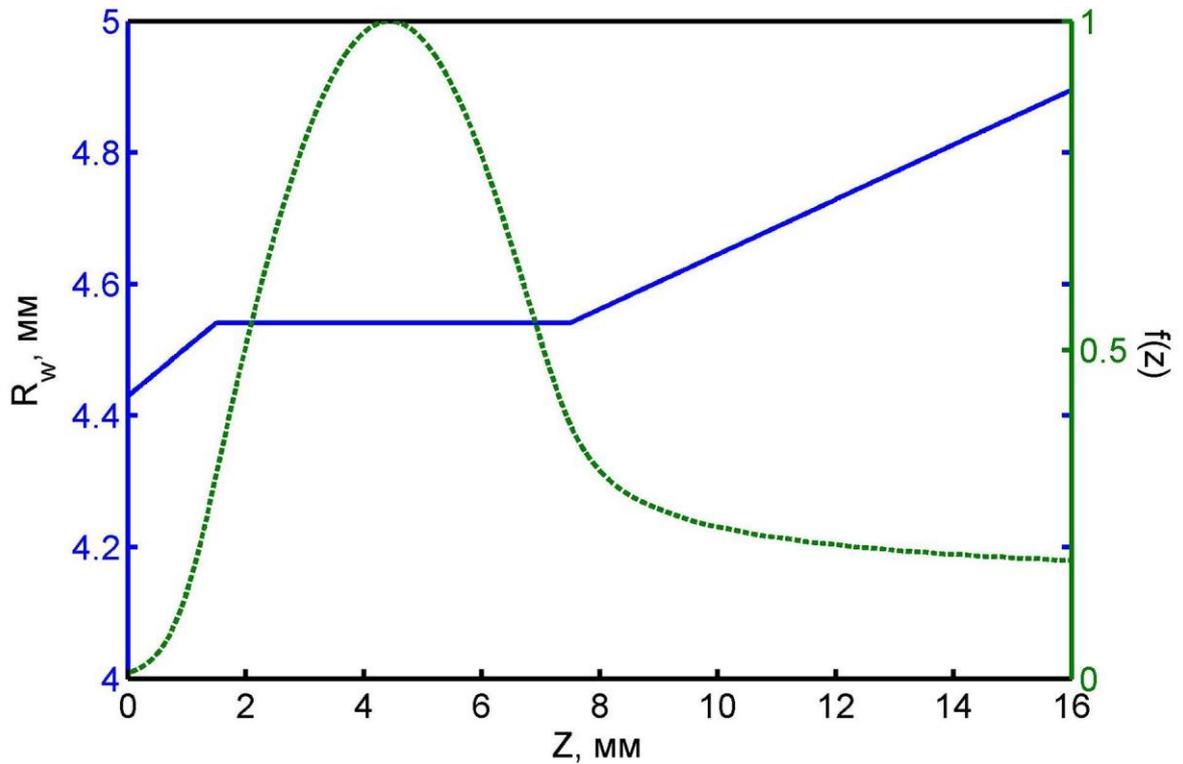


Рисунок 2.2.2: Профиль резонатора (сплошная линия) для моды $TE_{z1,8}$ и продольный профиль высокочастотного поля (пунктирная линия)

Для достижения планируемой мощности более 200 кВт параметры электронного пучка были определены следующим образом: ускоряющее напряжение $U_0 = 70$ кВ, ток электронного пучка $I_0 = 15$ А, питч-фактор $g = 1.27$. Численное моделирование процесса взаимодействия показало возможность достижения при выбранных параметрах резонатора и электронного пучка поперечного КПД более 60% и полного КПД с учетом омических потерь порядка 30 - 35%, что соответствует выходной мощности более 200 кВт. Результаты моделирования зоны генерации рабочей моды в одномодовой модели с нефиксированной структурой поля приведены на Рисунке 2.2.3. Также, для проверки устойчивости возбуждения рабочей моды, было проведено моделирование процесса установления колебаний с учетом изменения во времени ускоряющего напряжения и тока пучка, показавшее наличие достаточно сложной динамики возбуждения мод в процессе нарастания напряжения до рабочего значения, равного 70 кВ [89].

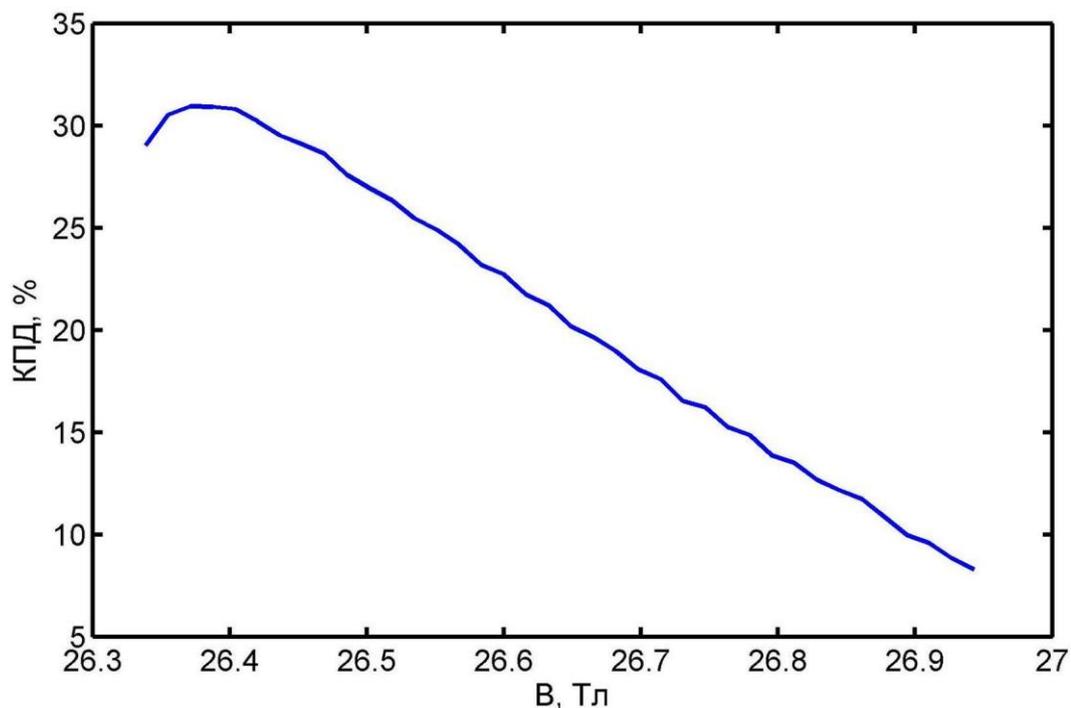


Рисунок 2.2.3: Зависимость КПД гиротрона от величины магнитного поля при токе электронного пучка 15 А и ускоряющем напряжении 70 кВ

Излучение из резонатора гиротрона транспортируется по круглому волноводу до выходного окна, представляющего собой тефлоновый диск толщиной 2 мм, в котором поглощается порядка 17-20% мощности. Далее излучение направляется в простой квазиоптический преобразователь, в котором формируется гауссов пучок, а затем дополнительно фокусируется для получения минимально возможного размера фокального пятна, необходимого для задач создания локализованного газового разряда.

Параметр	Ед. изм.	Значение
Рабочая частота	ГГц	670
Рабочая мода		TE _{31,8}
Ускоряющее напряжение, U ₀	кВ	70
Магнитное поле в резонаторе	Тл	27
Ток пучка	А	15
Радиус резонатора	мм	4.54
Длина однородного участка резонатора	мм	6
Средний радиус электронного пучка в резонаторе	мм	2.3

Таблица 3: Расчетные параметры импульсного гиротрона

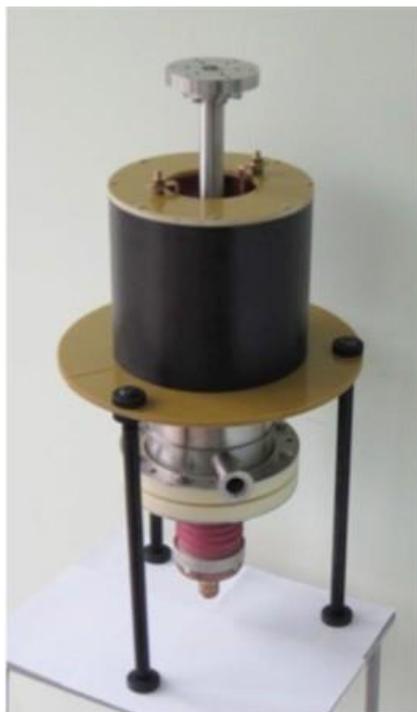


Рисунок 2.2.4: Внешний вид импульсного гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц

2.2.2 Экспериментальное исследование гиротрона

Экспериментальное исследование производилось в импульсном режиме, с частотой следования импульсов 1 импульс в 2 минуты, обусловленной характерным временем охлаждения импульсного соленоида гиротрона после прохождения по нему импульса тока. Источником питания соленоида выступал разработанный в ИПФ РАН источник, обеспечивающий повторяемость амплитуды и формы импульса тока в соленоиде (и, соответственно, магнитного поля) от импульса к импульсу с точностью на уровне 0.1%. Ускоряющее напряжение создавалось импульсным источником питания, имеющим возможность формирования импульсов длительностью до 40 мкс с амплитудой до 70 кВ и током пучка более 20 А. Детектирование мощности производилось при помощи специального калориметра, имеющего чувствительность на уровне 10 мДж в одиночном импульсе [96]. Измерения мощности производились как непосредственно после выходного окна гиротрона, без установленного квазиоптического преобразователя, так и после преобразования рабочей моды в гауссов волновой пучок. Измерения импульсов ускоряющего напряжения и тока электронного пучка производились при помощи стационарного высоковольтного делителя 1:1000 и катушки Роговского 50 мВ/А соответственно. Так как конструкция гиротрона обеспечивает возможность его разборки и

модификации или замены отдельных частей, откачка внутреннего объема производится комбинацией турбомолекулярного насоса, являющегося первой ступенью, и электроразрядного насоса. Такая система позволяет поддерживать давление в рабочем пространстве $1 \cdot 10^{-6}$ Торр при нагреве катода до температуры свыше 1500°C и восстанавливать требуемые вакуумные условия после прохождения импульса тока.

В ходе исследования гиротрона было установлено, что разборная конструкция гиротрона, не позволяющая провести полный цикл обработки поверхностей для вакуумных условий ограничивает возможности гиротрона по увеличению ускоряющего напряжения. Максимальная амплитуда импульса ускоряющего напряжения, обеспечивающая устойчивую работу гиротрона, не превышает 60 кВ и ограничивается пробоем внутри гиротрона при прохождении импульса тока. Таким образом, для достижения требуемой мощности порядка 200 кВт был увеличен ток электронного пучка с расчетных 15 А до 20-22 А. В таком режиме максимальная мощность, равная 210 кВт, была получена при ускоряющем напряжении $U_0 = 58$ кВ и токе $I_b = 22$ А с КПД 16.5%. Максимальный КПД, равный 20%, был достигнут при меньшем токе электронного пучка $I_b = 16$ А и ускоряющем напряжении $U_0 = 57$ кВ.

Негативным последствием ограничения максимального ускоряющего напряжения и повышения тока электронного пучка стало увеличение тепловой нагрузки на коллектор гиротрона на величину до 20%. Результатом такого увеличения тепловыделения в области токооседания электронного пучка является существенное увеличение температуры коллектора в момент импульса и возрастание связанных с ней механических нагрузок на поверхность коллектора. Кроме механических нагрузок, определяющих возможности долговременной работы узла в режиме циклического нагрева и охлаждения, резкий нагрев поверхностного слоя и механическое воздействие электронов приводят к падению уровня вакуума в объеме гиротрона в момент прохождения импульса до уровня $1 \cdot 10^{-5}$, что является ограничивающим фактором для длительности импульса ускоряющего напряжения. В ходе исследований была определена максимальная длительность импульса ускоряющего напряжения, обеспечивающая стабильную работу гиротрона без возникновения пробоя, равная 20 мкс. Дальнейшее повышение длительности приводит к неустойчивой работе, связанной с электрическим пробоем за счет ухудшения вакуумных условий.

В ходе исследования коллектор гиротрона был извлечен для оценки воздействия электронного пучка с большей мощностью. На Рисунке 2.2.5 представлена фотография внутренней поверхности коллектора гиротрона после воздействия более 3 тысяч импульсов тока.

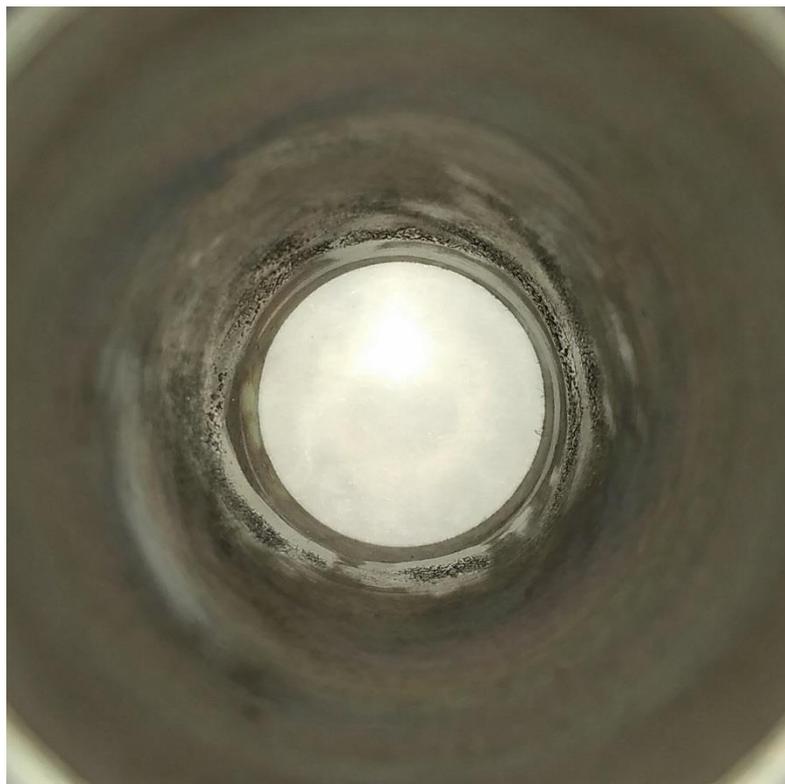


Рисунок 2.2.5: Внутренняя поверхность коллектора импульсного гиротрона

Как видно на фотографии, рабочая поверхность коллектора в месте попадания электронного пучка заметно повреждена, что свидетельствует об избыточном тепловыделении. Более того, наблюдаемое в эксперименте место контакта пучка с поверхностью коллектора расположено ближе к выходному раскрытию резонатора, чем в расчетной модели гиротрона. Это свидетельствует об экранировании импульсного магнитного поля в области коллектора объемом металла (нержавеющая сталь) корпуса и непосредственно коллектора (молибден) гиротрона. Для решения указанной проблемы была предложена модификация магнитной системы гиротрона, состоящая в намотке дополнительной секции импульсного соленоида, длиной 10 мм, расположенной в области коллектора. Такая модификация магнитной системы позволяет удлинить область спада магнитного поля в направлении коллектора и сдвинуть точку контакта электронного пучка на 20 мм, тем самым увеличив площадь токооседания как минимум в 1.6 раз. Исходный профиль магнитного поля и профиль модифицированного соленоида приведены на Рисунке 2.2.6.

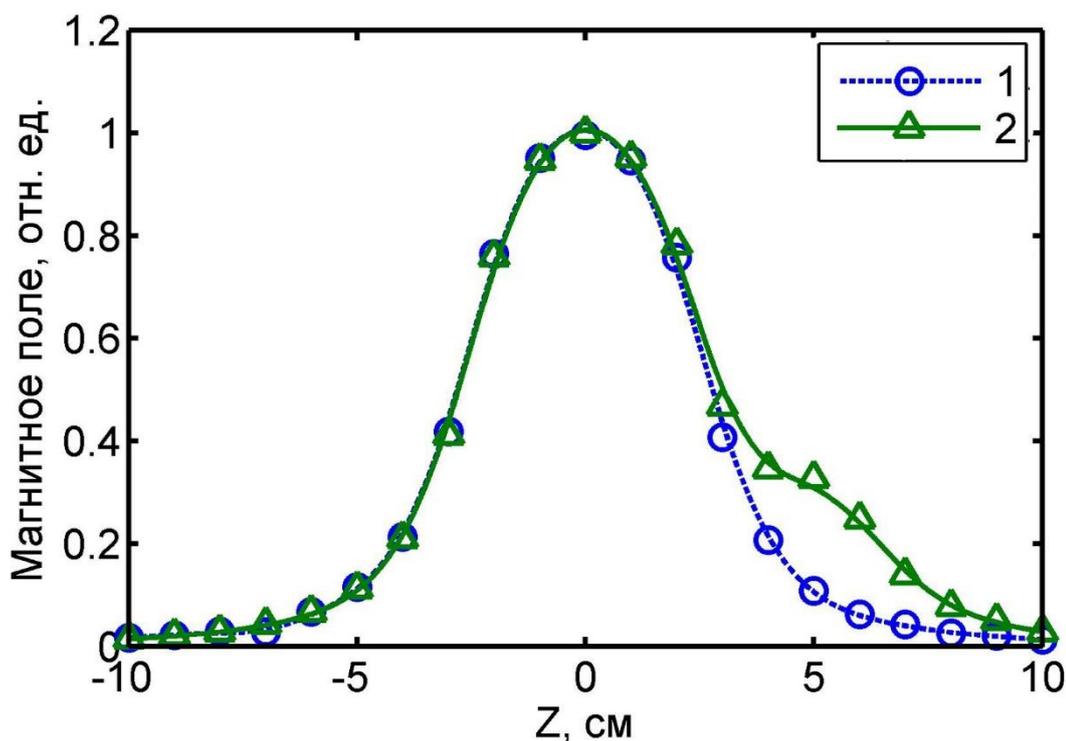


Рисунок 2.2.6: Профиль магнитного поля исходного соленоида (1) и модифицированной магнитной системы (2)

Исследование коллектора после модернизации магнитной системы подтвердили сдвиг точки контакта электронного пучка с поверхностью и отсутствие локального перегрева материала коллектора. Улучшение вакуумных условий за счет меньшего нагрева коллектора гиротрона позволило увеличить длительность импульса ускоряющего напряжения до 40 мкс. Анализ статистики пробоев в процессе работы гиротрона также показал снижение доли неудачных высоковольтных импульсов с 8-10% до 4%. На основе данного гиротрона совместно с группой А.В. Водопьянова был создан гиротронный комплекс для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда, позволивший получить рекордные мощности вакуумного и экстремального ультрафиолетового излучения. Увеличение длительности высоковольтного импульса и снижение числа холостых импульсов позволяют расширить возможности импульсного суб-ТГц гиротрона и использовать его для дальнейших исследований условий создания и динамики газового разряда.

Заключение к главе 2

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований двух мощных высокочастотных гиротронов на основном циклотронном резонансе.

В п. 2.1 приведены параметры прототипа гиротрона для установок термоядерного синтеза нового поколения с рабочей частотой 250 ГГц. Показаны результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований, сделаны выводы о параметрах электронного пучка в реальном устройстве. В ходе экспериментов в импульсно-периодическом режиме работы продемонстрирована выходная мощность 330 кВт с КПД генерации более 30%. Проведены измерения выходного пучка, показавшие 98.6% содержание Гауссова пучка.

В п. 2.2 рассмотрен мощный гиротрон с частотой излучения 670 ГГц и мощностью излучения до 200 кВт на основе импульсного солениода с магнитным полем до 27 Тл. Проведены исследования надежности работы гиротрона и предложена модернизация магнитной системы для улучшения режима работы коллектора. В результате модернизации вдвое увеличена максимально допустимая длительность высоковольтного импульса и улучшена устойчивость работы по отношению к высоковольтному пробую.

Заключение

Основные результаты диссертации

1. Предложен механизм плавной механической перестройки частоты излучения в полосе определяемой добротностью резонатора за счет изменения положения подвижной диафрагмы в выходном волноводном тракте. Аналогичный метод может использоваться для медленной модуляции мощности или стабилизации параметров излучения гиротронов;
2. Реализована система быстрого управления параметрами излучения гиротронов с триодной магнетронно-инжекторной пушкой на основе изменения потенциала анода магнетронно-инжекторной пушки с малой межэлектродной емкостью. В эксперименте показана возможность модуляции параметров излучения с частотой до 1 МГц;
3. За счет применения системы фазовой автоподстройки частоты экспериментально достигнута рекордно узкая линия излучения суб-ТГц генератора при уровне мощности в сотни ватт. Впервые в гиротронах получена ширина спектра в 1 Гц при долговременной стабильности до 10^{-12} ;
4. Продемонстрированы возможности дальнейшего продвижения мощных гиротронов на основном циклотронном резонансе в суб-ТГц область частот. На частоте 250 ГГц получена выходная мощность более 300 кВт при КПД выше 30% в гиротроне без рекуперации энергии;
5. На основе импульсного гиротрона с рабочей частотой 670 ГГц и мощностью 200 кВт реализован гиротронный комплекс для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда, позволивший получить рекордную мощность излучения в диапазонах вакуумного и экстремального ультрафиолета.

Приложение 1. Описание расчетных моделей гиротрона

Численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия было выполнено на основе двух аналитических моделей гиротрона.

Первая модель основана на самосогласованной системе уравнений с фиксированной продольной структурой высокочастотного (ВЧ) поля [97]:

$$\frac{da}{d\zeta} - i(\Delta + |a|^2 - 1)a = i \left(\sum_s a^{n_s-1} C_s f_s e^{-i((m_s-n_s)\varphi+n_s\theta_0)} \right)^* \quad (\text{П1.1})$$

$$\Phi_s = -\frac{i}{2\pi} \frac{1}{C_s} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} (a^*)^{n_s} f_s^* d\zeta \right] e^{in_s\theta_0} d\theta_0 \right\} e^{i(m_s-n_s)\varphi} d\varphi \quad (\text{П1.2})$$

$$\frac{dC_s}{dt} = C_s \left[I_s \Phi_s - \frac{1}{2Q_s} \frac{\omega_s}{\omega_o} + i \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} - n_s \right) \right] \quad (\text{П1.3})$$

где $t = \omega_o t_d$ - безразмерное время (ω_o - опорная частота, по которой производится усреднение, t_d - время в секундах), $\zeta = (\beta_{\perp}^2 / 2\beta_{\parallel}) (\omega_o z / c)$ - безразмерная координата вдоль оси гиротрона (β_{\parallel} и β_{\perp} соответственно отношение продольной и поперечной скорости электрона к скорости света c), $a = (p_{\perp} / p_{\perp 0}) \exp(-i(\theta - \theta_0))$ - нормированный поперечный импульс электронов (θ - медленно меняющаяся фаза вращательного движения электронов относительно ВЧ поля), $\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left(1 - \frac{\omega_H}{\omega_o} \right)$ - безразмерная расстройка циклотронного резонанса (ω_H - релятивистская циклотронная частота электрона), $f_s(\zeta)$ - продольный профиль поля в резонаторе, φ - азимутальная координата ведущего центра траектории электронов, $C_s = F_s e^{i\alpha_s}$ - комплексная амплитуда ВЧ-поля, I_s - безразмерный параметр тока моды, ω_s и Q_s - соответственно частота и добротность s -ой рассматриваемой моды, m_s, n_s - азимутальный индекс и номер циклотронной гармоники s -ой моды.

Для гиротрона с цилиндрическим резонатором кругового сечения и соосным аксиально-симметричным тонким электронным пучком без разброса по энергиям и поперечным скоростям модуль амплитуды ВЧ поля моды и безразмерный параметр тока определяются следующим образом:

$$F_s = 4 \frac{A_s}{H_0} \beta_{\perp}^{n_s-4} \left(\frac{n_s^{n_s}}{2^{n_s} n_s!} \right) J_{m_s-n_s} \left(v_{m_s, p_s} R_b / R_w \right) \quad (\text{П1.4})$$

$$I_s = 0.47 \cdot 10^{-3} I_b \frac{\beta_{\perp}^{2(n_s-2)}}{\gamma_0 \beta_{\parallel}} \left(\frac{n_s^{n_s+1}}{2^{n_s} n_s!} \right)^2 \frac{1}{\int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} f_s^2(\zeta) d\zeta} G_{m,p} \quad (\text{П1.5})$$

В (П1.4) A_s - амплитуда высокочастотного поля s -й моды в резонаторе, H_0 - величина статического магнитного поля, $v_{m,p}$ - корень уравнения $J'_m(v_{m,p})=0$, соответствующий рассматриваемой $TE_{m,p}$ моде, $J_m(v_{m,p})$ - функция Бесселя, I_b - ток электронного пучка в Амперах. Величина $G_{m,p}$ определяет связь электронного пучка и моды волновода $TE_{m,p}$:

$$G_{m,p} = \frac{J_{m_s-n_s}^2 \left(v_{m_s, p_s} R_b / R_w \right)}{\left(v_{m_s, p_s}^2 - m_s^2 \right) J_{m_s}^2 \left(v_{m_s, p_s} \right)} \quad (\text{П1.6})$$

где R_b, R_w - радиусы электронного пучка и резонатора.

Данные уравнения получены из уравнений Максвелла и уравнения движения электронов в статическом магнитном поле и поле $TE_{m,p}$ мод резонатора путем усреднения по периоду высокой частоты $T = 2\pi / \omega_0$ [98]. В приведенных уравнениях не учитывается влияние разброса электронов по энергиям, скоростям и положению ведущих центров, а также изменение продольной структуры ВЧ поля при изменении параметров системы. Для большинства расчетов продольная структура поля считалась гауссовой:

$$f(\zeta) = \exp \left(- \left(\frac{2\zeta}{\mu} \right)^2 \right) \quad (\text{П1.7})$$

где $\mu = (\beta_{\perp}^2 / 2\beta_{\parallel}) (\omega_0 L / c)$ - безразмерная длина пространства взаимодействия, L - длина резонатора. Данное приближение хорошо аппроксимирует структуру поля в высокочастотном резонаторе гиротрона, и позволяет исследовать основные зависимости и особенности электронно-волнового взаимодействия в гиротроне.

Уравнение движения электронов (П1.1) интегрируется с начальным условием $a(\zeta_{in}) = 1$, в пределах $\zeta_{in, out} = \mp \sqrt{3}\mu/2$. На основе решения этого уравнения определяется так называемый

поперечный КПД взаимодействия электронов с волной, характеризующий долю вращательной энергии электронов, отданную волне:

$$\eta_{\perp} = 1 - (1/2\pi) \int_0^{2\pi} |a(\zeta_{out})|^2 d\theta_0 \quad (\text{П1.8})$$

Для определения областей возбуждения выбранной рабочей моды и определения основных конкурирующих мод в процессе включения гиротрона исследовалась зависимость стартового тока от параметров установки. Стартовый ток гиротрона в рамках теории с фиксированной гауссовой продольной структурой поля определяется как $I_{start} = 1/\sigma_{lin}$, где σ_{lin} - активная часть линейной проводимости пучка по отношению к полю резонатора:

$$\sigma_{lin} = -\frac{\pi}{4} \mu^2 \left(1 + \frac{\partial}{\partial \Delta} \right) \exp \left\{ -\frac{(\mu \Delta)^2}{8} \right\} \quad (\text{П1.9})$$

Приведенная выше модель с достаточной точностью описывает процессы взаимодействия электронов с модами резонатора, и позволяет провести оценки влияния различных факторов на КПД и стабильность работы гиротрона. В ряде задач с наличием отраженного сигнала использовалась модификация этой системы уравнений, разработанная Ю.В. Новожиловой, в которой учитывается внешний сигнал в резонаторе гиротрона [59].

В задачах, требовавших учета изменения структуры поля в электродинамической системе, наличия разброса электронов по скоростям и омических потерь, применялась модель с самосогласованной одномодовой системой уравнений с нефиксированной структурой высокочастотного поля [99].

$$\frac{dp_{\perp}}{dz} = \text{Re} \left[\left(\frac{iF}{\beta_{\parallel}} + \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} \right) e^{-i\theta} \right] k_{\perp} J'_n(\zeta) G_{m,p}^{1/2} + \frac{p_{\perp}}{2B_0} \frac{dB_0}{dz} \quad (\text{П1.10})$$

$$p_{\perp} \frac{d\theta}{dz} + \frac{p_{\perp}}{\beta_{\parallel}} \left(\frac{k}{n} - \omega_H \right) = \text{Re} \left[\left(\frac{F(1 - \beta_{\perp}^2 \gamma / \gamma_0)}{\beta_{\parallel}} - \frac{i}{k} \frac{dF}{dz} \right) e^{-i\theta} \right] \frac{k_{\perp}}{\zeta} J_n(\zeta) G_{m,p}^{1/2} \quad (\text{П1.11})$$

$$\frac{dp_{\parallel}}{dz} = -\text{Re} \left[\frac{dF}{dz} e^{-i\theta} \right] \frac{p_{\perp} k_{\perp}}{p_{\parallel} k} J'_n(\zeta) G_{m,p}^{1/2} - \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel}} \frac{1}{2B_0} \frac{dB_0}{dz} \quad (\text{П1.12})$$

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + h^2 F = Ik \left\langle \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}} e^{i\theta} k_{\perp} J'_n(\zeta) G_{m,p}^{1/2} \right\rangle \quad (\text{П1.13})$$

Где $F(z)$ – нефиксированная продольная структура ВЧ поля, $k = \omega / c$ - волновое число, $k_{\perp} = v_{m,p} / R_w(z)$ - поперечное волновое число, $\xi = v_{m,p} \beta_{\perp} / \omega_H R_w(z)$ - радиус электронной орбиты, $h^2 = k^2 - k_{\perp}^2 (1 + i / Q_{\Omega})$. Уравнения (П1.10) - (П1.13) интегрируются с граничными условиями, соответствующими невозмущенному винтовому электронному пучку $p_{\perp} = p_{\perp 0}$, $p_{\parallel} = p_{\parallel 0}$, $\theta = \theta_0$, экспоненциальному спаданию ВЧ поля во входном сечении резонатора $dF / dz = |h|F$ и условию излучения на выходном конце $dF / dz = -ihF$, $h > 0$. Данная расчетная модель была неоднократно проверена и использована при проектировании гиротронов различных частотных диапазонов и уровней мощности.

Приложение 2. Компенсация эффектов провисания потенциала в мощных гиротронах с импульсным режимом работы

Параметры многих высокочастотных гиротронов предполагают принципиально импульсный режим работы прибора, обусловленный как характеристиками источников питания, так и возможностями магнитных систем по созданию магнитных полей требуемой величины. При этом работа гиротронов в длинных импульсах и непрерывном режиме, и работа в коротких импульсах отличается по многим параметрам. Для получения максимальной мощности, при проектировании гиротронов обязательно учитывают ограничение тока пространственным зарядом, то есть ограничение максимального тока, способного протекать через волновод или резонатор без отражения из-за поля пространственного заряда самого пучка. Для режимов с большим током одним из ключевых эффектов, проявляющимся при длительностях импульса порядка десятков миллисекунд и более, является эффект воздействия положительных ионов, выражающийся в частичной компенсации пространственного заряда электронов и изменению уровня провисания потенциала. Возникновение ионов объясняется ионизацией нейтральных молекул остаточных газов при столкновении с электронами пучка, и для характерных для гиротронов вакуумных условий 10^{-7} Торр характерные времена ионизации составляют 10 – 100 миллисекунд.

Задача определения максимального тока, ограниченного пространственным зарядом и исследование процессов ионизации и компенсации пространственного заряда были рассмотрены в целом ряде работ, например [100–102]. Одним из важных выводов из этих исследований является утверждение о невозможности полной компенсации пространственного заряда электронного пучка. Аналитические расчеты и экспериментальные исследования мощных электронных приборов позволяют оценить степень ионной компенсации величиной порядка 60–70% для существующих в настоящий момент электронно-оптических и электродинамических систем [103,104].

Учет провисания потенциала в аналитической модели

Явление провисания потенциала объясняется присутствием электронного пучка в электродинамической системе гиротрона [67]. Аксиально симметричный пучок радиуса R_b без

разброса по скоростям внутри круглой трубки радиуса R_w вызывает провисание потенциала, равное:

$$\Delta U = \frac{2I_b}{v_{\parallel}} \ln \left(\frac{R_w}{R_b} \right) \quad (\text{П2.1})$$

в (П2.1) I_b – ток электронного пучка, v_{\parallel} – дрейфовая (продольная) скорость электронов. При появлении положительных ионов полный ток пучка, определяющий провисание потенциала, должен быть помножен на $(1 - f_i)$, где величина f_i характеризует долю компенсации пространственного заряда электронного пучка положительными ионами. Таким образом, провисание потенциала при наличии положительных ионов будет определяться как:

$$\Delta U = (\Delta U)_{n_i=0} (1 - f_i) \quad (\text{П2.2})$$

где первый множитель в правой части равен провисанию потенциала при отсутствии ионов.

При наличии провисания потенциала, Лоренц-фактор электронов в пучке будет равен:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{\perp}^2 - \beta_{\parallel}^2}} = 1 + \frac{e(U - \Delta U)}{mc^2} \quad (\text{П2.3})$$

где U – ускоряющее напряжение для пучка. Как следует из формул (П2.1) - (П2.3), при увеличении тока пучка происходит уменьшение энергии электронов, а при появлении положительных ионов и компенсации пространственного заряда этот эффект может быть частично скомпенсирован.

Как следует из адиабатического инварианта для поперечного импульса: $p_{\perp}^2/B = const$, в области однородного магнитного поля поперечный импульс электрона $p_{\perp} = \gamma\beta_{\perp}$ сохраняется. Следовательно, при наличии провисания потенциала нормированная поперечная скорость электрона будет изменяться как $\beta_{\perp} = \beta_{\perp 0}(\gamma_0/\gamma)$. Изменение энергии и поперечной скорости электронов определяют изменение продольной скорости $\beta_z = \beta_{z0} \left\{ 1 - \left[(1 - \beta_{z0}^2) / \beta_{z0}^2 \right] \Delta\gamma / \gamma_0 \right\}$ и питч-фактора (отношения поперечной и продольной скоростей электронов): $g = g_0 \left\{ 1 + \left[1 / \beta_{z0}^2 \right] \Delta\gamma / \gamma_0 \right\}$, где $\Delta\gamma$ - изменение энергии электронов, вызванное провисанием потенциала: $\gamma = \gamma_0 - \Delta\gamma$.

В рамках нелинейной теории гиротрона с фиксированным гауссовым продольным распределением высокочастотного поля [61,83,105] поперечный КПД η_{\perp} зависит от трех безразмерных параметров: безразмерной амплитуды поля в резонаторе F , безразмерной длины пространства взаимодействия μ и расстройки циклотронного резонанса Δ . В режиме стационарной генерации, амплитуда поля в резонаторе связана с безразмерным параметром тока, пропорциональным полному току пучка, уравнением баланса между мощностью потерь ЭМ-поля в резонаторе и мощностью, отобранной полем у электронного пучка:

$$\tilde{I} = QI = F^2 \eta_{\perp}^{-1} \quad (\text{П2.4})$$

При этом важным является то, что в определение всех безразмерных параметров теории гиротрона входят компоненты скоростей электронов, которые зависят от провисания потенциала. В соответствии с [97], зависимость безразмерных параметров теории гиротрона от изменения энергии электронов выражается следующим образом:

$$\Delta = \Delta_0 - \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0}, \quad (\text{П2.5})$$

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{1 + \beta_{\parallel 0}^2}{\beta_{\parallel 0}^2} \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} \right], \quad (\text{П2.6})$$

$$F = F_0 \left[1 - (3 - n) \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} \right], \quad (\text{П2.7})$$

$$I = I_0 \left[1 - (5 - 2n) \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} \right] \quad (\text{П2.8})$$

В приведенных выше зависимостях безразмерных параметров от величины провисания потенциала и соответствующего ему изменения энергии электронов, величины с индексом «0» соответствуют невозмущенным параметрам в случае без провисания потенциала; а при его учете, максимальная величина изменения энергии $\Delta\gamma$ соответствует случаю без положительных ионов. По мере ионной компенсации пространственного заряда (и, соответственно, по мере прохождения высоковольтного импульса) изменение энергии $\Delta\gamma$ уменьшается. Изменения параметров системы в процессе работы гиротрона за счет компенсации пространственного заряда электронного пучка приводит к изменению движения электронов и, как следствие, изменению КПД электронно-волнового взаимодействия с течением времени. Важно отметить, что для величин расстройки циклотронного резонанса и длины пространства взаимодействия

влияние изменения энергии электронов имеет гораздо более крутую зависимость из-за наличия в знаменателе малых величин (квадрата орбитальной скорости в расстройке и квадрата продольной скорости в длине пространства взаимодействия). Особенно важным оказывается увеличение расстройки циклотронного резонанса (Рисунок П2.1) в процессе компенсации пространственного заряда, что может привести к переходу от режима мягкого возбуждения колебаний в область жесткого возбуждения и, при дальнейшем увеличении расстройки, к срыву генерации.

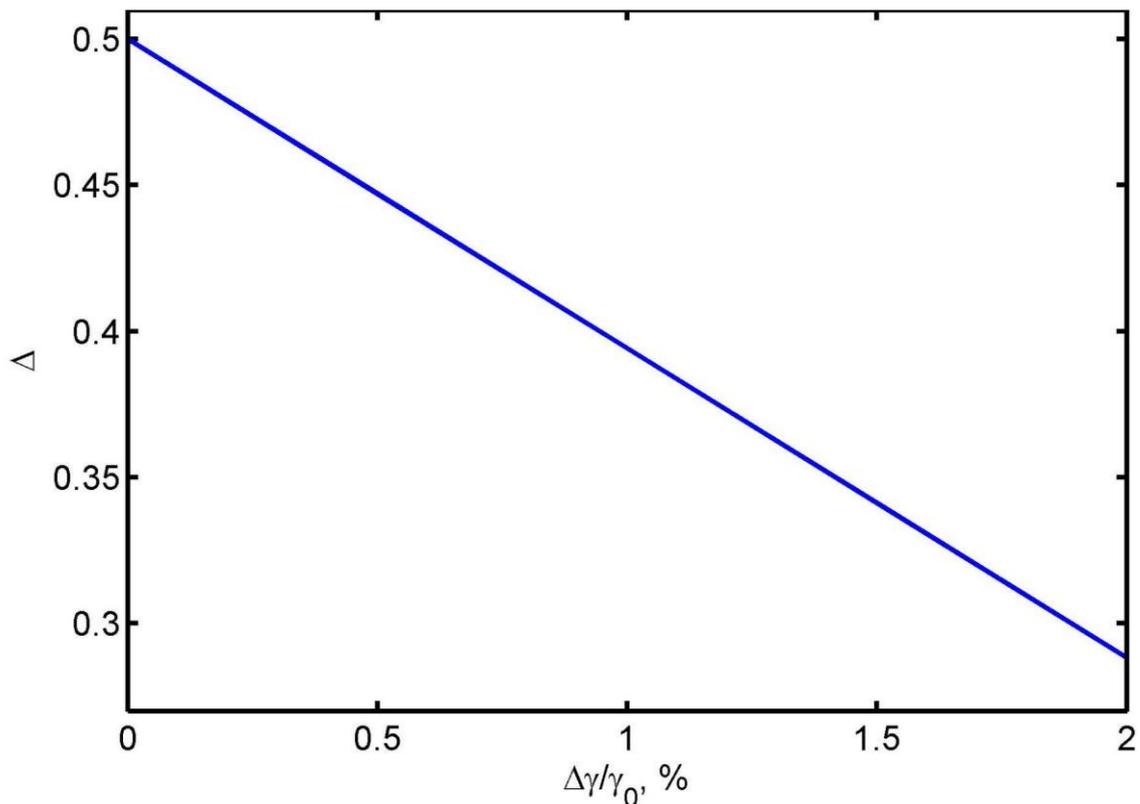


Рисунок П2.1: Зависимость расстройки циклотронного резонанса от относительного изменения энергии электронов при невозмущенном ускоряющем напряжении $U_0 = 100$ кВ и питч-факторе $g_0 = 1.3$

Оптимизация параметров для импульсных режимов работы гиротрона

Расчет поперечного КПД производился путем интегрирования уравнений для поперечного импульса электронов (П1.1). В качестве условий генерации предполагалась одномодовая генерация на первой гармонике циклотронной частоты, разброс электронов по

скоростям и энергиям не учитывался. В качестве модели рассматривался гиротрон с ускоряющим напряжением величиной $U_0 = 100$ кВ и питч-фактором электронного пучка $g_0 = v_{\perp}/v_{\parallel} = 1.3$ (обе величины соответствуют отсутствию провисания потенциала). Для нескольких значений провисания потенциала и соответствующих им относительных изменений энергии электронов $\Delta\gamma/\gamma_0$ были рассчитаны зависимости поперечного КПД от безразмерных параметров. Предполагалось, что в начальный момент провисание потенциала вызывает относительное изменение энергии электронов $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$ (что при ускоряющем напряжении $U_0 = 100$ кВ соответствует максимальному характерному провисанию потенциала в мощных гиротронах $\Delta U = 12$ кВ) и, затем, вследствие компенсации пространственного заряда электронного пучка, относительное изменение энергии может снижаться вплоть до нуля. Такое изменение энергии приводит к дрейфу рабочей точки гиротрона в пространстве безразмерных параметров в процессе прохождения высоковольтного импульса.

В модели с фиксированным гауссовым продольным распределением поля, максимальный поперечный КПД $\eta_{\perp} \approx 72\%$ достигается при выборе оптимальных параметров $\mu_{opt} \cong 17.4$, $F_{opt} \cong 0.14$, $\Delta_{opt} \cong 0.5$, соответствующий параметр тока, как следует из (П2.4) приблизительно равен $2.8 \cdot 10^{-2}$. Далее, используя зависимости безразмерных параметров от изменения энергии электронов (П2.5)-(П2.8), было рассчитано влияние провисания потенциала и изменения энергии электронов на условия для генерации в точке оптимума. Зная зависимости параметров гиротрона от изменения энергии, была проведена оптимизация для различных стационарных уровней провисания потенциала и исследована динамика эффективности электронно-волнового взаимодействия в зависимости от степени ионной компенсации.

На Рисунке П2.2 показаны зависимости поперечного КПД от относительного изменения энергии электронов для трех вариантов оптимизации параметров гиротрона: для случая оптимизации без провисания потенциала (кривая «1»), для случая $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1\%$ (кривая «2») и для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$ (кривая «3»). Как видно из графиков, для всех трех случаев удастся восстановить эффективность взаимодействия и достичь одинакового максимального КПД, однако для каждого из вариантов, максимум эффективности соответствует различным значениям безразмерных параметров μ_0 , Δ_0 , F_0 (параметров при отсутствии провисания потенциала). Так, для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$, $\mu_{o,opt} = 14.47$, $F_{o,opt} = 0.14$, $\Delta_{o,opt} = 0.73$, что существенно отличается от оптимальных параметров гиротрона без провисания потенциала. Кроме того, при изменении энергии электронов в процессе ионной компенсации пространственного заряда и уменьшении величины провисания

потенциала происходит существенное изменение КПД генерации. Так, при оптимизации параметров для относительного изменения энергии $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$ (кривая «3» на Рисунке 1.2.2), КПД генерации снижается при любой степени компенсации, и падает до нескольких процентов при компенсации лишь половины пространственного заряда пучка. При оптимизации параметров гиротрона для случая $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1\%$ (кривая «2»), в начальный момент времени (при начальном $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$) поперечный КПД будет составлять лишь 20% и при уменьшении провисания потенциала до половины начального значения будет достигнут расчетный КПД порядка 70%. Дальнейший процесс компенсации приведет, как и в первом случае к падению КПД.

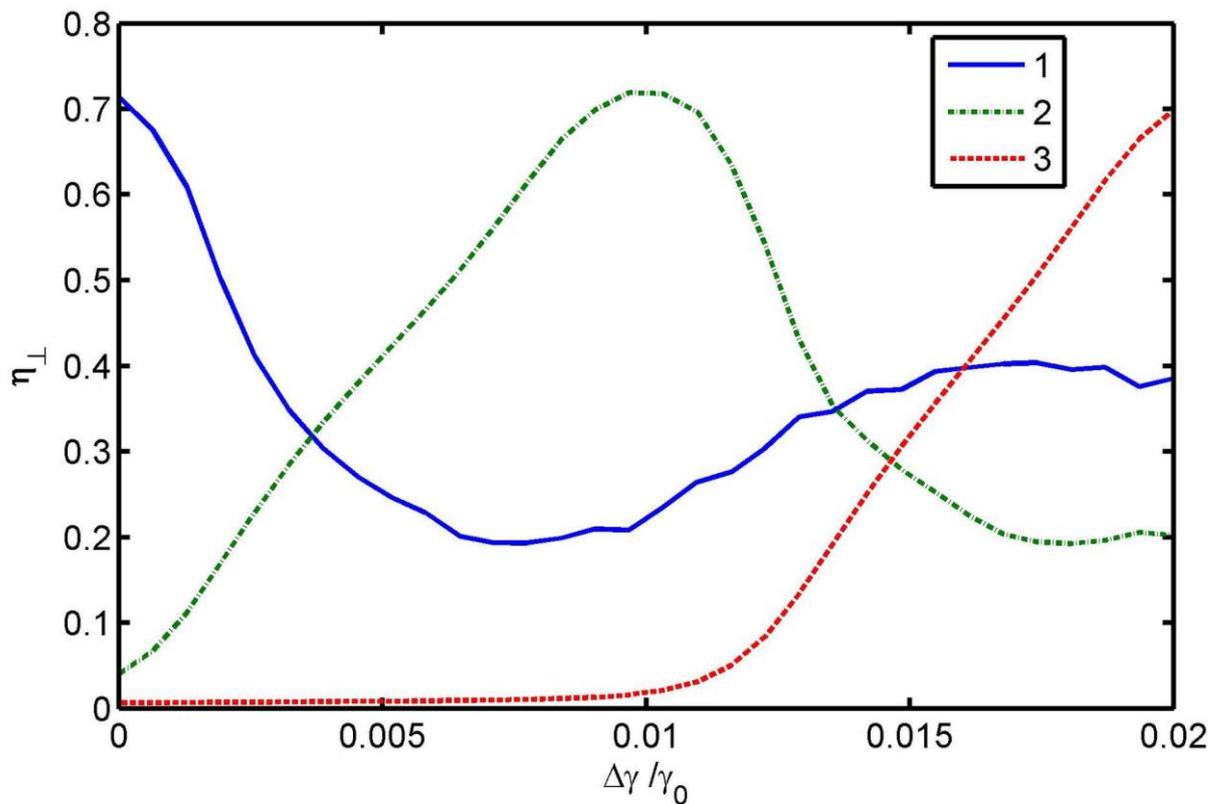


Рисунок П2.2: Зависимость поперечного КПД от относительного изменения энергии $\Delta\gamma/\gamma_0$ для случая без оптимизации (1), при оптимизации для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1\%$ (2) и для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$ (3)

Для исследования причин сложной динамики поперечного КПД в процессе ионной компенсации и уменьшения величины относительного изменения энергии электронов, рассмотрим зависимость поперечного КПД от продольной координаты в резонаторе гиротрона в различных режимах. В Таблице П2.1 приведены зависимости для различных величин изменения энергии для варианта гиротрона без оптимизации, и с оптимизацией для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 2\%$.

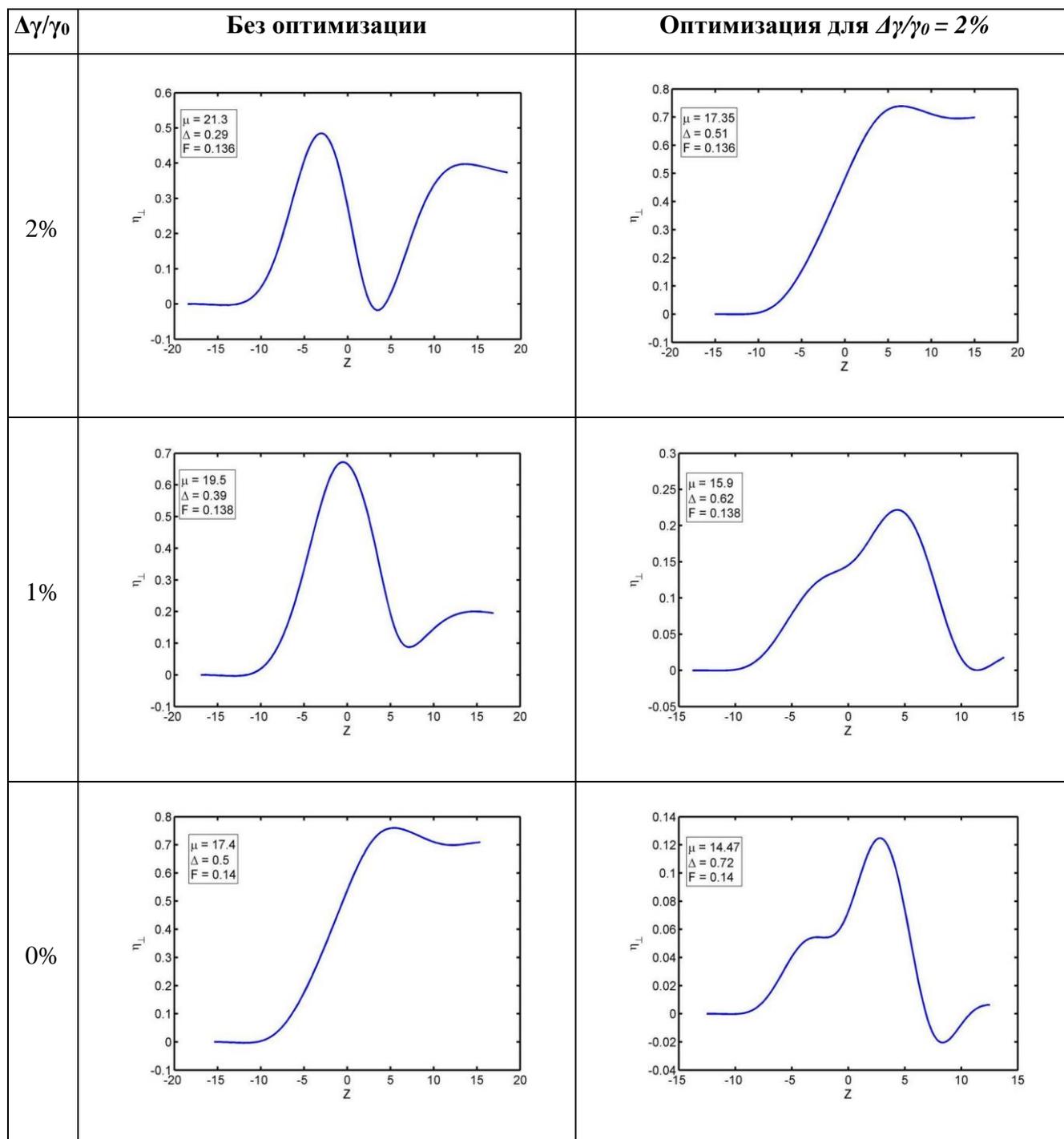


Таблица П2.1: Зависимость поперечного КПД гиротронов с оптимизацией параметров под провисание потенциала и без оптимизации от продольной координаты для различных значений изменения энергии электронов

Для случая гиротрона без оптимизации (первый столбец в Таблице П2.1), при относительном изменении энергии равном 2%, снижение КПД вызвано значительной перегруппировкой электронов в пучке (падение и последующее восстановление эффективности взаимодействия), в то время как в гиротроне, оптимизированном под такое изменение энергии (второй столбец Таблицы П2.1) перегруппировка не успевает произойти, и результирующий

КПД оказывается высоким. При компенсации пространственного заряда и уменьшении относительного изменения энергии электронов, в гиротроне без оптимизации исчезает перегруппировка электронов, в то время как в гиротроне, оптимизированном под $\Delta\gamma / \gamma_0 = 2\%$, не только появляется перегруппировка, но и падает максимальный КПД, достигающийся в процессе пролета. Таким образом, в случае гиротрона без оптимизации, основной причиной снижения КПД является перегруппировка электронов в процессе пролета резонатора, потому что при наличии провисания потенциала $\beta_{||}$ уменьшается, следовательно электроны дольше находятся в резонаторе и дольше взаимодействуют с ВЧ полем. Для гиротрона, оптимизированного под определенное значение провисания потенциала, компенсация пространственного заряда и снижение провисания потенциала ниже значения оптимизации, приводят к такому изменению безразмерных параметров, что процесс взаимодействия электронов с ВЧ-полем становится неэффективным в целом, а явление перегруппировки электронов уже не играет существенной роли.

В случае реальной экспериментальной установки, режим стационарной генерации (и, соответственно, амплитуда поля в резонаторе) определяется величиной магнитного поля и током электронного пучка (через уравнение баланса (П2.4)). Поэтому, с прикладной точки зрения, важной задачей является определение динамики режима генерации для фиксированного значения тока электронного пучка, при амплитуде поля определяемой балансом мощностей. Кроме того, так как в уже изготовленном приборе невозможно оптимизировать часть параметров (например, длину резонатора), необходимо исследовать возможности компенсации эффектов провисания потенциала за счет управления отдельными техническими параметрами (например, магнитным полем). Для случая стационарной генерации при фиксированном токе была промоделирована зависимость КПД генерации от изменения энергии электронов в процессе ионной компенсации с учетом уравнения баланса и изменения параметра тока. На Рисунке П2.3 приведены полученные зависимости поперечного КПД при неизменном токе электронного пучка.

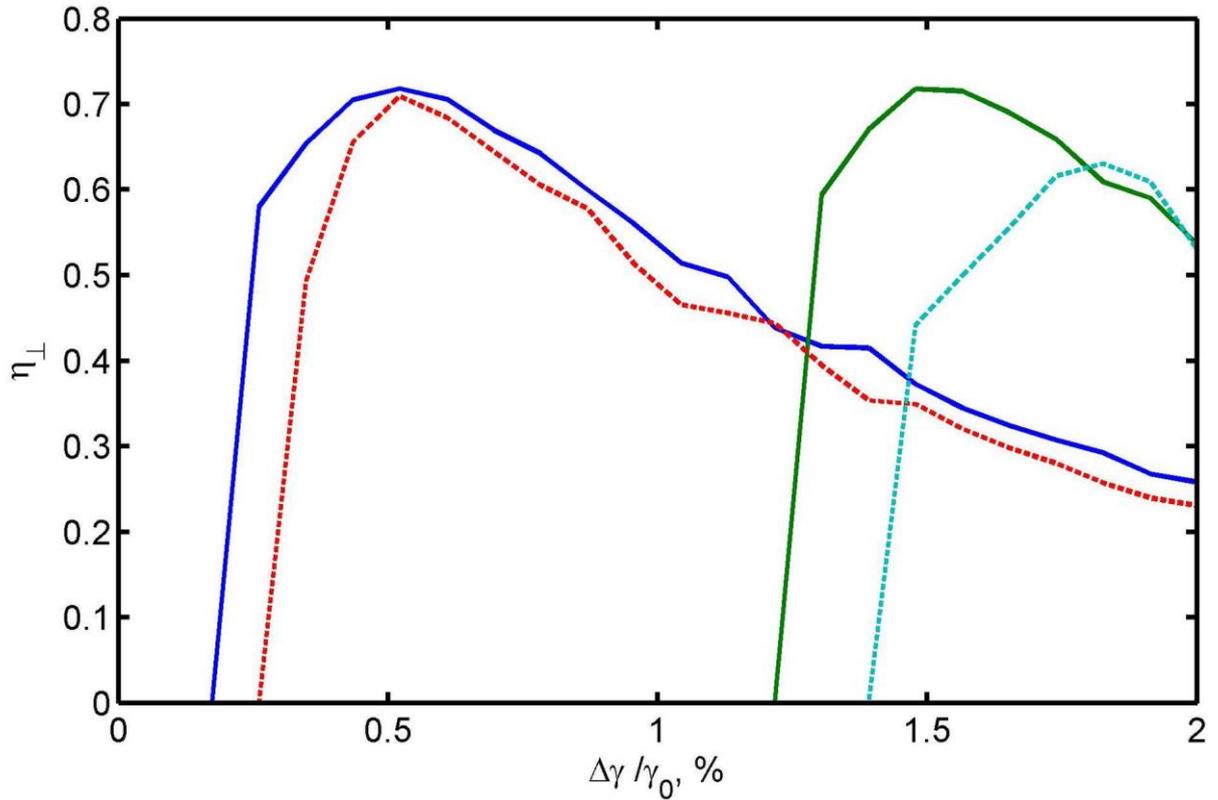


Рисунок П2.3: Зависимость поперечного КПД при фиксированном токе от относительного изменения энергии $\Delta\gamma/\gamma_0$ для случая полной оптимизации для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1.5\%$ и $\Delta\gamma/\gamma_0 = 0.5\%$ (сплошные линии) и при оптимизации только расстройки циклотронного резонанса (пунктирные линии)

Сплошные линии соответствуют оптимизации всех параметров гиротрона (длина однородного участка резонатора, рабочее магнитное поле, ток пучка) с целью достижения максимального КПД для двух выбранных значений провисания потенциала и соответствующих им изменений энергии электронов. Для рассмотрения возможностей компенсации эффекта снижения КПД генерации при наличии провисания потенциала при помощи подстройки отдельных параметров, исследовалась возможность частичной оптимизации режима генерации путем изменения рабочего магнитного поля и, соответственно, расстройки циклотронного резонанса. На графиках приведены случаи оптимизации для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 1.5\%$ (левые кривые, $I_o = 2.6 \cdot 10^{-2} \mu_{o,opt} = 14.84, \Delta_o = 0.67$) и для $\Delta\gamma/\gamma_0 = 0.5\%$ (правые кривые, $I_o = 2.7 \cdot 10^{-2} \mu_{o,opt} = 16.73, \Delta_o = 0.55$). Из графиков видно, что при степени компенсации выше расчетной, для которой выполнена оптимизация (то есть при дальнейшем уменьшении относительного изменения энергии), происходит срыв генерации, так как ток пучка оказывается меньше стартового тока для рабочей моды. Исходя из полученных результатов, можно определить

минимальное изменение энергии электронов относительно точки оптимизации, приводящее к срыву генерации и соответствующее на Рисунке П2.3 расстоянию от точки максимального КПД до точки срыва. Исходя из вышесказанного, требуемая точность расчета степени ионной компенсации и финальной стационарной величины изменения энергии электронов должна быть оценена величиной не более 0.5%.

Пунктирные линии на Рисунке П2.3 соответствуют возможности восстановления эффективности генерации путем оптимизации только магнитного поля (расстройки циклотронного резонанса), так как возможность изменения тока пучка зачастую ограничена характеристиками электронно-оптической системы и эмиттера катода, а изменение длины резонатора невозможно без разборки лампы. Моделирование показало, что для малых стационарных значений провисания потенциала эффективность электронно-волнового взаимодействия может быть восстановлена практически до максимальных величин путем только настройки рабочего значения величины магнитного поля (правая пунктирная кривая на Рисунке П2.3). Для больших значений стационарного провисания потенциала требуется оптимизация всех параметров гиротрона.

Таким образом, показана необходимость учета эффекта провисания потенциала и ионной компенсации пространственного заряда электронного пучка при проектировании мощных длинноимпульсных гиротронов и гиротронов с непрерывным режимом работы. Проведено моделирование динамики эффективности электронно-волнового взаимодействия с учетом изменения величины провисания потенциала. Показана возможность восстановления КПД генерации в режиме частичной компенсации пространственного заряда электронного пучка путем оптимизации параметров гиротрона: длины пространства взаимодействия, расстройки циклотронного резонанса и рабочего тока электронного пучка. Сделаны оценки требуемой точности расчета величины провисания потенциала, равные не более чем 0.5% от величины ускоряющего напряжения. Продемонстрирована возможность восстановления КПД путем настройки рабочего магнитного поля при малых величинах провисания потенциала.

Список трудов автора по теме диссертации

- A1. Fokin A.P, Glyavin M. Yu, Nusinovich G.S. Effect of ion compensation of the beam space charge on gyrotron operation // *Phys. Plasmas*. 2015. Т. 22. 043119
- A2. Glyavin M.Yu. et al. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.* 2015. Т. 86. № 5. 054705
- A3. Цветков А.И. и др. Автоматизированный микроволновый комплекс на основе непрерывного 263 ГГц/1 кВт гиротрона // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 9, С. 709-719
- A4. Sidorov A. et al. Measurement of plasma density in the discharge maintained in a nonuniform gas flow by a high-power terahertz-wave gyrotron // *Phys. Plasmas*. 2016. Т. 23. 043511
- A5. Бакунин В.Л. и др. Влияние конкуренции мод на процессы захвата многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, №8-9. С. 709-720
- A6. Гинзбург Н.С. и др. Оптимизация условий самовозбуждения терагерцовых гиротронов на основе увеличения времени жизни циклотронных осцилляторов в рабочем пространстве с пониженным напряжением // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43, №2, С. 52-59
- A7. Водопьянов А.В. и др. Свечение плазмы импульсного разряда в азоте, создаваемого мощным излучением терагерцового диапазона частот // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 2, С. 1-8
- A8. Водопьянов А.В. и др. Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43, № 2, С. 10-17
- A9. Новожилова Ю.В. и др. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор // *Изв. ВУЗов. ПНД*. 2017. Т. 25. № 1, С. 4-34
- A10. Vodopyanov A.V. et al. Application of the 263GHz/1 kW gyrotron setup to produce a metal oxide nanopowder by the evaporation-condensation technique // *Vacuum*. 2017. Т. 145 С. 340-346
- A11. Bratman V.L. et al. Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage // *Phys. Plasmas*. 2017. Т. 24. 113105
- A12. Богдашов А.А. и др. Уменьшение ширины спектра излучения гиротрона при использовании внешних отражений // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44. № 5. С. 87-94
- A13. Glyavin M.Yu. et al. Investigations of frequency stabilization in the double-beam sub-THz gyrotron with delayed reflections of output radiation // *IEEE Transactions. On Plasma Science*, 2018,

Т. 46, № 7, С. 2465-2469

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

waves. 2015. Hong Kong, China. 15588501

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

A26. Бакунин В.Л. и др. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним сигналом // X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 2016. Нижний Новгород, С. 75-76

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- A36. Богдашов А.А. и др. Влияние слабого отражения от нерезонансной нагрузки на режимы генерации технологического гиротрона // 22 Нижегородская сессия молодых ученых (естественные, математические науки). 2017. Нижний Новгород. С. 87-88
- A37. Богдашов А.А. и др. Управление режимом генерации технологического гиротрона при слабом отражении от нерезонансной нагрузки // Сборник статей VI Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Санкт Петербург. С. 490-492
- A38. Глявин М.Ю. и др. Компактные электронные ТГц мазеры с рекордными характеристиками // Сборник статей VI Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Санкт Петербург. С. 227-231
- A39. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 100W/263 GHz continuous wave gyrotron // 29th Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons. 2017. Karlsruhe-Stuttgart-Garching, Germany.
- A40. Bogdashov A.A. et al. Influence of weak reflection from a non-resonant load on the operation regimes of the 28 GHz technological gyrotron // 29th Joint Russian-German Workshop on ECRH and Gyrotrons. 2017. Karlsruhe-Stuttgart-Garching, Germany.
- A41. Vodopyanov A.V. et al. High rate production of nanopowders by the evaporation – condensation method using gyrotron radiation // EPJ Web of Conferences. 2017. T. 149. 02022
- A42. Sidorov A.V. et al. Gas breakdown by a focused beam of THz waves // EPJ Web of Conferences, 2017, T. 149. 02031
- A43. Novozhilova Yu.V. et al. Influence of mode competition and external wave frequency modulation on gyrotron frequency locking // EPJ Web of Conferences, 2017. T. 149. 04021
- A44. Denisov G.G. et al. High precision frequency stabilization of a 263 GHz continuous wave gyrotron // EPJ Web of Conferences, 2017. T. 149. 04022
- A45. Bogdashov A.A. et al. Influence of weak reflection from a nonresonant load on the operation frequency of the 28 GHz technological gyrotron // EPJ Web of Conferences, 2017. T. 149. 04037
- A46. Vodopyanov A.V. et al. A Point-Like Plasma, Sustained By Powerful Radiation Of Terahertz Gyrotrons, As A Source Of Ultraviolet Light // Proceedings of the 42nd Int. Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. 2017. Cancun, Mexico. 17259315
- A47. Tsvetkov A I. et al. Applications of THz band gyrotrons at IAP RAS: Current state and prospects // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall. 2017. Singapore. 17596868
- A48. Fokin A., Sedov A., Tsvetkov A. Data Transmission Using Gyrotron Radiation as a Carrier // EPJ Web of Conferences, 2018, T. 187, 01007
- A49. Denisov G. et al. Design and Experimental Test Of 250 GHz/300 kW/CW Gyrotron // EPJ Web of Conferences, 2018, T. 187, 01006

Список цитированной литературы

1. Granucci G. et al. Conceptual design of the EU DEMO EC-system: main developments and R&D achievements // Nucl. Fusion. 2017. Vol. 57, № 11. P. 116009.
2. Weightman P. Prospects for the study of biological systems with high power sources of terahertz radiation // Phys. Biol. 2012. Vol. 9, № 5. P. 053001.
3. Ghann W., Uddin J. Terahertz (THz) Spectroscopy: A Cutting-Edge Technology // Terahertz Spectroscopy - A Cutting Edge Technology / ed. Uddin J. InTech, 2017.
4. Luukanen A. et al. Millimeter-Wave and Terahertz Imaging in Security Applications // Terahertz Spectroscopy and Imaging. Springer Series in Optical Sciences. 2012. P. 491–520.
5. Lewis R.A. A review of terahertz sources // J. Phys. D. Appl. Phys. 2014. Vol. 47, № 37. P. 374001.
6. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1967. Vol. 10, № 9-10. P. 1414–1453.
7. Flyagin V.A. et al. The Gyrotron // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
8. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The Gyrotron at 50: Historical Overview // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, № 4. P. 325–381.
9. Denisov G.G. et al. Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // Nucl. Fusion. 2008. Vol. 48, № 5. P. 054007.
10. Glyavin M.Y. et al. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101, № 15. P. 153503.
11. Glyavin M.Y., Luchinin A.G. Generation of kW level THz radiation by the gyrotron with pulsed magnetic field // 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. IEEE, 2008. P. 1–2.
12. Dhillon S.S. et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D. Appl. Phys. 2017. Vol. 50, № 4. P. 043001.
13. Pérez S. et al. Terahertz Gunn-like oscillations in InGaAs/InAlAs planar diodes // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103, № 9. P. 094516.
14. Bartalini S., Vitiello M.S., De Natale P. Quantum cascade lasers: a versatile source for precise measurements in the mid/far-infrared range // Meas. Sci. Technol. 2014. Vol. 25, № 1. P. 012001.
15. Xu X. et al. A watt-class 1-THz backward-wave oscillator based on sine waveguide // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19, № 1. P. 013113.

16. Li S. et al. Study on the stability and reliability of Clinotron at Y-band // *Phys. Plasmas*. 2017. Vol. 24, № 11. P. 113108.
17. Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // *Meas. Sci. Technol.* 2010. Vol. 21, № 5. P. 054017.
18. Tan P. et al. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // *Sci. China Inf. Sci.* 2012. Vol. 55, № 1. P. 1–15.
19. Belov Y.N. et al. Completion phase of Russian gyrotron system development for ITER // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2016. P. 1–2.
20. Jelonnek J. et al. Developments of fusion gyrotrons for W7-X, ITER and EU DEMO: Ongoing activities and future plans of KIT // 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2017. P. 1–3.
21. Woskoboinikow P. Development of gyrotrons for plasma diagnostics (invited) // *Rev. Sci. Instrum.* 1986. Vol. 57, № 8. P. 2113–2118.
22. Idehara T. et al. Development of high quality gyrotrons for plasma diagnostics // 2005 Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics. IEEE. Vol. 2. P. 523–524.
23. Bykov Y. et al. 24–84-GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. Vol. 32, № 1. P. 67–72.
24. Vodopyanov A. V. et al. Application of the 263 GHz/1 kW gyrotron setup to produce a metal oxide nanopowder by the evaporation-condensation technique // *Vacuum*. 2017. Vol. 145. P. 340–346.
25. Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2011. Vol. 54, № 8. P. 559.
26. Idehara T., Sabchevski S.P. Gyrotrons for High-Power Terahertz Science and Technology at FIR UF // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2017. Vol. 38, № 1. P. 62–86.
27. Khutoryan E.M. et al. Stabilization of Gyrotron Frequency by PID Feedback Control on the Acceleration Voltage // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2015. Vol. 36, № 12. P. 1157–1163.
28. Idehara T. et al. Modulation and Stabilization of the Output Power and Frequency of FU Series Gyrotrons. 2016. Vol. 9, № 4. P. 117–130.
29. Temkin R.J. et al. Recent progress at MIT on THz gyrotron oscillators for DNP/NMR // 2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2011. P. 1–3.
30. Han S.-T. et al. Real-time, T-ray imaging using a sub-terahertz gyrotron // *J. Korean Phys. Soc.* 2012. Vol. 60, № 11. P. 1857–1861.

31. Nusinovich G.S. et al. Development of THz-range Gyrotrons for Detection of Concealed Radioactive Materials // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2011. Vol. 32, № 3. P. 380–402.
32. Read M.E. et al. A THz gyrotron based on a pulse solenoid // 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2009. P. 1–2.
33. Zhao Q. et al. Theoretical Study on a 0.4-THz Second Harmonic Gyrotron // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. Vol. 43, № 5. P. 1688–1693.
34. Сайт компании Bridge 12 [Electronic resource]. 2018. URL: <http://www.bridge12.com>.
35. Комплексы DNP-NMR Bruker-Biospin [Electronic resource]. 2018. URL: <https://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html>.
36. Glyavin M.Y., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100, № 1. P. 015101.
37. Запевалов В.Е. et al. Мощный генератор непрерывного электромагнитного излучения частотой 300 ГГц // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2007. Vol. 50, № 6. P. 461–470.
38. Kasperek W. et al. NTM stabilization by alternating O-point EC current drive using a high-power diplexer // *Nucl. Fusion*. 2016. Vol. 56, № 12. P. 126001.
39. Zohm H., Thumm M. On the use of step-tuneable gyrotrons in ITER // *J. Phys. Conf. Ser.* 2005. Vol. 25. P. 274–282.
40. Sidorov A. et al. Ion beam formation in a gas-dynamic electron cyclotron resonance ion source // *Rev. Sci. Instrum.* 2006. Vol. 77, № 3. P. 03A341.
41. Golubev S. V. et al. A Compact Neutron Source for Boron Neutron Capture Therapy // *Radiophys. Quantum Electron.* 2017. Vol. 59, № 8-9. P. 682–689.
42. Rosay M., Blank M., Engelke F. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR // *J. Magn. Reson. Elsevier Inc.*, 2016. Vol. 264. P. 88–98.
43. Запевалов В.Е., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. К теории винтовых пучков с захваченными электронами // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1990. Vol. 33, № 12. P. 1406–1411.
44. Avramidis K.A. et al. Numerical Studies on the Influence of Cavity Thermal Expansion on the Performance of a High-Power Gyrotron // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2018. Vol. 65, № 6. P. 2308–2315.
45. Dumbrajs O., Nusinovich G.S. Effect of technical noise on radiation linewidth in free-running gyrotron oscillators // *Phys. Plasmas*. 1997. Vol. 4, № 5. P. 1413–1423.
46. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y. V. Zones of Frequency Locking by an External Signal in a Multimode Gyrotron of a Megawatt Power Level // *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 58, № 12. P. 893–904.

47. Khutoryan E.M. et al. Influence of Reflections on Frequency Tunability and Mode Competition in the Second-Harmonic THz Gyrotron // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2017. Vol. 38, № 7. P. 824–837.
48. Chirkov A. V., Denisov G.G., Kuftin A.N. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 106, № 26. P. 263501.
49. Glyavin M., Luchinin A., Morozkin M. The K a -band 10-kW continuous wave gyrotron with wide-band fast frequency sweep // *Rev. Sci. Instrum.* 2012. Vol. 83, № 7. P. 074706.
50. Golubiatnikov G.Y. et al. Gyrotron frequency control by a phase lock system // *Tech. Phys. Lett.* 2006. Vol. 32, № 8. P. 650–652.
51. Glyavin M.Y. et al. Stabilization of gyrotron frequency by reflection from nonresonant and resonant loads // *Tech. Phys. Lett.* 2015. Vol. 41, № 7. P. 628–631.
52. Glyavin M.Y. et al. Gyrotron Frequency Stabilization by a Weak Reflected Wave // *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 58, № 9. P. 673–683.
53. Zotova I. V. et al. Frequency Locking and Stabilization Regimes in High-Power Gyrotrons with Low-Q Resonators // *Radiophys. Quantum Electron.* 2016. Vol. 58, № 9. P. 684–693.
54. Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1966. Vol. 14, № 3. P. 302–307.
55. Gedney S.D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1996. Vol. 44, № 12. P. 1630–1639.
56. Keysight Signal analyzer N9010A [Electronic resource]. URL: <https://www.keysight.com/en/pdx-x201715-pn-N9010A/exa-signal-analyzer-10-hz-to-44-ghz>.
57. Глявин М.Ю., Запевалов В.Е. Влияние отражений на устойчивость автоколебаний в гиротронах // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1998. Vol. 41, № 10. P. 1348–1355.
58. Airila M.I., Kall P. Effect of Reflections on Nonstationary Gyrotron Oscillations // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2004. Vol. 52, № 2. P. 522–528.
59. Новожилова Ю.В. et al. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрезки волны: обзор // *Известия ВУЗов. ПНД*. 2017. Vol. 25, № 1. P. 4–34.
60. Глявин М.Ю. et al. Численное моделирование непрерывных субмиллиметровых гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // *Изв. ВУЗов Радиофизика*. 2009. Vol. 52, № 5-6. P. 408–417.
61. Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением высокочастотного поля // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1972. Vol. 8. P. 55–60.

62. Manuilov V.N. et al. Design of a Second Harmonic Double-Beam Continuous Wave Gyrotron with Operating Frequency of 0.79 THz // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2015. Vol. 36, № 12. P. 1164–1175.
63. Idehara T. et al. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. Vol. 88, № 9. P. 094708.
64. Годжаев Н.М. Оптика. 1977. 432 p.
65. Spellman ST series [Electronic resource]. 2018. URL: <https://www.spellmanhv.com/en/Products/ST>.
66. Glyavin M.Y. et al. Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media // *Rev. Sci. Instrum.* 2015.
67. Tsimring S.E. *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
68. Krivosheev P. V. et al. Numerical Simulation Models of Forming Systems of Intense Gyrotron Helical Electron Beams // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2001. Vol. 22, № 8. P. 1119–1145.
69. Schiller S. et al. Ultra-narrow-linewidth continuous-wave THz sources based on multiplier chains // *Appl. Phys. B*. 2009. Vol. 95, № 1. P. 55–61.
70. Rohde&Schwarz FSL spectrum analyzer [Electronic resource]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/fsl-productstartpage_63493-8042.html.
71. Ovchinnikov Y., Marra G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard // *Metrologia*. 2011. Vol. 48, № 3. P. 87–100.
72. The Road to Fusion Electricity [Electronic resource]. URL: <https://www.eurofusion.org/eurofusion/the-road-to-fusion-electricity/>.
73. Darbos C. et al. Status of the ITER Electron Cyclotron Heating and Current Drive System // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2016. Vol. 37, № 1. P. 4–20.
74. Ikeda R. et al. Development of multi-frequency gyrotron for ITER and DEMO at QST // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2016. P. 1–2.
75. Rao S.L. et al. Electron Cyclotron Power Source System For ITER // *Fusion Sci. Technol.* 2014. Vol. 65, № 1. P. 129–144.
76. Federici G. et al. Overview of EU DEMO design and R&D activities // *Fusion Eng. Des.* 2014. Vol. 89, № 7-8. P. 882–889.
77. Jelonnek J. et al. Design considerations for future DEMO gyrotrons: A review on related gyrotron activities within EUROfusion // *Fusion Eng. Des.* 2017. Vol. 123. P. 241–246.

78. Sakamoto K. et al. Development of Sub-Terahertz Gyrotron for DEMO // The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017). 2017.
79. Zohm H. et al. Where to locate DEMO in a one-step-to-an-FPP strategy // 43rd EPS Conference on Plasma Physics. 2016.
80. Глявин М.Ю. et al. Автоматизированный микроволновый комплекс на основе непрерывного 263 ГГц/1 кВт гиротрона // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2015. Vol. 58, № 9. P. 709–719.
81. Gashturi A.P. et al. Comparison of Different Methods for Calculating Gyrotron Quasi-Optical Mode Converters // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2013. Vol. 34, № 1. P. 62–70.
82. Parshin V. V. Dielectric materials for gyrotron output windows // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1994. Vol. 15, № 2. P. 339–348.
83. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. The Johns Hopkins University Press, 2004.
84. Tsimring S.E. Gyrotron Electron Beams: Velocity and Energy Spread and Beam Instabilities // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. Vol. 22, № 10. P. 1433–1468.
85. Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. Влияние разброса энергий и скоростей в электронном пучке на стартовые условия и КПД гиротрона // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2006. Vol. 49, № 2. P. 121–133.
86. Kuznezov S.O., Malygin V.I. Determination of gyrotron wave beam parameters // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1991. Vol. 12, № 11. P. 1241–1252.
87. Chirkov A., Denisov G., Aleksandrov N.. 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections // Opt. Commun. 1995. Vol. 115, № 5-6. P. 449–452.
88. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 245-250 p.
89. Глявин М.Ю. et al. Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения // Изв. ВУЗов Радиофизика. 2011. Vol. 54, № 8-9. P. 666–675.
90. Kim D. et al. Remote detection of radioactive material using high-power pulsed electromagnetic radiation // Nat. Commun. 2017. Vol. 8. P. 15394.
91. Водопьянов А.В. et al. Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда // Письма в ЖЭТФ. 2008. Vol. 88, № 2. P. 103–106.
92. Bitter F. The Design of Powerful Electromagnets Part II. The Magnetizing Coil // Rev. Sci. Instrum. 1936. Vol. 7, № 12. P. 482–488.

93. Глявин М.Ю. et al. Генератор импульсного магнитного поля для гиросприборов терагерцового диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. P. 84–87.
94. Pu R. et al. Numerical study of efficiency for a 670 GHz gyrotron // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18, № 2. P. 023107.
95. Sakamoto K. et al. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron // Nat. Phys. 2007. Vol. 3, № 6. P. 411–414.
96. Belousov V.I. et al. Calorimeter for measuring the total energy of high-power pulse millimeter-range devices // Instruments Exp. Tech. 1996. Vol. 39, № 3. P. 93–97.
97. Нусинович Г.С., Моисеев М.А. К теории многомодовой генерации в гиросмонотроне // Известия ВУЗов, Радиофизика. 1974. Vol. 17, № 11.
98. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Москва: Физматлит, 1963.
99. Moiseev M.A. et al. Numerical simulation of mode interaction in 170 GHz/1 MW gyrotrons for iter // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1997. Vol. 18, № 11. P. 2117–2128.
100. Reiser M. Theory and Design of Charged Particle Beams / ed. Reiser M. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1994.
101. Drobot A.T., Kim K. Space charge effects on the equilibrium of guided electron flow with gyromotion // Int. J. Electron. 1981. Vol. 51, № 4. P. 351–367.
102. Ganguly A.K., Chu K.R. Limiting current in gyrotrons // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1984. Vol. 5, № 1. P. 103–121.
103. Manuilov V.N., Semenov V.E. Ion Compensation for Space Charge in the Helical Electron Beams of Gyrotrons // Radiophys. Quantum Electron. 2016. Vol. 59, № 1. P. 33–42.
104. Jelonnek J. et al. Development of advanced gyrotrons // 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2014. P. 1–3.
105. Danly B.G., Temkin R.J. Generalized nonlinear harmonic gyrotron theory // Phys. Fluids. 1986. Vol. 29, № 2. P. 561.