Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

На правах рукописи

Ананичев Андрей Алексеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА ГИРОТРОНА МЕГАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

1.3.4. Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
Кандидат физико-математических наук
Фокин Андрей Павлович

Нижний Новгород – 2026

Оглавление

Введение 3
Глава 1. Моделирование электронно-волнового взаимодействия и оптимизация параметров прототипа гиротрона 230 ГГц / 1 МВт 17
1.1 Расчет электронно-волнового взаимодействия и ключевые узлы гиротрона... 17
1.2 Экспериментальное исследование зависимостей выходной мощности и спектральных характеристик излучения гиротрона в режиме свободной генерации 30
Заключение к главе 1 40
Глава 2. Теоретическое и экспериментальное исследование мульти-кВт гиротрона-драйвера 42
2.1 Расчет электронно-волнового взаимодействия и частотных характеристик гиротрона-драйвера 43
2.2 Экспериментальное исследование гиротрона-драйвера в режиме свободной генерации и в режиме с фазовой автоподстройкой частоты 51
Заключение к главе 2 63
Глава 3. Экспериментальное исследование режимов генерации гиротрона 230 ГГц/1 МВт под воздействием внешнего сигнала 64
3.1. Моделирование электронно-волнового взаимодействия в мегаваттном гиротроне под воздействием внешнего сигнала 64
3.2 Результаты эксперимента 69
Заключение к главе 3 81
Заключение 82
Приложение 1. Описание расчетной модели гиротрона 84
Список публикаций по теме диссертации 87
Список литературы 90

Введение

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия наблюдается активный рост мирового потребления электроэнергии [1], и в будущем спрос на энергию не будет полностью удовлетворяться только за счёт углеродсодержащих и возобновляемых источников энергии. Поэтому задача разработки новых способов получения энергии в настоящее время остаётся одной из наиболее актуальных в современной науке и инженерии. Одним из перспективных способов её решения является использование установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) [2–9]. За последние 10 лет количество научных групп и стартапов в области термоядерного синтеза выросло более чем в 5 раз, а привлечённое финансирование – на порядок [10]. Принцип работы основан на синтезе более тяжёлых атомных ядер из лёгких. Данный процесс протекает в условиях плазмы, так как для преодоления кулоновского отталкивания необходимо нагреть исходное вещество до температуры 10^8К и обеспечить выполнение критерия Лоусона $n\tau > 10^{14}\text{см}^{-3} * \text{с}$, где n – плотность плазмы, а τ – время удержания [11]. Он может осуществляться как в установках с магнитным удержанием – токамаках и стеллараторах [12–14], так и в системах с инерционным удержанием [15]. При этом около половины всех проектов рассматривают первый способ как основной подход. Первые токамаки для исследования плазмы были построены в середине XX века; с тех пор их количество неизменно растёт, и к настоящему времени построено уже более 300 реакторов [16].

Для начального нагрева плазмы, а также для последующего поддержания её в горячем состоянии применяются следующие способы:

- Омический нагрев [17]
- Инжекция нейтральных пучков [18]
- Ионно-циклотронный резонансный (ИЦР) нагрев [19,20]
- Электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев [21–23]

ЭЦР нагрев применяется в подавляющем большинстве токамаков, поскольку позволяет, с одной стороны, осуществлять локальный рост температуры электронной компоненты плазмы, а с другой – управлять профилем тока для подавления магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей и разрушения магнитных островов, препятствующих корректной работе реактора [24]. К тому же другие методы столкнулись с рядом сложностей при разработке и применении в конкретных условиях. Так, например, международный проект ITER в 2024 году изменил материал первой стенки с бериллия на вольфрам и поэтому сместил акцент в выборе метода нагрева в сторону ЭЦР, увеличив мощность с 24 МВт до 56 МВт, а в перспективе и до 80 МВт, существенно уменьшив роль инжекции нейтральных пучков и ИЦР нагрева [25]. Кроме того, по мере развития токамаков растёт проектная плотность плазмы и, соответственно, величина основного магнитного поля токамака. В результате увеличивается требуемая частота излучения для нагрева частиц: так, для ITER она равна 170 ГГц при магнитном поле 5.3 Тл, а для реакторов DEMO и ТРТ – уже 230 ГГц при величине поля 8 Тл.

Для нагрева методом ЭЦР требуется использование мощных источников излучения в миллиметровом диапазоне длин волн, работающих в непрерывном режиме излучения. На данный момент безальтернативным вариантом является разновидность мазера на циклотронном резонансе – гиротрон [26–30], сочетающий в себе такие качества, как высокий КПД (более 50% с рекуперацией энергии электронов [31,32]) и мощность (до 1,5 МВт в непрерывном режиме [33]) при сравнительно небольших габаритах (в сравнении, например, с ЛСЭ [34,35]).

В гиротроне взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем происходит в области слабонерегулярного цилиндрического волновода при выполнении условия циклотронного синхронизма [36]:

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} \cong s\Omega$$

Где ω – частота волны, $k_{\parallel}$ - продольное волновое число, $v_{\parallel}$ - продольная скорость электронов, Ω – циклотронная частота, s – номер циклотронной гармоники. Отличительной особенностью гиротрона является взаимодействие с быстрыми волнами. При больших фазовых скоростях (существенно превышающих

скорость света) в условиях волноводного распространения излучения процесс происходит на частотах, близких к критической для рабочей моды, то есть при малых $k_{\parallel}$. Эта особенность существенно снижает чувствительность к разбросу электронов по скоростям. При этом отсутствие замедляющих систем позволяет обеспечить взаимодействие с частицами вдали от стенок, что в свою очередь дает возможность заметно увеличить ток электронного пучка и, как следствие, мощность генерации.

Основными элементами современных гиротронов являются электронно-оптическая и электродинамическая системы, а также система вывода излучения и коллектор (рисунок 1).

Наиболее распространённым типом электронно-оптических систем (ЭОС) в гиротронах является адиабатическая магнетронно-инжекторная пушка (МИП) [37–40]. Данная ЭОС состоит из конического катода с небольшим пояском из эмитирующего материала, расположенного под углом к силовым линиям магнитного поля и одного или нескольких анодов, обеспечивающих необходимое распределение электрического поля. Электроны, преодолевающие работу выхода с поверхности нагретого эмиттера, попадают в область скрещенных полей и начинают движение по винтовой траектории, при этом результирующее соотношение поперечной и поступательной скоростей (питч-фактор) пропорционально $\frac{E}{B}$ на катоде, где E и B – напряжённости электрического и магнитного полей соответственно. При дальнейшем движении заряженных частиц в нарастающем магнитном поле сохраняется адиабатический инвариант $\frac{p_{\perp}^2}{B} = const$, где $p_{\perp}$ - поперечный импульс электрона, что приводит к увеличению доли поперечной скорости.

Сформированный винтовой электронный пучок попадает в электродинамическую систему, представляющую собой слабонерегулярный цилиндрический резонатор, где в условиях циклотронного синхронизма происходит взаимодействие и передача вращательной энергии электронов электромагнитному полю. Данная система обеспечивает селекцию рабочей моды

как за счет выбора положения пучка, так и благодаря электродинамическим свойствам, а выбор моды определяет частоту генерации.

Отработанный электронный пучок осаждается в коллекторной области, а электромагнитное излучение покидает вакуумный объем прибора через выходное окно с помощью системы вывода. В большинстве современных гиротронов данная система представляет собой квазиоптический преобразователь, трансформирующий моду резонатора в гауссов пучок [41], но в ряде случаев применяется и прямой вывод моды резонатора.

Магнитная система представляет собой соленоид, тип которого определяется исходя из требуемых параметров гиротрона, таких как мощность и частота излучения. К наиболее распространённым типам относятся сверхпроводящие криомагниты [42,43], импульсные магнитные системы [44,45], а также классические медные соленоиды с жидкостным охлаждением [46].

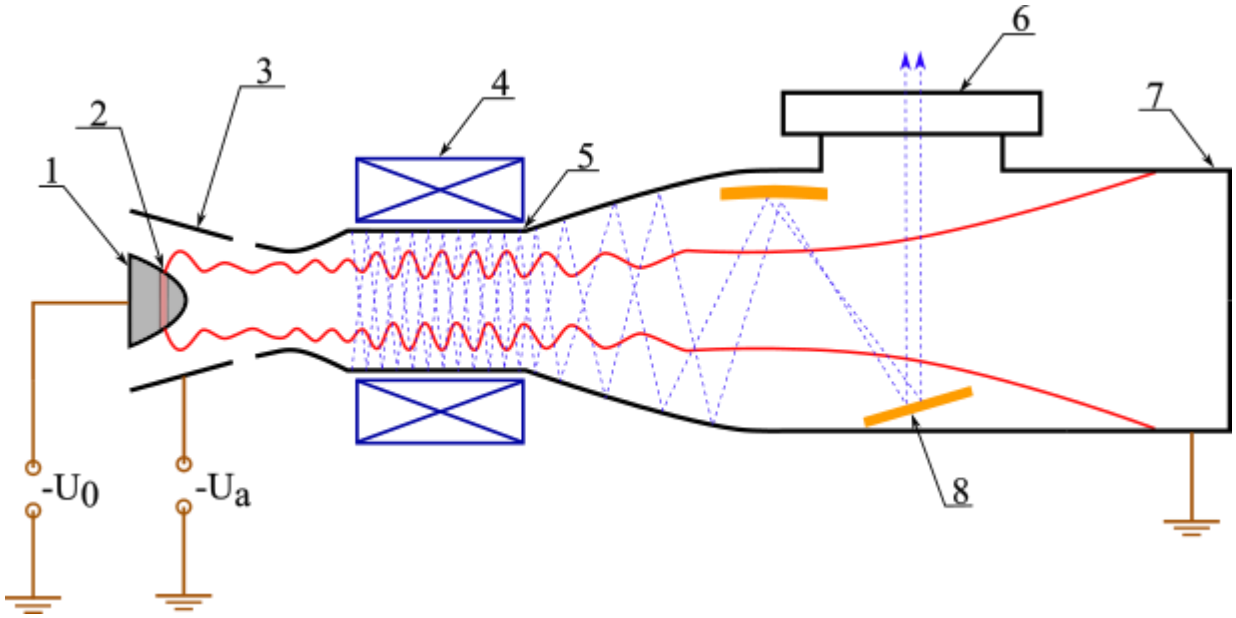


Рисунок 1. Принципиальная схема гиротрона: 1 – катод, 2 – эмитирующая поверхность на катоде, 3 – анод, 4 – магнитная система, 5 – резонатор, 6 – выходное окно, 7 – коллектор, 8 – система вывода излучения.

В связи с высокой требуемой мощностью ЭЦР нагрева плазмы в токамаках и стеллараторах используются гиротроны мегаваттного уровня мощности [23,47–51]. Современные мощные гироприборы для проекта ITER, обеспечивающие требуемый высокий уровень мощности с КПД, превышающим 50% (с учётом

рекуперации остаточной энергии электронов), работают на частоте 170 ГГц [52–55]. Однако токамаки следующего поколения требуют излучение на более коротких длинах волн [56–58]. Таким образом, планируется, что мегаваттные гиротроны, предназначенные для этого метода нагрева в токамаке ТРТ, будут иметь рабочую частоту 230 ГГц [57].

Одним из ключевых факторов, создающим сложности при переходе к более высоким частотам с сохранением мегаваттного уровня мощности, являются омические потери, определяющие тепловые нагрузки на стенки резонатора, плотность которых можно оценить согласно формуле [59]:

$$P_{0\text{мич}} = \frac{Q_{\text{диф}}}{Q_{0\text{мич}}} * \frac{P_{\text{вых}}}{2\pi R_0} * \frac{|\varphi(z)|^2}{\int_0^L |\varphi(z)|^2 dz}$$

Где $Q_{\text{диф}} = 25\left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$ – минимальная дифракционная добротность резонатора, $Q_{0\text{мич}} = \frac{R_0}{d}\left(1 - \frac{m^2}{\nu^2}\right)$ – омическая добротность, $d = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\lambda c}{\sigma}}$ – толщина скин-слоя, $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность, R_0 – радиус резонатора, $\varphi(z)$ – функция продольного распределения электромагнитного поля в резонаторе, σ – проводимость, m – азимутальный индекс моды резонатора, L – длина резонатора, ν – корень производной функции Бесселя.

Для распределения тепловых нагрузок необходимо увеличивать площадь поверхности резонатора. Уменьшение длины позволяет снизить нагрузку, однако при этом снижается КПД взаимодействия. Единственным возможным вариантом остаётся увеличение радиуса, что при сохранении частоты излучения требует повышения индекса рабочей моды. В свою очередь увеличение индекса приводит к росту плотности спектра мод и усилению конкуренции. Так, при переходе от 170 ГГц к 230 ГГц происходит уплотнение спектра пропорционально квадрату отношения частот, то есть почти в два раза. Паразитные моды ограничивают зону генерации выбранной рабочей моды, препятствуют продвижению в область более высокой мощности и КПД, а иногда и полностью подавляют возбуждение рабочего режима генерации.

Один из вариантов решения данной проблемы описан в большом количестве теоретических работ [60–67]. Он заключается в фазовой и частотной синхронизации (захвате) режима генерации гиротрона с помощью внешнего управляющего сигнала. Это позволяет достичь области оптимальной расстройки циклотронного резонанса в условиях плотного спектра конкурирующих мод в гиротронных резонаторах большой сверхразмерности. Долгое время эти работы носили исключительно теоретический характер, поскольку классические высокоэффективные квазиоптические преобразователи гиротронов (Рисунок 2(А)) [41] не позволяли обеспечить ввод внешнего сигнала в область взаимодействия гиротрона с требуемым направлением вращения поля внешнего сигнала. Получающаяся мода встречного вращения, с одной стороны, слабо взаимодействует с электронным пучком, с другой стороны, не может эффективно покидать вакуумный объем гиротрона в виде гауссова пучка. Однако после разработки новой модели преобразователя [68,69] (рисунок 2 (Б)(В)), имеющего два независимых канала вывода мод, отличающихся направлением вращения, появилась возможность ввода внешнего сигнала через второй канал, используя его в обратном направлении. За счет такой инверсии направление вращения внешнего поля совпадает с направлением вращения рабочей моды гиротрона, что открывает возможность захвата генерации. К настоящему моменту были успешно проведены эксперименты на частотах 35 ГГц и 170 ГГц [70–72], в которых продемонстрированы повышение мощности и КПД генерации при введении внешнего управляющего сигнала. Учитывая уплотнение спектра мод при переходе к частоте 230 ГГц, исследование эффективности режима захвата с точки зрения конкуренции мод и увеличения КПД генерации является одной из наиболее актуальных задач.

Следует отметить, что ЭЦР нагрев плазмы в УТС прежде всего требует высокой мощности излучения, при этом не накладывает существенных ограничений на стабильность частоты электромагнитной волны. Однако использование токамаков и стеллараторов подразумевает применение гиротронов также для решения задач диагностики плазмы [73–75] в процессе работы. Одним

из наиболее важных требований здесь является стабильность частоты источников диагностического излучения, поскольку чем уже спектр, тем больше информации о параметрах среды можно получить.

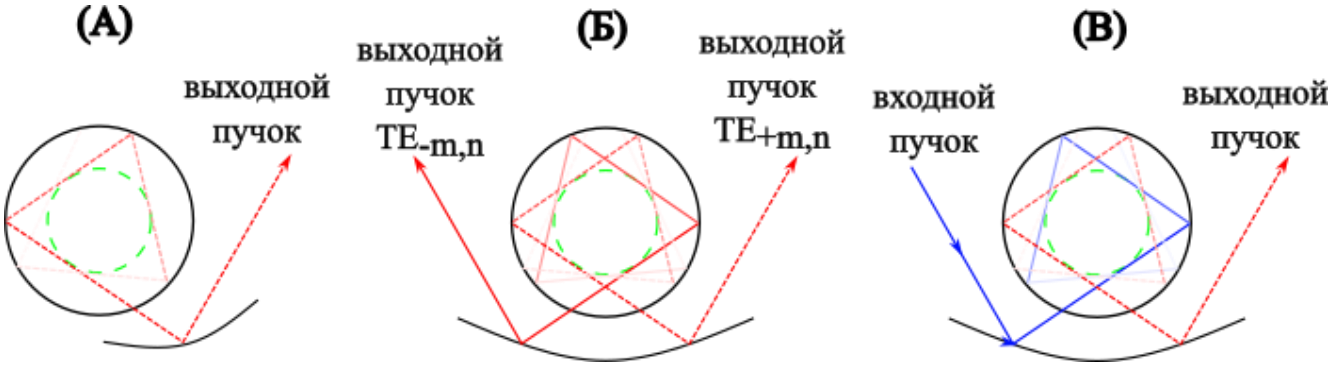


Рисунок 2. Схемы работы: (А) – классического одноканального квазиоптического преобразователя; (Б) – двухканального квазиоптического преобразователя в режиме вывода двух мод противоположного вращения; (В) – двухканального квазиоптического преобразователя в режиме ввода внешнего сигнала в один из каналов преобразователя, приведенная в работе [68]

Помимо применения гиротронов для нагрева и измерения параметров плазмы в установках УТС комплексы когерентных источников мощного стабилизированного электромагнитного излучения могут быть интересны и для задач ускорения частиц [76] или беспроводной передачи энергии [77,78]. Поэтому необходимы исследования как в области создания новых гиротронов с частотой генерации, требуемой в перспективных токамаках, так и в области стабилизации частоты и разработки механизмов, позволяющих обеспечить фазовую и частотную синхронизацию нескольких приборов.

Цели

1. Изучение особенностей процессов электронно-волнового взаимодействия в субтерагерцовых гиротронах мегаваттного уровня мощности.
2. Экспериментальное исследование метода стабилизации частоты гиротрона за счет фазовой автоподстройки частоты при управлении напряжением анода магнетронно-инжекторной пушки в режиме коротких импульсов.

3. Экспериментальное исследование метода захвата генерации мегаваттного субтерагерцового гиротрона внешним сигналом.

Задачи

1. Выполнить моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротроне с мегаваттным уровнем мощности и частотой генерации 230 ГГц;

2. В свободном режиме генерации выполнить экспериментальное исследование режимов генерации мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц, определить границы одномодового возбуждения рабочей моды, максимально достижимые мощности и КПД, исследовать качество выходных волновых пучков;

3. Выполнить моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротроне-драйвере с рабочей частотой 230 ГГц, экспериментально исследовать частотные характеристики гиротрона-драйвера. Исследовать возможность стабилизации частоты за счет фазовой автоподстройки частоты при управлении напряжением анода триодной магнетронно-инжекторной пушки в импульсном режиме работы гиротрона;

4. Выполнить исследование режимов генерации мегаваттного гиротрона в режиме захвата внешним сигналом от гиротрона-драйвера. Определить зону захвата, максимальную мощность и КПД, спектральные характеристики излучения мегаваттного гиротрона в режиме захвата, исследовать характеристики гиротрона в области вне зоны захвата внешним сигналом.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующих утверждениях:

1. Экспериментально продемонстрирована возможность генерации излучения гиротрона мегаваттного уровня мощности на частоте 230 ГГц в режиме свободной генерации в импульсном режиме с длительностью до 100 мкс.

2. Осуществлена стабилизация частоты гиротрона-драйвера на частоте 230 ГГц и выходной мощностью, превышающей 100 кВт в импульсном режиме работы.

3. Впервые получены экспериментальные результаты работы гиротрона мегаваттного уровня мощности на частоте 230 ГГц с новым двухканальным квазиоптическим преобразователем в режиме захвата частоты внешним синхронизирующим сигналом, исследован эффект биений в зоне вне захвата частоты.

Практическая значимость

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке длинноимпульсной модели гиротрона с частотой 230 ГГц, основное предназначения которого – ЭЦР нагрев плазмы в ряде перспективных токамаков, в частности в ТРТ. Эксперименты по захвату и стабилизации частоты расширяют возможности применения данного типа гиротронов, в первую очередь для решения задач диагностики плазмы в токамаках и стеллараторах, а также позволяют увеличить выходную мощность отдельно взятого гиротрона, что позволит уменьшить общее число устройств, и как следствие, снизить экономические затраты при создании новых реакторов УТС и повысить надежность системы нагрева. Кроме того, экспериментальное исследование режима захвата частоты будут полезны при разработке гиротронов следующего поколения с большей частотой и мощностью генерации.

Положения, выносимые на защиту

1. В гиротронах с высокой плотностью спектра мод возможна реализация устойчивой одномодовой генерации с мегаваттным уровнем мощности на рекордно высокой частоте 230 ГГц, необходимой для применения в токамаке с реакторными технологиями.

2. В мегаваттном гиротроне с частотой 230 ГГц, предназначенном для нагрева плазмы в токамаке с реакторными технологиями (ТРТ), воздействие внешнего сигнала позволяет повысить мощность и КПД генерации при одновременном обужении спектра излучения, в том числе в режимах с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов.

3. Для короткоимпульсных субтерагерцовых гиротронов с уровнем мощности в десятки киловатт возможно радикальное уменьшение ширины спектра излучения за счёт системы фазовой автоподстройки частоты.

Апробация результатов работы

По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей в ведущих российских и международных журналах. Результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПФ РАН, а также представлено 7 докладов на международных и российских конференциях: «2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)» (Абу-Даби, ОАЭ, 4–8 мая 2025 г.), «XIV Всероссийская научно-техническая конференция Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 2–6 июня 2025 г.), «VIII международная конференция Frontiers of Nonliner Physics» (Москва, Россия, 1–6 сентября 2024 г.), «2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)» (Чэнду, Китай, 21–25 апреля 2024), «International Workshop on Terahertz Technologies (IWTT 2026)» (Ухань, Китай, 26 – 28 июня 2026).

Личный вклад

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы (А1 – А16), получены либо автором, либо при его непосредственном участии.

Численные расчеты процессов электронно-волнового взаимодействия и разработка ключевых узлов мегаваттного гиротрона и гиротрона-драйвера проводились совместно с сотрудниками АО НПП «ГИКОМ», а также сотрудниками ИПФ РАН Куфтиным А.Н, Зуевым А.С., Железновым И.С. и Мануиловым В.Н. Система измерения мощности излучения, а также система управления и блокировок гиротронного стенда разработана и изготовлена в ходе совместных работ автора диссертационной работы и научной группы под руководством Проявина М.Д. Расчет и проектирование линии передачи проводился Шмелёвым М.Ю. при непосредственном участии автора диссертации. Измерения выходных пучков проводились автором совместно с Морозкиным М.В., обработкой и

реконструкцией занимался Чирков А.В. Создание двух новых гиротронных стендов, подготовка и проведение всех экспериментальных работ выполнены непосредственно автором при консультативной поддержке научного руководителя и помощи группы ученых и инженеров ИПФ РАН, обеспечивающих работу гиротронных комплексов. Обработка результатов экспериментов проводилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и 1 приложения. Объем диссертации составляет 101 страницу, включая 49 изображений, 4 таблицы, список публикаций по теме диссертации и список цитируемой литературы из 100 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 **главе 1** представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований гиротрона мегаваттного уровня мощности с частотой 230 ГГц в режиме свободной генерации.

В **разделе 1.1** представлены результаты численного моделирования нелинейного процесса электронно-волнового взаимодействия гиротрона мегаваттного уровня мощности с частотой 230 ГГц. На основании расчетов в рамках самосогласованных нестационарных моделей с фиксированной и нефиксированной продольной структурой поля в резонаторе, учитывающих конкуренцию мод и реалистичный сценарий включения гиротрона, определена рабочая мода, основные параметры электронного пучка, рассчитаны величины стартовых токов и зоны генерации. Описаны ключевые узлы прототипа, такие как

электронно-оптическая система, область электронно-волнового взаимодействия, а также система вывода излучения, представляющая собой новый двухканальный квазиоптический преобразователь.

В **разделе 1.2** приведены результаты экспериментального исследования мегаваттного гиротрона в режиме свободной генерации. Показана возможность устойчивого одномодового возбуждения рабочей моды $TE_{33,13}$, приведены полученные зависимости выходной мощности от технических параметров системы, спектральные характеристики излучения. За счет оптимизации условий электронно-волнового взаимодействия продемонстрирована возможность достижения выходной мощности 940 кВт при КПД 29.4% в режиме свободной генерации без системы рекуперации. Так же измерены параметры выходного волнового пучка, содержание гауссовой компоненты которого составляют 99,5% в основном выходном окне и 99,4% во втором окне, предназначенном для ввода внешнего синхронизирующего сигнала. Полученные результаты хорошо соотносятся с численными оценками.

В **главе 2** представлены результаты исследования процессов электронно-волнового взаимодействия и управления частотой мульти-киловаттного импульсного гиротрона-драйвера, предназначенного для реализации режимов захвата мегаваттного гиротрона.

В **разделе 2.1** приведены результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия и системы формирования пучка. В рамках стационарной модели гиротрона с нефиксированной структурой поля в резонаторе построены зависимости выходной мощности и частоты излучения от величины магнитного поля основного соленоида при сочетании различных параметров гиротрона, таких как ток электронного пучка, ускоряющее и анодное напряжения.

В **разделе 2.2** описаны результаты экспериментального исследования гиротрона-драйвера. Представлены зависимости максимальной выходной мощности от тока электронного пучка, ускоряющего и анодного напряжений. Акцент экспериментальных исследований сделан на исследовании зависимостей частоты генерации от величины магнитного поля для нескольких значений

параметров гиротрона, таких как ток пучка, величина ускоряющего и анодного напряжений и температура контура охлаждения резонаторной области. Максимальная выходная мощность составила 130 кВт при КПД 15%. Далее представлены результаты экспериментальных исследований при работе в импульсно-периодическом режиме со стабилизацией частоты системой ФАПЧ, по результатам которой спектр излучения сузился с 1 МГц до 180 кГц. Для дальнейшей разработки системы передачи излучения исследовано качество выходного волнового пучка драйвера, содержание гауссовой компоненты которого составило 96.9%.

В **главе 3** представлены результаты исследований, объединяющих оба вышеописанных гиротрона для теоретического и экспериментального исследования захвата частоты мегаваттного гиротрона внешним синхронизирующим сигналом от драйвера.

В **разделе 3.1** представлены результаты теоретического исследования влияния внешнего сигнала на процессы конкуренции мод в мегаваттном гиротроне под воздействием внешнего сигнала. На основе численного моделирования получены энергетические спектры электронного пучка и рассмотрено влияние захвата генерации внешним сигналом на работу системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка и полный КПД гиротрона.

В **разделе 3.2** представлена схема и результаты эксперимента по захвату частоты внешним сигналом. Был продемонстрирован эффект увеличения зоны генерации рабочей моды мегаваттного гиротрона, сопровождающийся ростом мощности излучения с 940 кВт до 1,1 МВт и КПД с 29,4% до 32,8%. Приведены спектры излучения обоих гиротронов в режиме захвата как без применения системы стабилизации частоты, так и при использовании системы ФАПЧ. Также проведено экспериментальное исследование биений вне зоны захвата частоты.

В **приложении 1** представлены многомодовые укороченные уравнения гиротрона с фиксированной продольной структурой поля, произвольным поперечным сечением резонатора и произвольным поперечным распределением электронного пучка с учетом разброса по скоростям электронов. Данные уравнения

использовались в ходе численного моделирования электронно-волнового взаимодействия гиротронов.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации.

Глава 1. Моделирование электронно-волнового взаимодействия и оптимизация параметров прототипа гиротрона 230 ГГц / 1 МВт

В данной главе приведены результаты основных теоретических расчетов прототипа мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 230 ГГц, выполненных на предварительном этапе в рамках модели с фиксированной структурой поля, описанной в [А3] и приложении 1, а при расчете процессов конкуренции мод в процессе включения – в самосогласованной нестационарной модели с нефиксированной продольной структурой поля [65]. Описаны основные результаты моделирования электронно-волнового взаимодействия и узлы гиротрона (Раздел 1.1) и представлены результаты экспериментального исследования (Раздел 1.2) гиротрона в режиме свободной генерации (без воздействия внешнего сигнала) [А1].

1.1 Расчет электронно-волнового взаимодействия и ключевые узлы гиротрона

Генерация излучения на частоте 230 ГГц на первой циклотронной гармонике с учётом релятивистского эффекта $f_H \approx \frac{28*B[\text{Тл}]}{\gamma}$ требует обеспечить магнитное поле величиной $\sim 9{,}2$ Тл при характерной энергии электронов 70–80 кэВ. Получение мегаваттного уровня мощности, по сравнению с менее мощными гиротронами [79], требует увеличения радиуса сверхразмерного резонатора, применения мод высокого порядка, а самое главное - увеличения размеров системы формирования электронного пучка. При этом, с одной стороны, предельная плотность эмиссии электронов с поверхности катода на уровне 3 А/см2, а также ограничение напряженности электрического поля значением менее 6 кВ/см определяют минимальные значения радиусов катода и анода электронной пушки. С другой стороны, параметры доступных магнитных систем задают максимальный размер

анода с учётом контуров охлаждения. Учитывая характеристики ЭОС в существующих приборах мегаваттного класса, для проекта гиротрона с частотой излучения 230 ГГц на основном циклотронном резонансе был выбран сухой сверхпроводящий криомагнит JASTEC 10T150, поле которого достигает 10 Тл в тёплом проходном отверстии диаметром 150 мм.

Для генерации СВЧ излучения мегаваттного уровня мощности на частоте 230 ГГц и при этом обеспечения приемлемых омических нагрузок на стенки резонатора выбрана рабочая мода круглого волновода $TE_{33,13}$. Радиус регулярной части резонатора, соответствующий данному режиму и частоте излучения, составляет 17,38 мм.

Использование моды с высокими индексами приводит к значительному росту плотности спектра. На рисунке 3 приведён спектр собственных мод выбранного резонатора, включающий в себя рабочий режим, а также 10 основных конкурентов, близко расположенных по частоте и имеющих высокий уровень связи с электронным пучком. Влияние данных мод будет учитываться и в последующих расчетах.

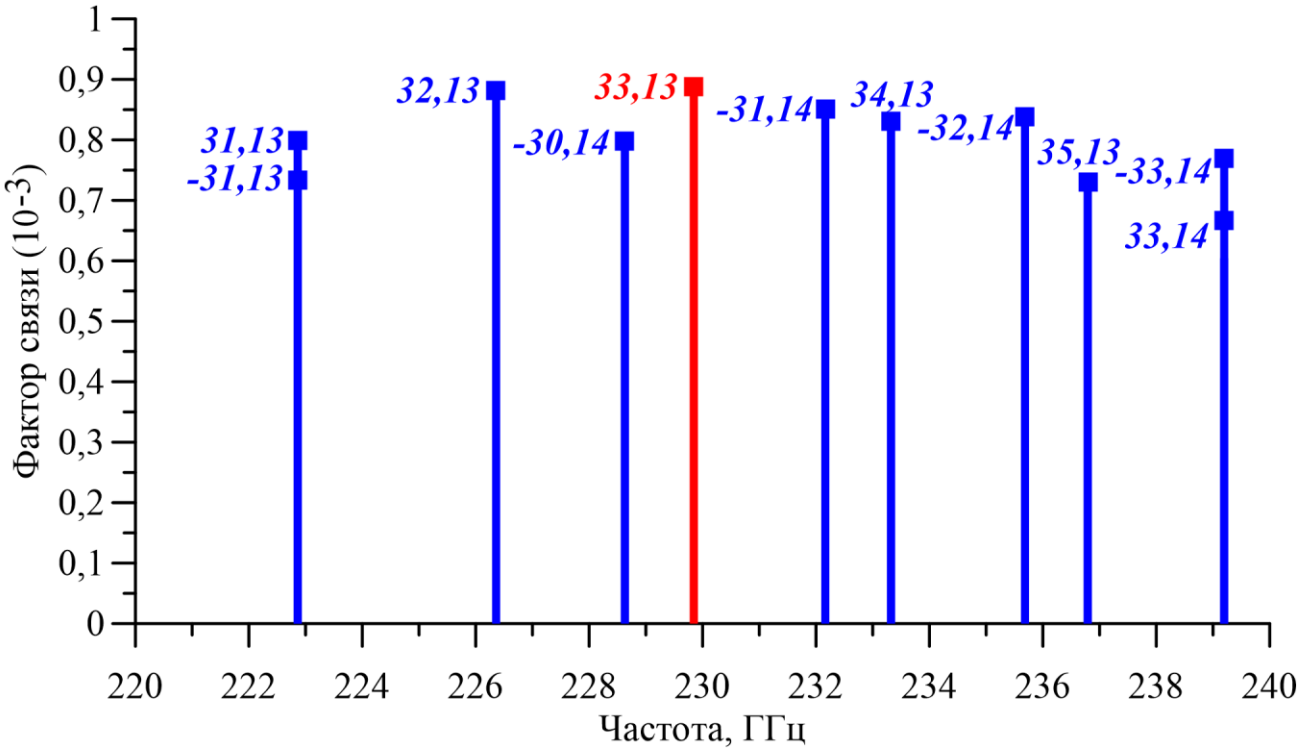


Рисунок 3. Спектр собственных мод цилиндрического резонатора с высоким коэффициентом связи в области рабочей частоты излучения гиротрона.

Для определения оптимального радиуса электронного пучка на рисунке 4 построена зависимость нормированных факторов связи рассматриваемых мод от радиуса встрела электронного пучка, определяемых как:

$$G_{m,p,n} = \frac{J^2_{|m-n|}\left(\nu_{m,p} * \frac{R_b}{R_{reg}}\right)}{\left(\nu^2_{m,p} - m^2\right) * J^2_{|m|}\left(\nu_{m,p}\right)}$$

где m, p – азимутальный и радиальный индексы моды круглого волновода, n – номер гармоники, R_b – радиус встрела электронного пучка, R_{reg} – радиус регулярной части резонатора, J – функции Бесселя, $\nu_{m,p}$ – p-й корень производной функции Бесселя m-го порядка.

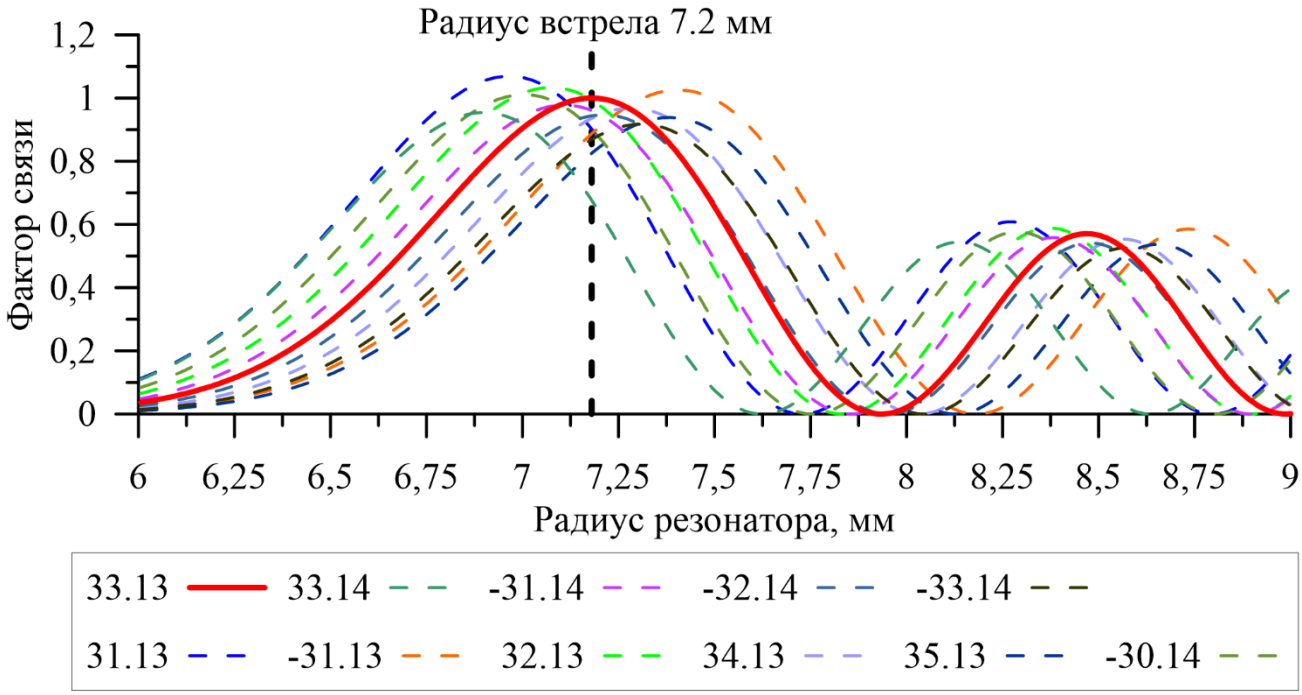


Рисунок 4. Нормированные значения фактора связи мод, учитываемых при расчетах электронно-волнового взаимодействия. Вертикальной пунктирной линией обозначен оптимальный радиус встрела 7.2 мм.

Полученные зависимости позволяют определить радиус встрела электронов, при котором взаимодействие рабочей моды с пучком будет максимальной, а коэффициент связи паразитных колебаний будет минимально возможным. Построенный график демонстрирует высокую плотность мод, что снижает эффективность селекции колебаний за счет параметров встрела электронного пучка (т. н. «электронной» селекции). На основе этих данных можно сделать вывод, что

оптимальный радиус составляет 7,2 мм, так как в этом случае связь с рабочей модой близка к пиковой, при этом ближайший по данному параметру конкурент $TE_{32,13}$ имеет более низкий показатель, несмотря на то что максимальное значение фактора связи у него выше, чем у $TE_{33,13}$.

Резонатор гиротрона представляет собой отрезок слабонерегулярного цилиндрического волновода. Со стороны катодного узла он ограничен закритическим сужением, препятствующим распространению волны. С противоположной стороны он имеет оптимизированную выходную секцию, образующая которой состоит из гладко соединённых дуг. Оптимизация выходной секции выполнялась с целью минимизации преобразования рабочей моды на неоднородности стенок. Радиус регулярной части, как говорилось ранее, составляет 17,38 мм. Длина однородного цилиндрического участка резонатора, равная 9 мм, выбрана исходя из баланса между ростом эффективности взаимодействия электронов с ВЧ-полем и необходимостью снижать омические потери в стенках. Численное моделирование распределения амплитуды электромагнитного поля резонатора позволяет оценить интегральное значение омических потерь, которое при выходной мощности 1,05 МВт составляет 25,6 кВт, при этом наиболее важный параметр максимальной плотности тепловых нагрузок не превышает $2{,}2\ \text{кВт}/\text{см}^2$, в то время как система охлаждения не позволяет превышать порог $2{,}5\ \text{кВт}/\text{см}^2$ [80]. Запас в $0{,}3\ \text{кВт}/\text{см}^2$ оставлен преднамеренно, так как при работе в режиме захвата частоты внешним сигналом, который планируется для достижения максимальной мощности в разрабатываемом гиротроне, описанном в главе 3, меняется распределение электромагнитного поля и плотность тепловых нагрузок увеличивается на $\sim 10\%$. Следует отметить, что при расчётах табличное значение проводимости меди было уменьшено вдвое для учёта содержания примесей в металле и шероховатости поверхности резонатора. Результаты моделирования зависимости выходной мощности и максимальных значений тепловой нагрузки на стенки резонатора от длины пространства взаимодействия в режиме свободной генерации представлены на рисунке 5. На рисунке 6 показаны финальный профиль резонатора и распределение тепловых нагрузок вдоль осевой координаты.

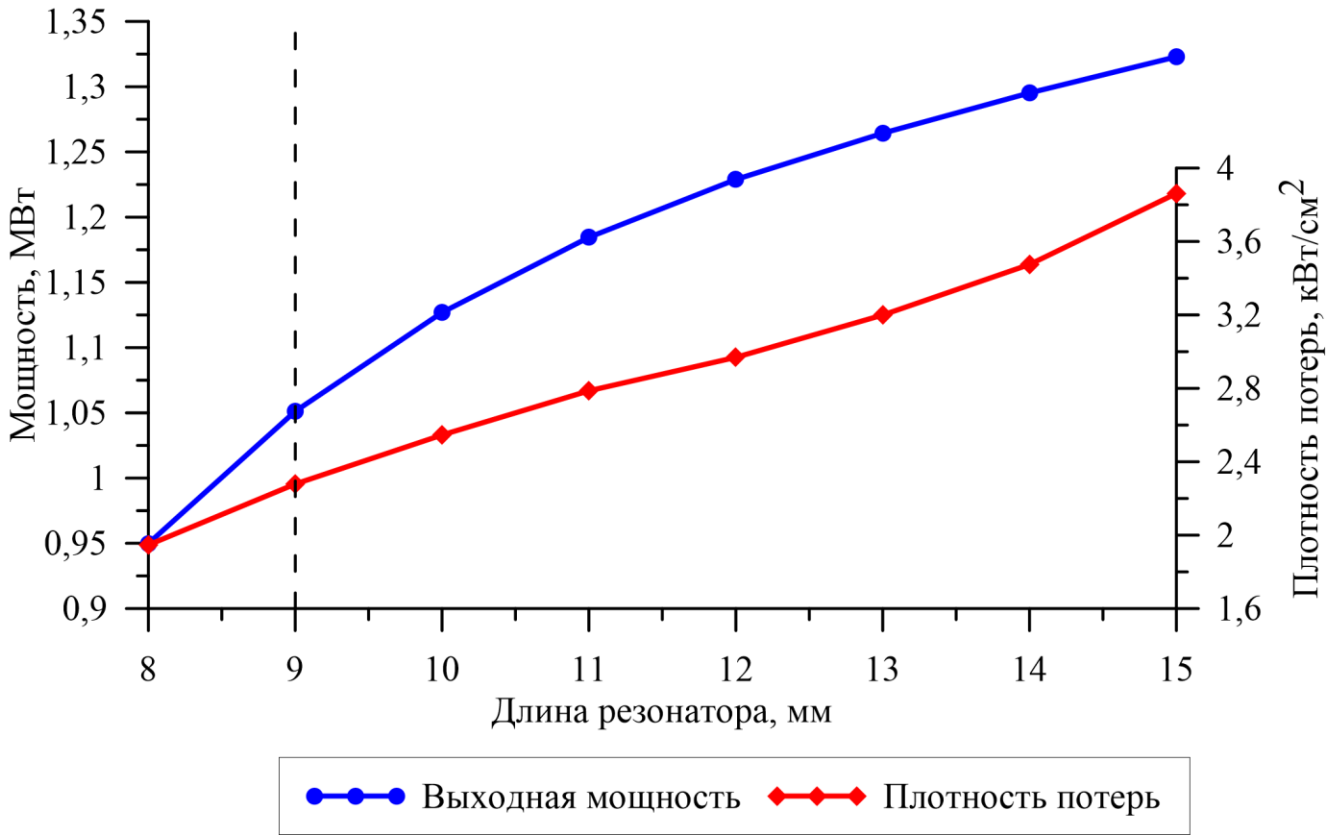


Рисунок 5. Графики зависимости выходной мощности (синяя линия) и максимальной плотности тепловых нагрузок (красная линия) от длины регулярной части резонатора.

Имея все необходимые параметры резонатора, выбираем величину ускоряющего напряжения на уровне 80 кВ и типичное для электронно-оптических систем мегаваттных гиротронов значение питч-фактора 1,1. Это позволяет провести оценки величины стартовых токов рабочей и паразитных мод в рамках стационарной модели с нефиксированной структурой поля с разбросом по поперечным скоростям электронов ~30%, а также с учётом неоднородного распределения магнитного поля криомагнита. Полученные зависимости приведены на рисунке 7. Несмотря на то, что рабочая мода $TE_{33,13}$ ограничена с двух сторон конкурентами, в первую очередь обратного вращения $TE_{-30,14}$ и $TE_{-31,14}$, она имеет достаточно широкий диапазон магнитных полей, при которых её стартовые токи расположены ниже, чем у конкурентов (минимальное значение ~8 А), что позволяет рассчитывать на устойчивое возбуждение в процессе нарастания тока и напряжения на переднем фронте высоковольтного импульса.

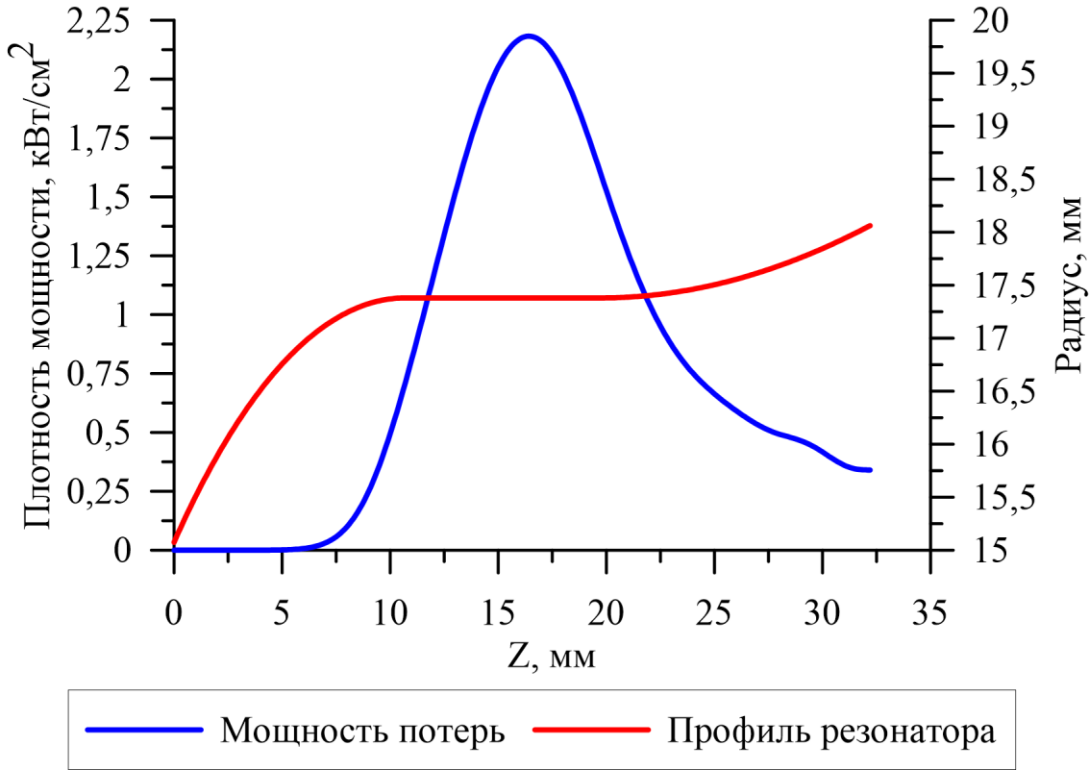


Рисунок 6. График распределения мощности омических потерь вдоль осевой координаты (синяя линия), качественно повторяющий распределение продольной компоненты электромагнитного поля, и продольный профиль резонатора (красная линяя).

Численные расчёты процесса конкуренции мод с учётом сценария включения гиротрона выполнялись в многомодовой самосогласованной нестационарной модели с нефиксированной структурой поля [65], включающей в себя изменение ускоряющего напряжения, тока и питч-фактора электронного пучка на переднем фронте высоковольтного импульса в процессе возбуждения генерации в гиротроне. В расчётах напряжение на катоде $\hat{U}$ увеличивалось линейно с 30 кВ до стационарного значения $U_0 = 80$ кВ, при этом ток пучка возрастал вследствие эффекта Шоттки [81,82] $\hat{I} = I_0\sqrt{\hat{U}/U_0}$. Разброс электронов по скоростям при этом не учитывался. Для определения мод конкурентов, которых необходимо принимать во внимание при расчетах, были построены зависимости стартовых токов рабочего и ближайших соседних режимов от ускоряющего напряжения (рисунок 8(Б)). Черной линией на графике показана величина тока электронного пучка в процессе

включения при магнитном поле 9,12 Тл. Исходя из полученных графиков, в расчетах необходимо учитывать 9 мод, через стартовые кривые которых проходит линия тока.

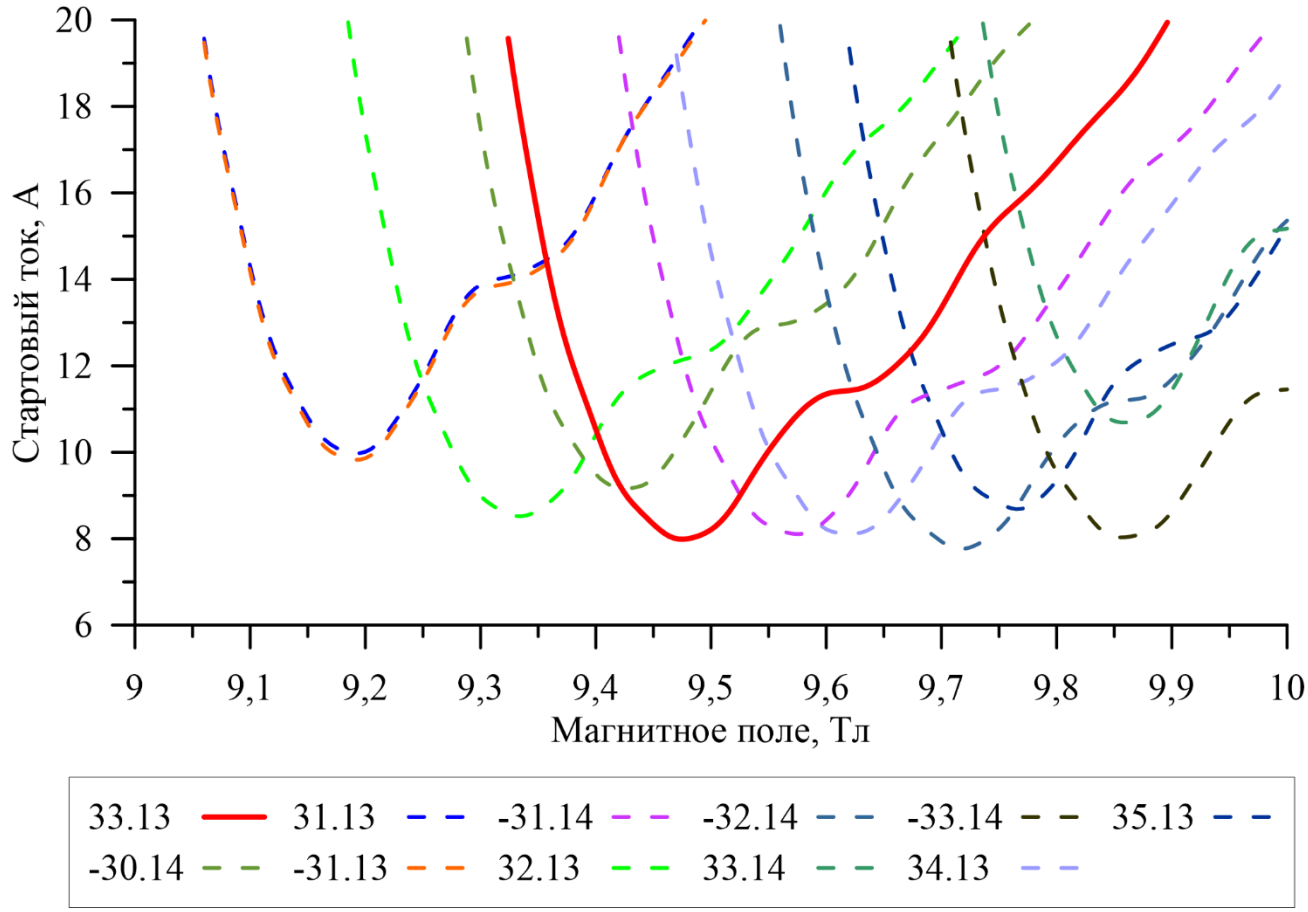


Рисунок 7. Кривые зависимостей стартовых токов от величины магнитного поля основного соленоида рабочей моды (сплошная красная линия) и ближайших мод конкурентов (пунктирные линии).

Полученные временные зависимости амплитуд режимов генерации представлены на рисунке 8(А). Как следует из рисунка 8(Б), при напряжении 35 кВ наблюдается первое пересечение линии тока со стартовым током конкурента $TE_{-32,14}$ (точка Б), и возбуждение этой моды проявляется на временной зависимости. В точке В, соответствующей срыву жёсткого режима генерации $TE_{-32,14}$, наблюдается процесс конкуренции, в котором побеждает рабочая мода $TE_{33,13}$. При этом в точке Г виден переход от моды с двумя продольными вариациями к моде с одной вариацией, сопровождающийся увеличением амплитуды. В результате в процессе включения устанавливается стационарная

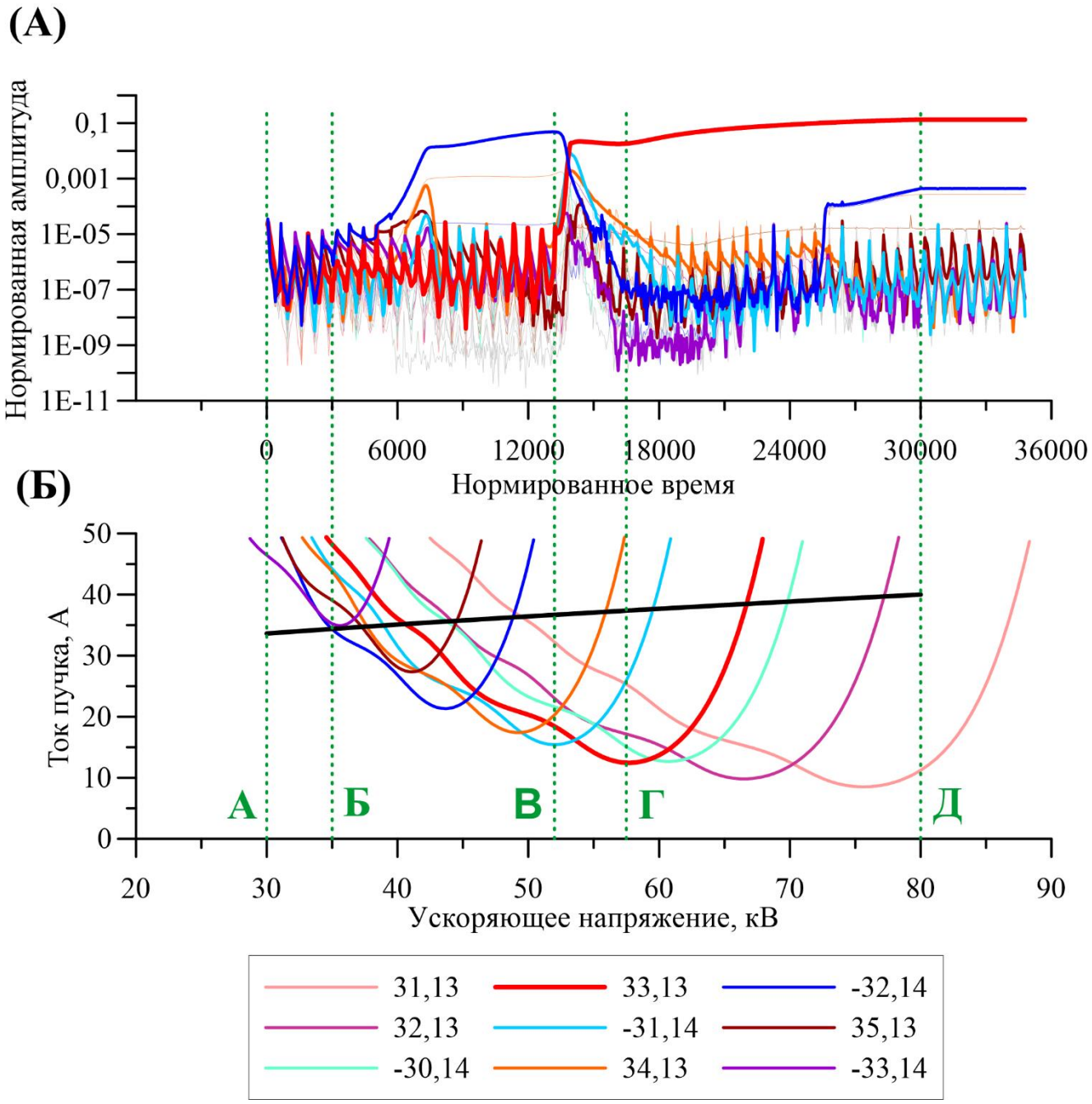


Рисунок 8. (А) – Кривые зависимости нормированных амплитуд рабочей и конкурирующих мод от нормированного времени (сценарий включения). (Б) – зависимости стартовых токов рабочей и конкурирующих мод от величины ускоряющего напряжения.

генерация рабочей моды с волновым КПД 33%. Амплитуды паразитных колебаний оказываются меньше, чем у рабочего режима как минимум на три порядка.

На основании результатов численного моделирования были построены зависимости выходной мощности от величины магнитного поля (зоны генерации)

рабочей и конкурирующих мод [80]. Полученные зоны продемонстрированы на рисунке 9. Сплошными линиями показаны результаты в одномодовом режиме, точками – с учётом конкуренции. На графике видны три изолированные зоны генерации мод: рабочей $TE_{33,13}$ и эквидистантного спектра $TE_{32,13}$ и $TE_{34,13}$. Несмотря на высокую плотность спектра, расчеты демонстрируют возможность достижения мегаваттного уровня мощности в режиме с ускоряющим напряжением 80 кВ и током 40 А с типичным для такого типа приборов КПД ~30%. Промежутки между модами являются зонами мультистабильности, в которых при моделировании не наблюдается устойчивого возбуждения одной моды. С точки зрения исследования процессов конкуренции примечательно, что левый край зоны генерации рабочего режима (в области большого КПД) в одномодовом и многомодовом случае практически не отличается. То есть максимально достижимая мощность в данных условиях не ограничена конкурентами. Это свидетельствует о возможности дальнейшего увеличения плотности спектра с целью повышения выходной мощности гиротронов.

Учет разброса скоростей электронов приводит к снижению расчетной максимальной мощности до 980 кВт, но практически не сдвигает границы зоны генерации.

Для обеспечения мегаваттного уровня мощности был выбран типичный для таких приборов поливинтовой электронный пучок, формируемый адиабатической триодной магнетронно-инжекторной пушкой (рисунок 10), разработанной В. Н. Мануиловым и А. Н. Куфтиным. Рабочий ток составляет 40 А, а ускоряющее напряжение 80 кВ. Результаты численного моделирования демонстрируют разброс скоростей электронов, составляющий 21,5%. Эмитирующая поверхность из гексаборида лантана представляет собой кольцо со средним диаметром 86 мм и шириной 3 мм, плотность тока не превышает 3 $А/см^2$. Для точной подстройки питч-фактора и радиуса встрела МИП дополнена катодным соленоидом с коэффициентом магнитной индукции 4,56 мТл/А. Следует отметить, что для генерации рабочей моды $TE_{33,13}$ расчёты предполагают работу электронно-оптической системы в диодном режиме.

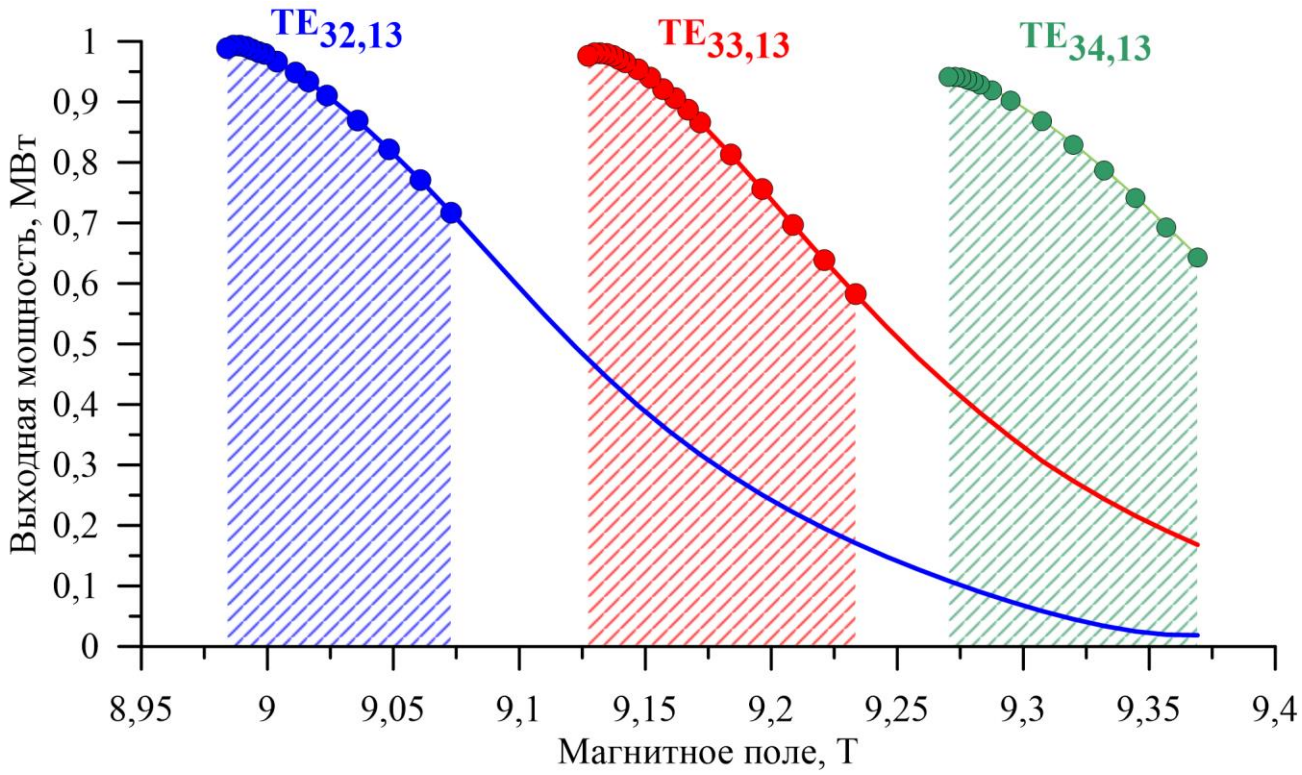


Рисунок 9. Расчетные зоны генерации рабочей моды $TE_{33,13}$ (красным), а также соседних мод конкурентов $TE_{32,13}$ и $TE_{34,13}$ (синим и зеленым) при токе пучка 40 А и ускоряющем напряжении 80 кВ. Сплошными линиями обозначены результаты расчетов в одномодовом режиме, а выделенные заливкой и точками результаты с учетом конкуренции.

Большинство современных высокомощных гиротронов имеет встроенный квазиоптический преобразователь [83], состоящий из профилированного лаунчера, квазипараболического зеркала и нескольких плоских или профилированных отражающих элементов, расположенных последовательно вдоль вектора распространения волнового пучка для вывода излучения через выходное окно. Данная система обычно оптимизируется для вывода конкретной моды, обладающей определённым направлением вращения. Такие квазиоптические преобразователи позволяют трансформировать в волновой гауссов пучок с эффективностью более 99% только рабочую моду гиротрона.

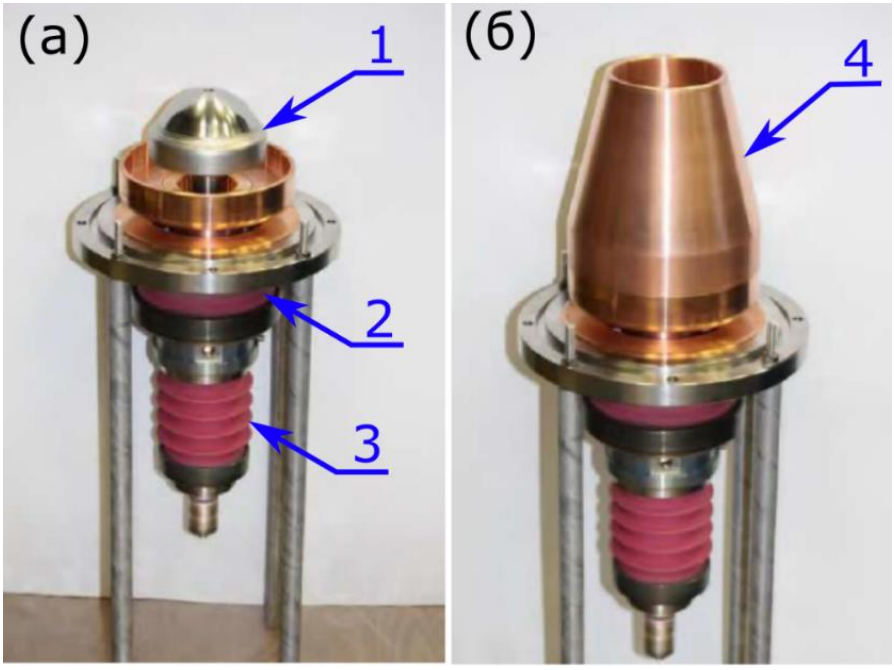
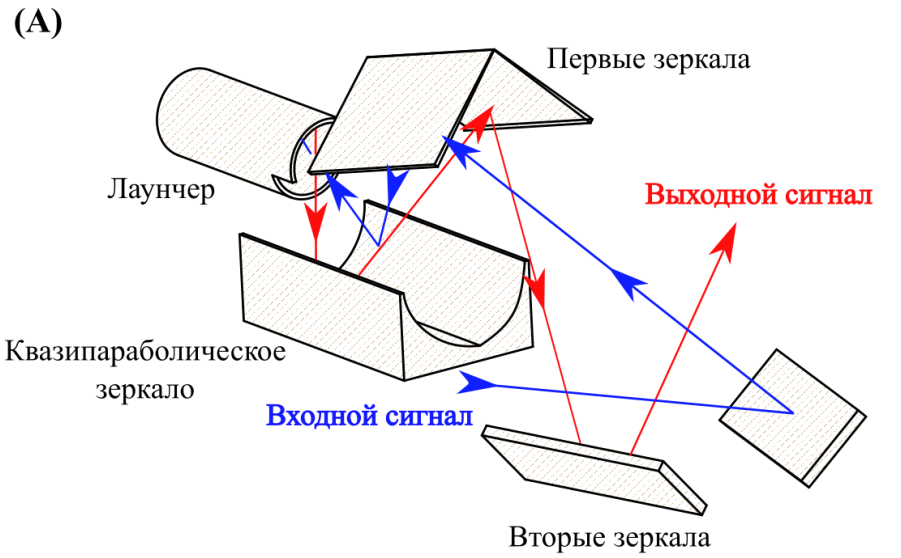


Рисунок 10. Адиабатическая триодная магнетронно-инжекторная пушка без анода (а) и с установленным анодом (б): 1 – эмитирующая область, 2 – анодный изолятор, 3 – катодный изолятор, 4 – анод

Однако рассматриваемый в данной работе гиротрон оснащён двухканальным квазиоптическим преобразователем (рисунок 11), состоящим из профилированного лаунчера и пары наборов зеркал (квазипараболическое и два профилированных) для двух возможных направлений вращения электромагнитного поля в резонаторе. Данная система оптимизирована так, чтобы преобразовать сразу обе моды $TE_{\pm 33,13}$ в два гауссовых пучка, распространяющихся под углом 90° в два разных выходных окна, отделяющих вакуумный объем гиротрона. Один из каналов квазиоптического преобразователя, соответствующий моде обратного вращения $TE_{-33,13}$, будет использоваться для ввода внешнего синхронизирующего сигнала (описание эксперимента приведено в главе 3), так как обеспечивает не только правильную поперечную структуру введенного в резонатор электромагнитного поля, но и направление вращения, совпадающее с рабочей модой. Расчет преобразователя был выполнен А. В. Чирковым.



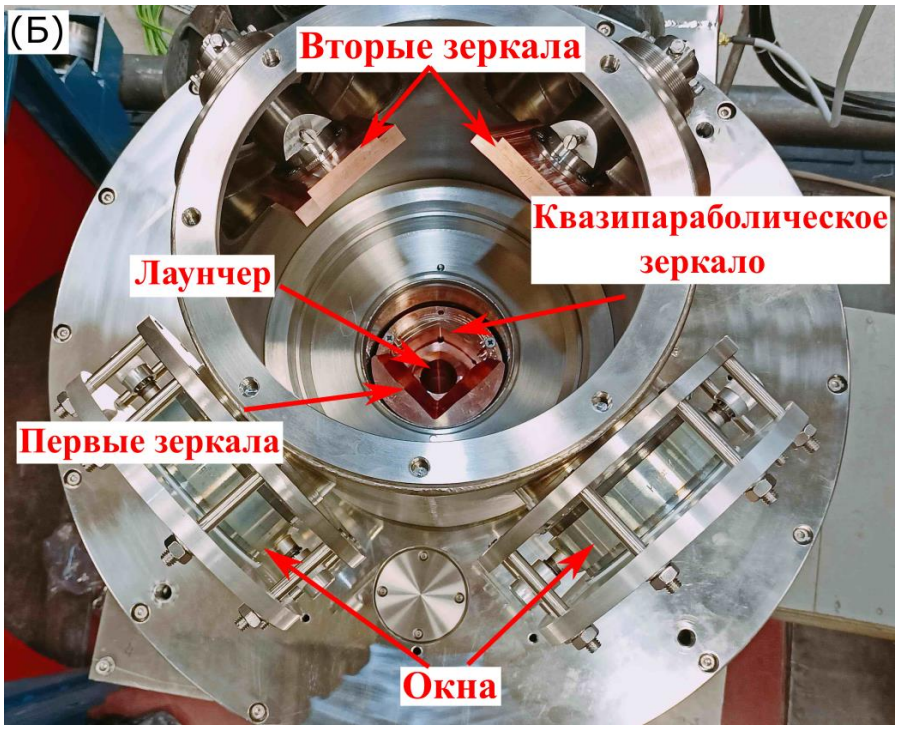


Рисунок 11. (А) – Принципиальная схема двухканального квазиоптического преобразователя гиротрона. Синими линиями обозначен путь входящего синхронизирующего сигнала, красными выходного излучения мегаваттного уровня мощности, (Б) – внешний вид преобразователя в сборе.

Во всех высокомощных длинноимпульсных гиротронах выходные окна выполнены из синтетических алмазов, полученных методом химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) [84]. Они отличаются низким поглощением $P_{window} = P_{MW} * \frac{\pi d}{\lambda}(\varepsilon + 1)\tan\delta$ в СВЧ диапазоне ($\tan\delta \leq$

$2 * 10^{-5}$), а высокая теплопроводность (~ 2000 Вт/(м $*$ К)) позволяет быстро отводить тепло к охлаждающему водяному контуру. В связи с тем, что рассматриваемый в данной задаче гиротрон рассчитан на работу только в импульсном режиме, а высоковольтный источник способен поддерживать ускоряющее напряжение со скважностью не менее 1000, то прогнозируемая средняя выходная мощность в своем максимуме будет достигать ~ 1 кВт. Это предполагает низкую термическую нагрузку на все элементы лампы, в том числе на выходные окна. Поэтому в этой работе рационально использовать более дешёвый и доступный материал – нитрид бора (BN) с характерным значением $\tan\delta = 1{,}9 * 10^{-3}$. Окно представляет собой тонкий плоский диск, и при прохождении через него излучения является простым интерферометром Фабри-Перо. Толщина определяется выражением $d = N\left(\lambda/2\sqrt{\varepsilon}\right)$ и соответствует минимальному значению коэффициента отражения для частоты рабочей моды. Для рассматриваемого гиротрона были выбраны 2 пластины из BN и проведены измерения электродинамических свойств [85]. Исходя из полученного показателя преломления $n = 2{,}099$, была определена толщина $d = 3{,}727$ мм. Зависимости коэффициента отражения от частоты излучения, приведенные на рисунке 12, демонстрируют, что выбранная конфигурация обеспечивает низкое отражение ($\sim 0.1\%$) на частоте 230 ГГц (синяя линия). Но так как в перспективе планируется создание длинноимпульсной версии данного прототипа гиротрона, сделана оценка коэффициента отражения и для окна из CVD алмаза с показателем преломления $n = 2{,}381$ и толщиной $d = 1{,}647$ мм (красная линия).

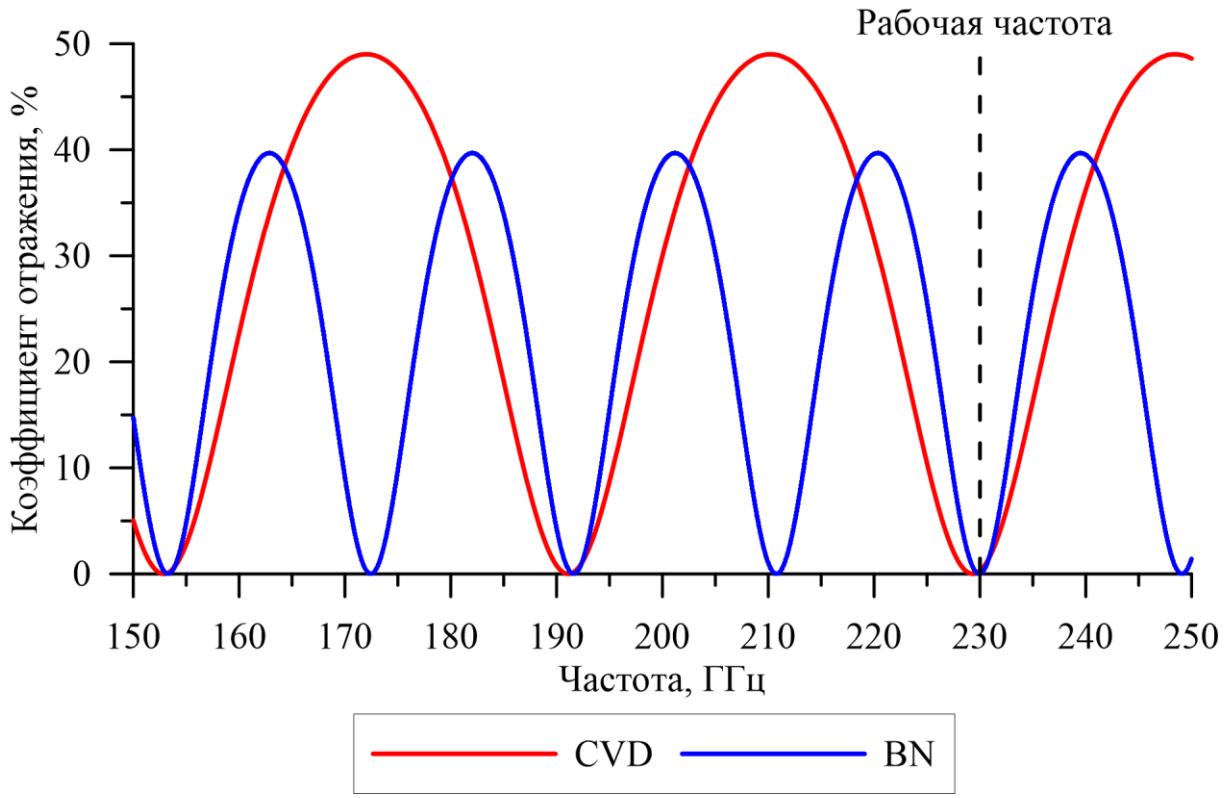


Рисунок 12. Зависимости коэффициента отражения выходных окон из нитрита бора BN (синяя линия) и CVD алмаза (красная линия). Вертикальная пунктирная линия указывает на частоту излучения рабочей моды.

1.2 Экспериментальное исследование зависимостей выходной мощности и спектральных характеристик излучения гиротрона в режиме свободной генерации

Для проведения исследований мегаваттного гиротрона с частотой генерации 230 ГГц был создан новый экспериментальный гиротронный стенд на базе ИПФ РАН (рисунок 13), в основе которого расположен вышеупомянутый криомагнит JASTEC 10T150. Максимальный рабочий ток соленоида, достигающий 296,21 А создается комплектом из 5 параллельно подключенных источников питания Oxford MercuryIPS.

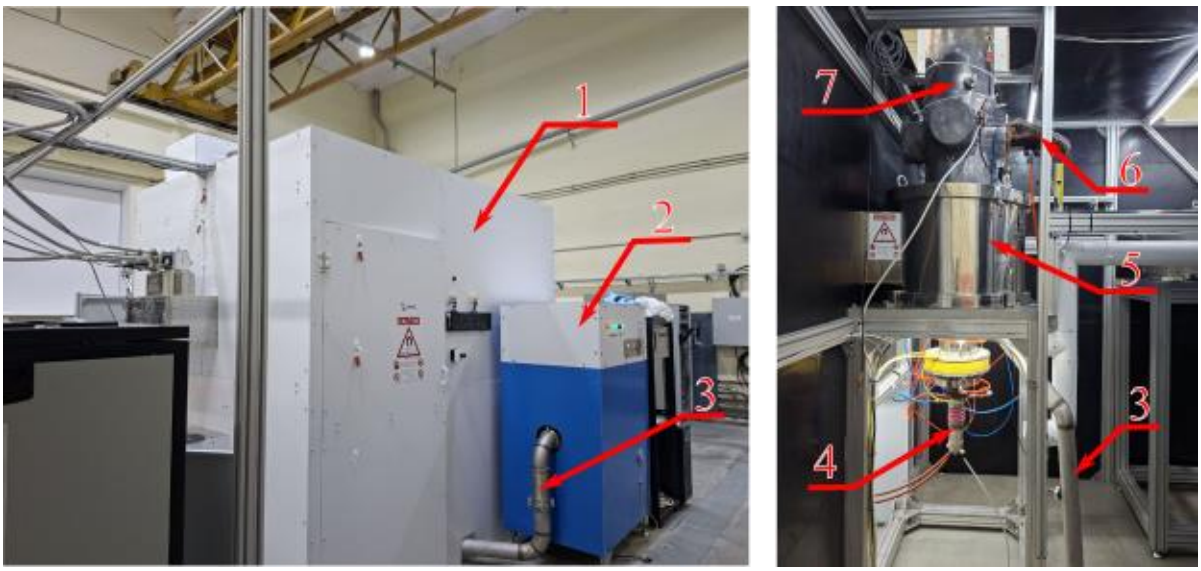


Рисунок 13. Внешний вид гиротронного комплекса. 1 – защитный кожух от СВЧ излучения, 2 – трёхступенчатая система откачки, 3 – вакуумная линия между системой откачки и гиротроном, 4 – катодный узел, 5 – криомагнит, 6 – калориметр, 7 – блок квазиоптического преобразователя и коллектор

Для создания ускоряющей разности потенциалов между катодом и заземлённым коллектором использован созданный в ООО «НПП ЛМ ИНВЕРТОР» лестничный генератор высоковольтных прямоугольных импульсов ЛГВИ-100/50 [А7] (рисунок 14 (А)) с выходным напряжением от 25 до 100 кВ и током до 50 А. Источник способен работать только в режиме коротких импульсов длительностью от 10 до 100 мкс и частотой повторения от 0,1 до 10 Гц. Нестабильность напряжения не превышает 0.5%, а длительность фронтов составляет менее 5 мкс. Также данный генератор оснащён встроенным измерителем тока и высоковольтным делителем с коэффициентом 1:10000. На рисунке 14(Б) приведен пример формы импульсов высокого напряжения и тока.

В сотрудничестве с компанией АО «НПП ГИКОМ» был изготовлен прототип вышеописанного гиротрона. Он выполнен в разборном корпусе, с использованием резиновых и медных уплотнений, что позволяет производить легкую и быструю замену узлов лампы в ходе работ по модернизации или ремонту устройства.

Данная конструкция не подразумевает обезгаживания и отпайки в откачном посту, поэтому требует внешней непрерывной откачки. Для этого была сконструирована трёхступенчатая система, включающая в себя безмасляный

спиральный насос Agilent IDP 7, турбомолекулярный насос Agilent TwisTorr 305 FS и магниторазрядный диодный кольцевой насос НМД-К-0.4-CF150. Такая комбинация вакуумных приборов позволяет достигать условий глубокого разрежения в объеме гиротрона ($\sim 10^{-8}$ Торр) даже с учётом относительно длинной (около 3 м) линии откачки. Контроль уровня вакуума осуществляется при помощи преобразователя манометрического ионизационного ПМИ-2, работающего в паре с вакуумметром ионизационно-термопарным ВИТ-2. Выбор данной системы обусловлен необходимостью измерения степени вакуума вблизи гиротрона, где действуют сильные магнитные поля, в то время как современные приборы основаны на технологии холодного катода и имеют высокую чувствительность к внешнему магнитному полю.

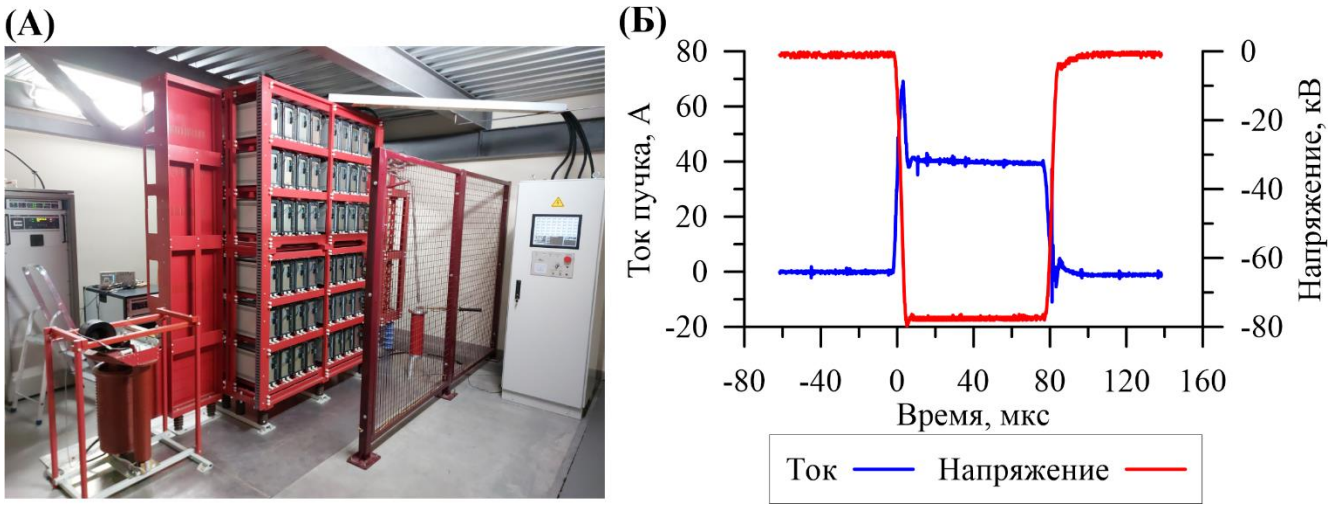


Рисунок 14. (А) – внешний вид установленного высоковольтного источника ускоряющего напряжения, (Б) пример высоковольтного импульса длительностью 80 мкс с напряжением 80 кВ и током 40 А

Отвод тепла от узлов гиротрона (анода, катодного соленоида, резонатора, коллектора и выходных окон) осуществляется проточной водой. Катодный узел охлаждается снаружи за счёт воздушного потока канального вентилятора.

Так как расчётные режимы генерации моды $TE_{33,13}$ предполагают работу электронно-оптической системы в диодном режиме, анод, как и корпус лампы, был заземлён. Также, так как основной задачей рассматриваемого прототипа гиротрона является верификация результатов численного моделирования и подтверждение

возможности достижения мегаваттного уровня мощности на рабочей моде $TE_{33,13}$ с частотой 230 ГГц, конструкция гиротрона не предусматривала системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка.

Измерение выходной мощности проводится при помощи двух водяных калориметров (по одному на каждое окно), оснащенных двумя цифровыми датчиками температуры SMT172 TO-18, расходомерами YF-S401 и системой обработки данных [86]. Для калибровки был задействован калиброванный электронагреватель. Импульсная мощность излучения гиротрона рассчитывается исходя из полученной средней мощности и значения скважности импульсов. Для увеличения точности измерений применялся новый калориметр, разработанный в ИПФ РАН, корпус которого напечатан из пластика на 3D принтере и покрыт тонким слоем меди путем химической металлизации с последующим осаждением меди в гальванической ванне [87,88]. Это позволяет увеличить скорость выхода показаний на стационарное значение и уменьшить влияние нестабильной температуры окружающей среды на результаты измерений.

Гиротронный стенд оснащен системой управления, разработанной сотрудниками ИПФ РАН [86]. Она включает в себя управление всеми источниками, контроль ключевых параметров и систему блокировок для защиты как элементов стенда, так и людей.

Для измерения частоты излучения часть сигнала ответвлялась через отверстие в калориметре диаметром 3 мм, и по диэлектрическому волноводу направлялось к спектроанализатору Keysight N9010A, частотный диапазон которого был расширен до необходимого при помощи гармонического смесителя СМ-01.5 производства АО «НИИПП».

В эксперименте при ускоряющем напряжении 80 кВ и токе электронного пучка 40 А было продемонстрировано возбуждение рабочей моды $TE_{33,13}$ при величине магнитного поля в диапазоне 9,13–9,29 Тл. Подтверждением одномодовой генерации служили наличие излучения только в одном выходном окне, соответствующем правильному направлению вращения моды, а также частота, согласующаяся с расчетными значениями. Экспериментально полученный спектр

излучения (рисунок 15) при магнитном поле 9,26 Тл имеет центральную частоту 230,1 ГГц. Ширина определяется нестабильностью ускоряющего напряжения и не превышает 6 МГц.

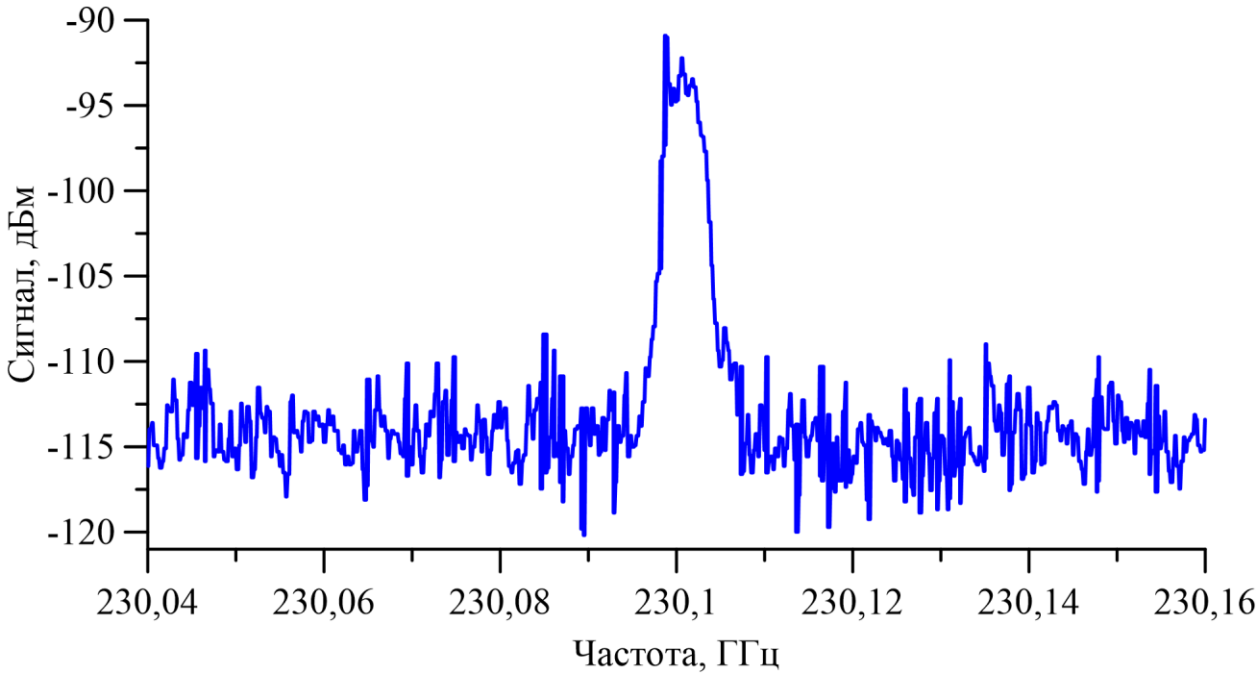


Рисунок 15. Спектр излучения рабочей моды $TE_{33,13}$ при магнитном поле 9.26 Тл. Центральная частота составляет 230.1 ГГц, ширина не превышает 6 МГц.

Для измерения зависимости мощности от величины магнитного поля основного соленоида высоковольтный источник ускоряющего напряжения работал в режиме с длительностью импульсов 80 мкс и частотой повторения 10 Гц (скважность импульсов 1250). Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. Сначала, изменяя величину магнитного поля основного соленоида, а также подбирая оптимальные значения высокого напряжения и тока пучка, был определён максимум мощности и КПД в зоне генерации, который составил 875 кВт и 27,3% соответственно при магнитном поле 9,152 Тл, ускоряющем напряжении 80 кВ и токе пучка 40 А. Далее проводилась оптимизация радиуса встрела и питч-фактора с помощью дополнительной катушки подмагничивания в катодном узле. Такая оптимизация позволила увеличить мощность генерации на 7% и КПД на 2,3% при токе катушки подмагничивания 0,3 А, что соответствует изменению поля в области ЭОС на 1,37 мТл (магнитное поле катодной катушки направлено противоположно полю основного соленоида). Наилучший результат получен при магнитном поле

9,123 Тл, напряжении 80 кВ, токе 40 А и составил 940 кВт при КПД 29,4%. На рисунке 16 красной линией обозначена экспериментально полученная зависимость мощности генерации от величины магнитного поля основного соленоида. Синий график представляет собой результаты численных расчётов в рамках модели с нефиксированной структурой поля и сценарием включения в одномодовом режиме с учётом разброса по электронным скоростям.

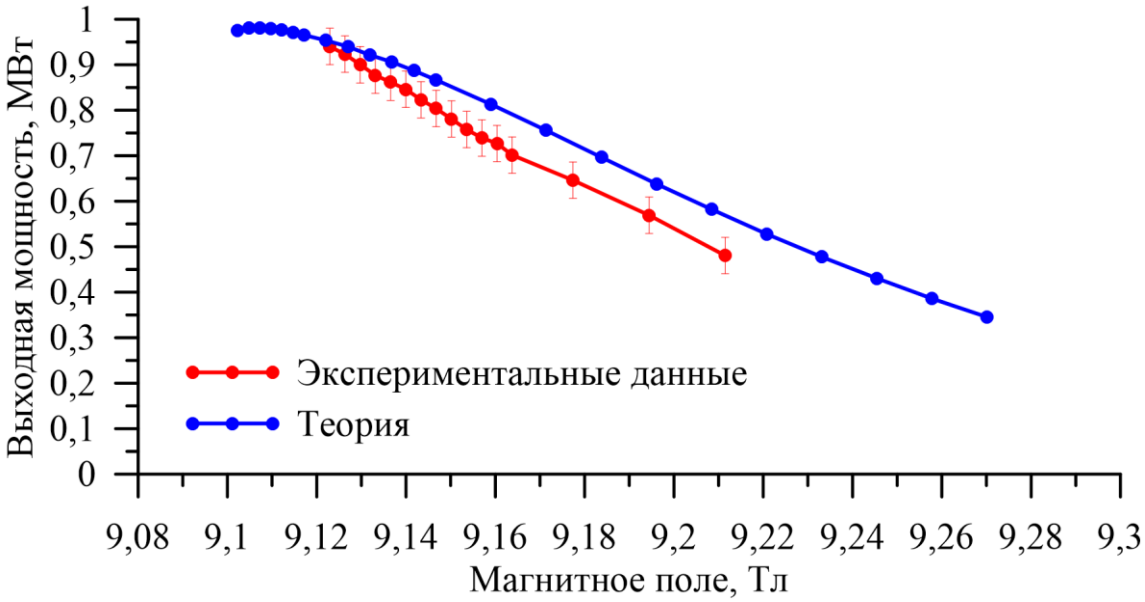


Рисунок 16. Кривые зависимости мощности выходного излучения от величины магнитного поля основного соленоида МВт гиротрона в режиме свободной генерации. Красная линия представляет собой экспериментальны данные, синяя – результаты численного моделирования режимов генерации данного гиротрона.

Видно, что экспериментально полученные зоны согласуются с теоретическими оценками в части максимально достижимой мощности. Отличия в теоретической и экспериментальной зонах генерации следует отнести к воздействию нескольких эффектов, имеющих место в ходе измерений. Первый – влияние провисания потенциала, создаваемого электронным пучком, достигающего величины 5–6 кВ, и не скомпенсированного ионами остаточных газов в коротком импульсе. Такое изменение энергии электронов объясняет сдвиг зоны по магнитному полю. Вторым эффектом является влияние неоднородности полки импульса ускоряющего напряжения (определяемое высоковольтным источником), не позволяющее достичь точки срыва генерации и несколько

ограничивающее максимальную мощность. Кроме того, в расчетах не учитываются омические и дифракционные потери в квазиоптическом преобразователе, по оценкам составляющие не менее 0,5%.

Одна из целей данной эксперимента состояла в исследовании эффективности работы нового квазиоптического двухканального преобразователя гиротрона, которая заключалась в измерении профиля волнового пучка на выходе из вакуумного объема и оценке содержания гауссовой компоненты (TEM_{00}) волны [89,90]. Сначала было проведено исследование основного канала вывода излучения рабочей моды $TE_{33,13}$. Предварительные оценки формы и направления распространения пучка проводились по методу, описанному в [А5]. После этого была собрана схема основного эксперимента, приведённая на рисунке 17. Для этого на пути следования пучка в нескольких сечениях устанавливалась диэлектрическая мишень из листа плотной бумаги. Проходящее СВЧ излучение нагревало лист, одновременно с этим фиксировалось тепловое распределение, эквивалентное переданной мощности. Регистрация температуры проводились инфракрасной камерой Variocam HD Head 800 с точностью 0,05 °C. Для повышения качества реконструирования фазового распределения измерения выполнялись в 7 сечениях. Свойственные ошибки решения обратной задачи не возникают, так как реконструированные распределения электромагнитного поля должны совпадать, с точностью до погрешностей в ходе измерений, с экспериментально полученными амплитудными распределениями в сечениях, не используемых в процессе обработки.

Измеренные поперечные распределения электромагнитного поля волнового пучка, а также результаты реконструкции распределения поля и фазы соответственно представлены на рисунке 18. Согласно полученным данным, содержание гауссовой компоненты волнового пучка в распределении поля составило 99,5%, что хорошо согласуется с теоретической оценкой 99,7%/

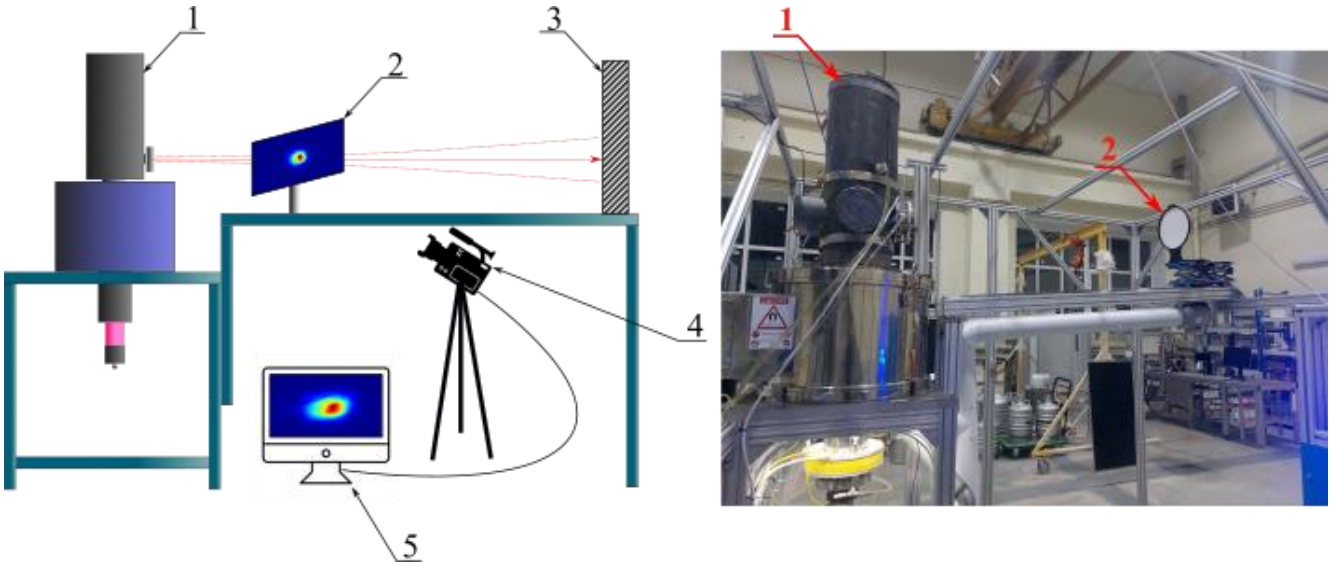


Рисунок 17. Принципиальная схема измерений поперечного профиля выходного волнового пучка гиротрона и фотография гиротронного стенда во время измерений. 1 – Гиротрон, 2 – диэлектрический экран, 3 – поглотитель остаточного СВЧ излучения, 4 – инфракрасная камера, 5 – компьютер для обработки полученных данных

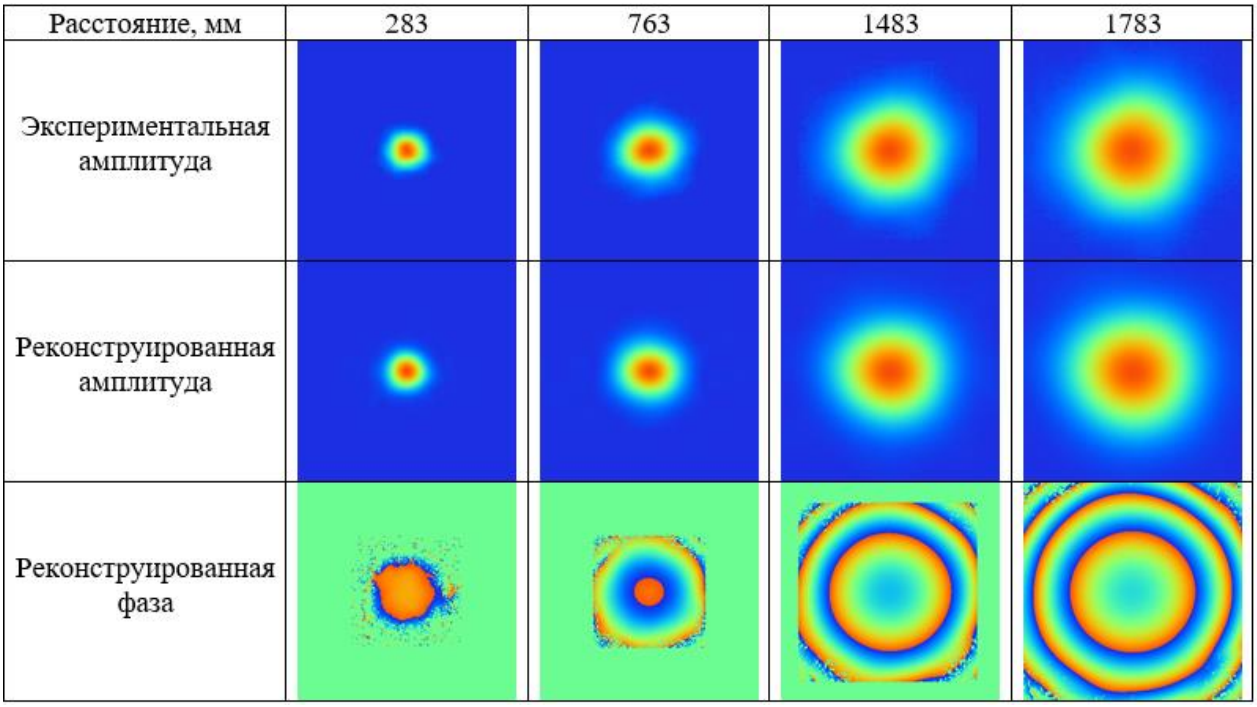


Рисунок 18. Измеренные распределения амплитуды поля (верхний ряд), реконструированные распределения амплитуды (средний ряд) и реконструированная фаза (нижний ряд) волнового пучка гиротрона в нескольких сечениях вдоль оси распространения. Апертура 195×195 мм.

В ходе дальнейшего исследования требовалось провести измерение профиля волнового пучка на выходе из второго окна гиротрона, соответствующего моде обратного вращения $TE_{-33,13}$. Чтобы её возбудить, проще всего изменить направление тока в основном соленоиде на противоположное, что повлечёт за собой инверсию направления силовых линий магнитного поля, а следовательно, и направления вращения электронов и возбуждаемой моды. Но конструктивные характеристики применяемого соленоида исключают возможность применения данного подхода.

Однако было найдено альтернативное решение данной задачи – изменить радиус ведущих центров электронного пучка в резонаторе. Как видно из рисунка 19, на котором представлена зависимость факторов связи от радиуса резонатора для мод $TE_{\pm 33,13}$ и их ближайших конкурентов, требуется увеличить радиус встрела с 7,2 мм до 7,4 мм или выше. При таких условиях будет обеспечена генерация моды обратного вращения $TE_{-33,13}$, так как её коэффициент связи с электронным пучком больше, чем у моды $TE_{33,13}$. В то же время два основных конкурента $TE_{35,12}$ и $TE_{-32,13}$ имеют сопоставимый уровень связи с электронным пучком. Но в то же время их рабочие частоты заметно отличаются, поэтому зоны генерации не перекрывают друг друга.

Аналогичный подход использовался в работе [А4], где за счет изменения параметров электронного пучка обеспечивалось возбуждение последовательности мод для расширения диапазона перестройки частоты гиротрона. Для получения требуемого результата в исследуемом прототипе необходимо увеличить магнитное поле в области формирования электронного пучка при помощи катодной корректирующей катушки, имеющей сонаправленное поле с основным соленоидом. Численные расчеты показали, что минимально необходимый радиус встрела 7,4 мм достигается при токе в катушке, равном +3 А.

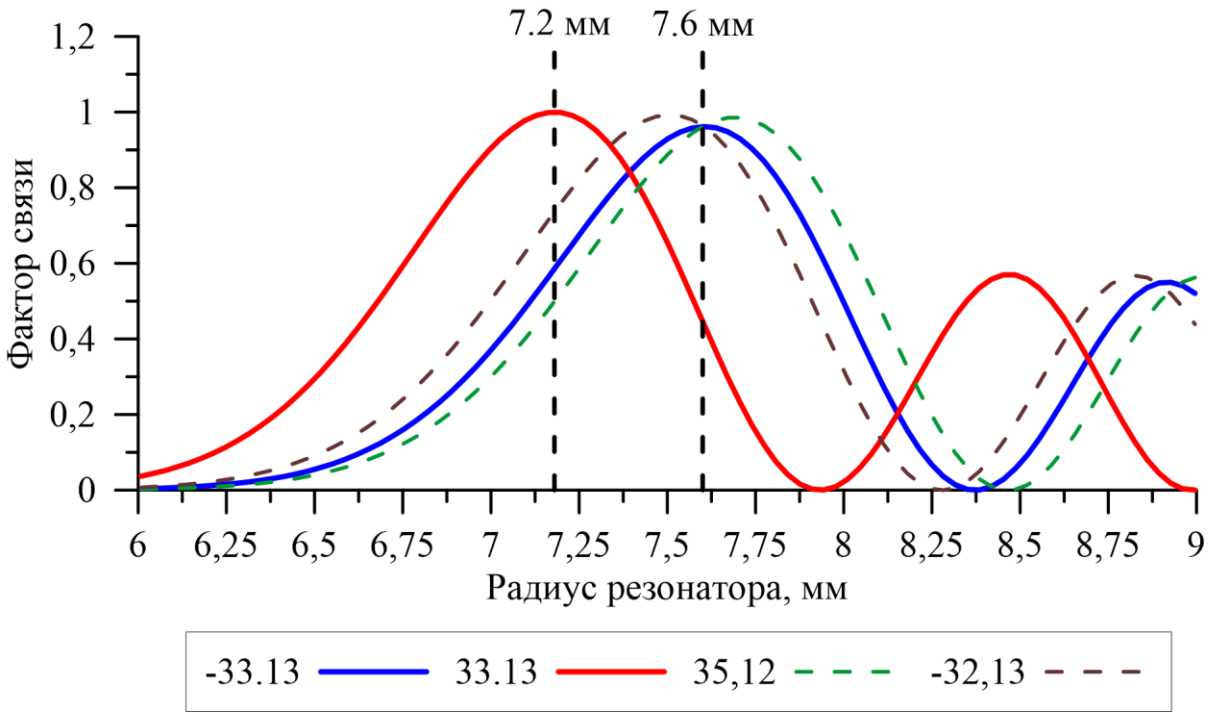


Рисунок 19. График зависимости фактора связи электронного пучка от радиуса встрела в резонатор для рабочих мод прямого и обратного вращения, а также основных конкурентов моды обратного вращения.

В ходе экспериментального исследования была обнаружена зона генерации моды $TE_{-33,13}$, положение и частота генерации которой совпадают, с точностью до погрешностей, с модой прямого вращения. При величине ускоряющего напряжения 77 кВ, токе электронного пучка 40 А и токе катодного соленоида +3 А получена мощность 350 кВт. Следует отметить, что оптимизация рабочих параметров гиротрона для моды обратного вращения не проводилась, так как полученной мощности достаточно для решения задачи по измерению параметров волнового пучка.

Измеренные поперечные распределения электромагнитного поля волнового пучка во втором канале преобразователя, а также результаты реконструкции распределения поля и фазы представлены на рисунке 20. Согласно полученным данным, содержание гауссовой компоненты волнового пучка в распределении поля составило 99,4%, что хорошо согласуется с теоретической оценкой 99,7%.

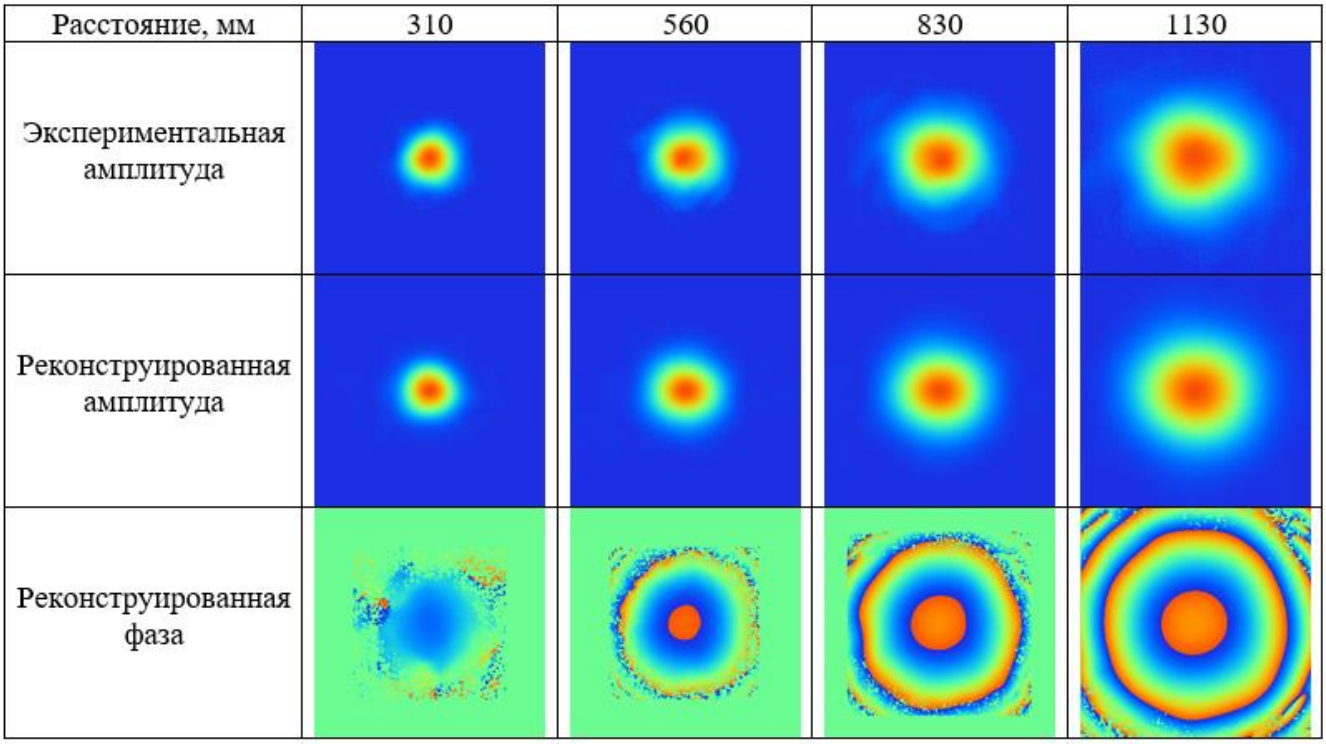


Рисунок 20. Измеренные распределения амплитуды поля (верхний ряд), реконструированные распределения амплитуды (средний ряд) и реконструированная фаза (нижний ряд) волнового пучка гиротрона во втором канале в нескольких сечениях вдоль оси распространения. Апертура 150×150 мм.

Заключение к главе 1

В главе представлены результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия и экспериментального исследования мегаваттного гиротрона в свободном режиме генерации, описаны ключевые узлы гиротрона и испытательного стенда.

В п. 1.1 приведены результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия мегаваттного гиротрона с частотой излучения 230 ГГц. Определены основные параметры, такие как рабочая мода, радиус и длина резонатора, радиус встрела электронного пучка. Проведены исследования стартовых токов и зон генерации, рассмотрен сценарий возбуждение рабочей моды $TE_{33,13}$ в режиме без воздействия внешнего сигнала, продемонстрирована

теоретическая возможность генерации излучения мегаваттного уровня мощности на рабочей моде при сохранении уровня омических нагрузок на приемлемом уровне. Описаны параметры ключевых узлов гиротрона

В п. 1.2 приведены результаты экспериментального исследования данного гиротрона в свободном режиме без синхронизирующего сигнала. Подтверждена возможность устойчивого одномодового возбуждения рабочей моды. Определена зона генерации, измерена частота излучения равная 230,1 ГГц и получена выходная мощность 940 кВт с КПД 29,4%. Так же исследована эффективность нового квазиоптического преобразователя, содержание гауссовой компоненты в поперечном распределении электромагнитного поля волнового пучка составило не менее 99,5% в обоих каналах вывода излучения.

Глава 2. Теоретическое и экспериментальное исследование мульти-кВт гиротрона-драйвера

Теоретические оценки, показанные в работах [62–64,91], демонстрируют, что для обеспечения эффективной синхронизации частоты мощность внешнего сигнала должна составлять 2–5% от мощности синхронизируемого мегаваттного гиротрона. Эти оценки получили экспериментальное подтверждение в работе [А6] на гиротроне с частотой 170 ГГц.

Однако повышение мощности внешнего сигнала до 10% и более способствует увеличению ширины зоны захвата. К тому же использование более мощного гиротрона-драйвера теоретически позволяет синхронизировать одновременно несколько мегаваттных гиротронов для обеспечения их когерентной работы при использовании разделения мощности драйвера на несколько каналов.

Такой уровень мощности на частоте 230 ГГц может обеспечить гиротрон-драйвер, имеющий классическую конструкцию системы вывода излучения, включающую в себя одноканальный квазиоптический преобразователь. Более низкая мощность излучения позволяет использовать меньший радиус резонатора, и, как следствие, более низкий индекс моды, что позволяет обеспечить требуемый уровень мощности генерации без применения дополнительных методов селекции мод.

Более того, меньшая мощность гиротрона-драйвера, а значит, и меньшие геометрические размеры лампы и всех её элементов, упрощают задачу стабилизации частоты излучения. Малая ёмкость анода в триодной электронно-оптической системе позволяет достичь частот модуляции напряжения до 1 МГц, что даёт возможность реализовать фазовую автоподстройку частоты за счет управления напряжением анода.

В данной главе описываются основные численные расчёты электронно-оптического взаимодействия и ключевые узлы, а также приводятся результаты

экспериментального исследования гиротрона-драйвера как в свободном режиме, так и при использовании системы стабилизации частоты излучения [А2].

2.1 Расчет электронно-волнового взаимодействия и частотных характеристик гиротрона-драйвера

Практическая возможность реализации гиротрона с рабочей частотой в диапазоне 220 – 250 ГГц и характерной выходной мощностью 100 – 200 кВт была продемонстрирована в [А4]. Опираясь на аналогичные ограничения, связанные с тепловыми нагрузками на стенки резонатора и с размерами магнитных систем, описанные в главе 1, для обеспечения требуемой выходной мощности на уровне сотен киловатт, в качестве рабочей была выбрана мода круглого волновода $TE_{18,8}$ на первой циклотронной гармонике. Магнитная система представляет собой имеющийся в ИПФ РАН сухой сверхпроводящий криомагнит XSMT-10T100 с величиной магнитного поля до 10 Тл и тёплым отверстием диаметром 100 мм.

Азимутальный и радиальный индексы рабочего режима гиротрона имеют высокие значения, что приводит к заметному влиянию конкуренции в сверхразмерном резонаторе с радиусом регулярной части 9,88 мм. Спектр мод (рабочей и пяти основных конкурентов, расположенных близко по частоте генерации и имеющих высокую связь с электронным пучком) для выбранной конфигурации приведен на рисунке 21.

Обеспечение генерации излучения на требуемой частоте требует правильного выбора радиуса встрела электронного пучка, при котором коэффициент связи рабочей моды будет больше, чем у конкурентов. Расчетные нормированные зависимости факторов связи как рабочей моды, так и соседних конкурентов представлены на рисунке 22. В доступном диапазоне, удовлетворяющем вышеописанным требованиям, выбрано значение 3,965 мм.

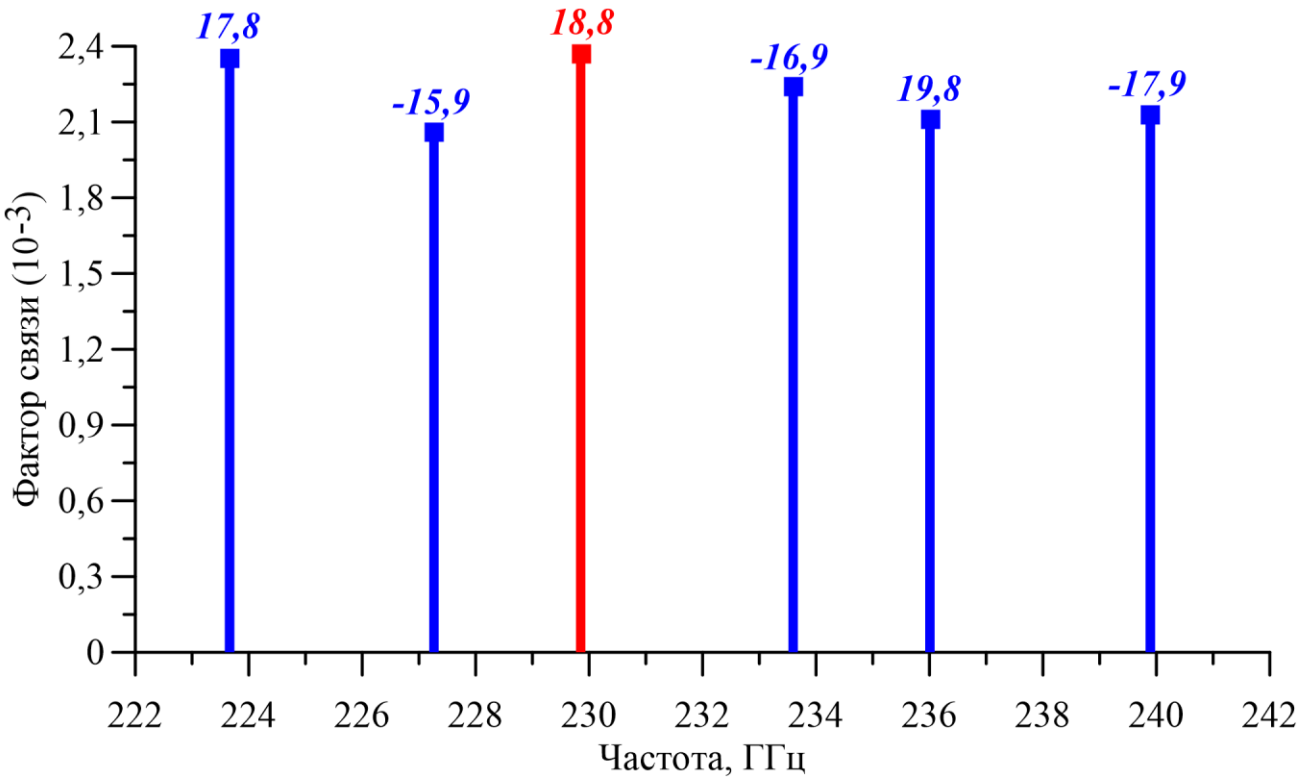


Рисунок 21. Спектр мод гиротрона-драйвера. Красным обозначена рабочая мода, синим – основные конкуренты, имеющие высокий фактор связи с электронным пучком.

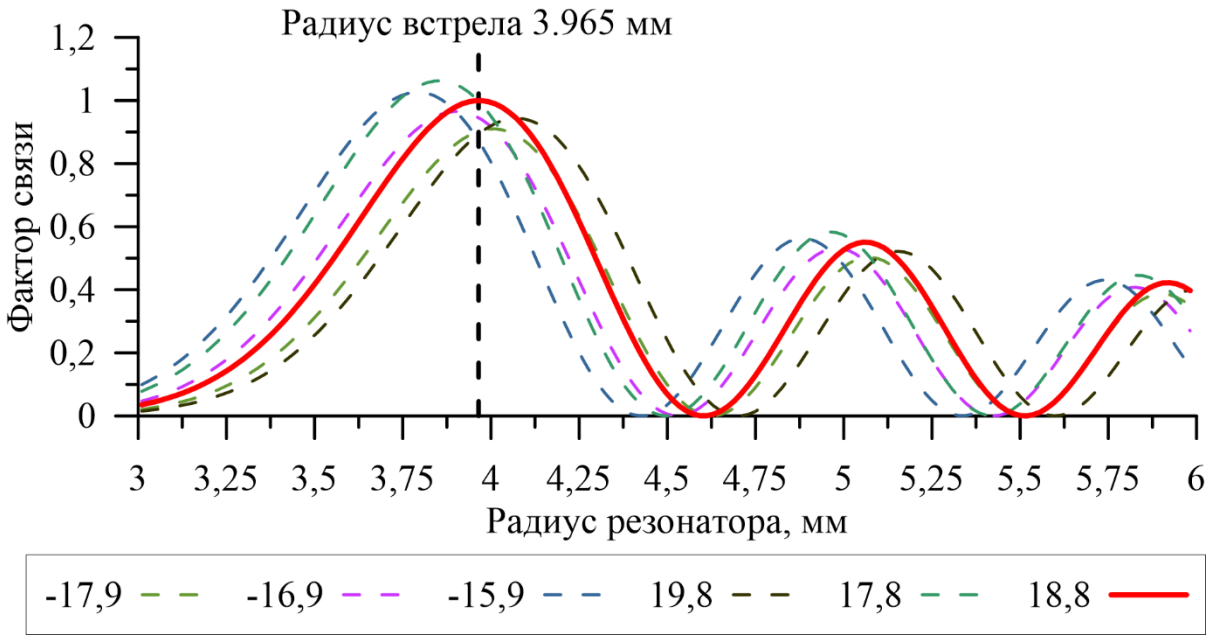


Рисунок 22. Нормированные значения фактора связи мод, учитываемых при расчетах электронно-волнового взаимодействия. Вертикальной пунктирной линией обозначен оптимальный радиус встрела 3.965 мм.

Имея необходимые параметры электронного пучка в резонаторной области, можно провести численные исследования МИП. Адиабатическая система формирования электронного пучка имеет триодную компоновку, что позволит более точно настраивать рабочие параметры, а также обеспечивает возможность быстрого управления напряжением на аноде для выполнения задач по стабилизации частоты, описанных ниже. Численное моделирование электронно-оптической системы было выполнено В. Н. Мануиловым в рамках модели, описанной в работе [92]. В таблице 1 приведена зависимость параметров МИП, таких как доля вращательной энергии, питч-фактор и разброс поперечных скоростей электронов, от токов электронного пучка в диапазоне от 0 до 20 А с шагом 2,5 А. Расчёты проводились с учетом величины ускоряющего напряжения 50 кВ в диодном режиме МИП.

Ток пучка, А	Доля вращательной энергии	Питч-фактор	Скоростной разброс
0.0	0.7056	1.5483	0.1821
2.5	0.6946	1.5080	0.1862
5.0	0.6821	1.4649	0.1909
7.5	0.6698	1.4242	0.1957
10.0	0.6587	1.3839	0.1969
12.5	0.6454	1.3492	0.1994
15.0	0.6334	1.3145	0.2075
17.5	0.6215	1.2815	0.2127
20.0	0.6099	1.2503	0.2141

Таблица 1. Результаты численного моделирования МИП (доля вращательной энергии, питч-фактор и разброс по скоростям электронов) для нескольких токов пучка в диапазоне от 0 до 20 А с шагом 2.5 А.

Также в рамках моноскоростной модели проведены численные расчеты питч-фактора и скоростного разброса в зависимости от ускоряющего напряжения (46–56

кВ) при работе МИП в диодном режиме (таблица 2) и в зависимости от анодного напряжения (0–3 кВ) при работе электронной пушки в триодном режиме с напряжением на катоде 50 кВ (таблица 3). В ходе данного теоретического исследования ток электронного пучка составлял 10 А.

Ускоряющее напряжение, кВ	Питч-фактор	Скоростной разброс
46	1.2148	0.0114
48	1.3044	0.0114
50	1.3986	0.0096
52	1.5186	0.0096
54	1.6551	0.0071
56	1.8447	0.0084

Таблица 2. Результаты численного моделирования МИП в диодном режиме (питч-фактор и величина разброса по поперечным скоростям электронов) для нескольких значений ускоряющего напряжения (от 46 до 56 кВ) при токе электронного пучка 10 А.

Анодное напряжение, кВ	Питч-фактор	Скоростной разброс
0	1.3986	0.0096
1	1.3069	0.0099
2	1.2263	0.0104
3	1.1566	0.0100

Таблица 3. Результаты численного моделирования МИП в триодном режиме (режиме (питч-фактор и величина разброса по поперечным скоростям электронов) для нескольких значений напряжения в области анода при токе электронного пучка 10 А.

На основе представленных результатов для оценки величины стартовых токов выбран электронный пучок с ускоряющим напряжением 50 кВ и питч-фактором 1,39. Расчеты величины и зависимости стартовых токов от магнитного поля для рассматриваемых мод резонатора в рамках модели с нефиксированной

структурой поля с разбросом по поперечным скоростям электронов на уровне ~30%, а также с учетом неоднородного распределения магнитного поля приведены на рисунке 23. Исследование демонстрирует, что рабочая мода $TE_{18,8}$ имеет необходимый диапазон магнитных полей, где её стартовый ток имеет меньший уровень, чем у ближайших конкурентов $TE_{-15,9}$ и $TE_{-16,9}$, а минимальное значение составляет ~ 1 А. Численное моделирование сценария включения гиротрона с учетом конкуренции мод, выполненное аналогично расчетам, представленным в главе 1, демонстрирует устойчивое возбуждение рабочей моды.

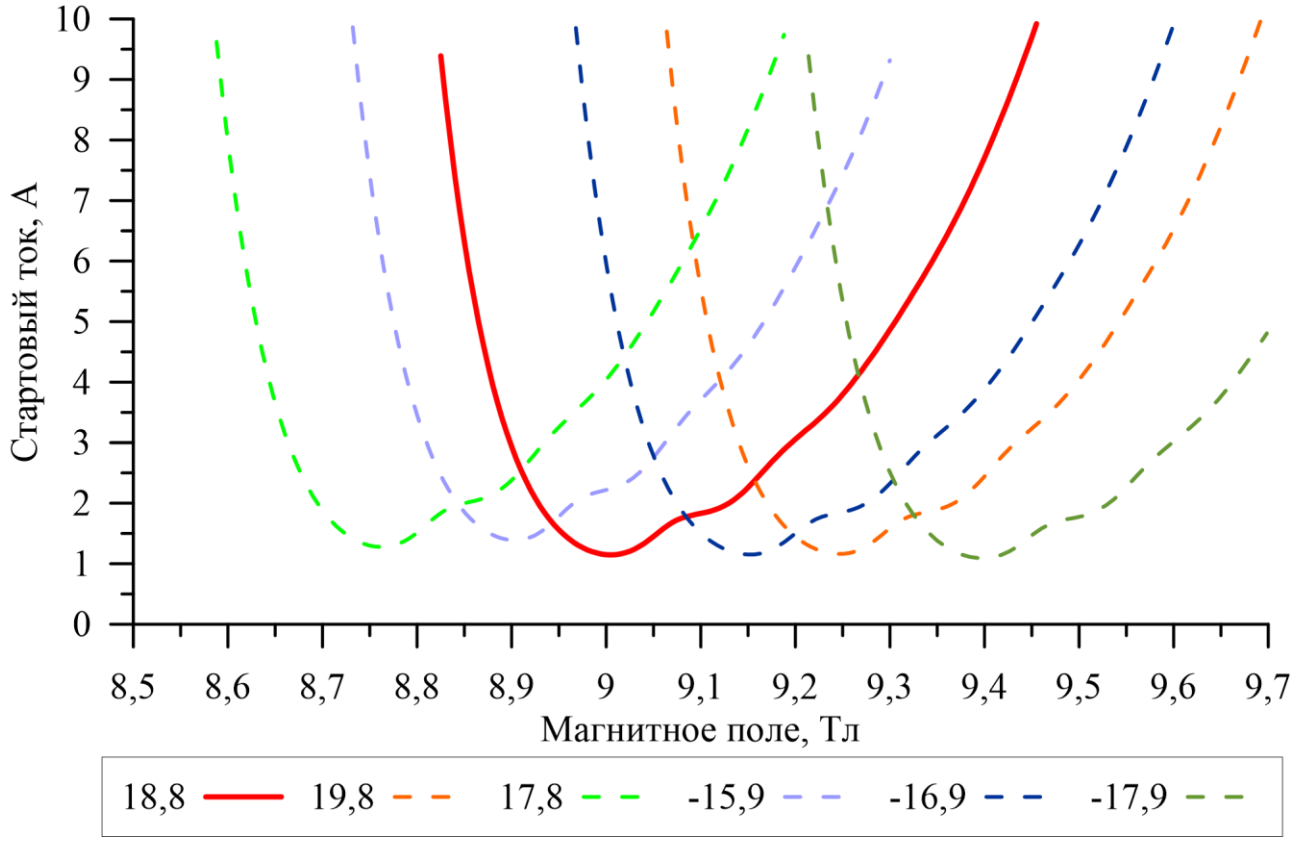


Рисунок 23. Кривые зависимостей стартовых токов от величины магнитного поля основного соленоида рабочей моды (сплошная красная линия) и ближайших мод конкурентов.

Далее, опираясь на вышеописанные характеристики МИП, в рамках стационарной модели гиротрона с нефиксированной структурой поля в резонаторе [93,94], построены зависимости мощности и частоты излучения от величины магнитного поля основного соленоида рабочей моды $TE_{18,8}$ для нескольких значений тока электронного пучка (рисунок 24) при ускоряющем напряжении 50 кВ

в диодном режиме работы МИП. Полученные характеристики демонстрируют, что ранее выбранные параметры пучка для исследования стартовых токов (10 А и 50 кВ в диодном режиме) обеспечивают требуемый уровень мощности генерации, а изменение тока пучка обеспечивает дополнительную возможность корректировки частоты и мощности излучения в ходе проведения экспериментального исследования по захвату частоты мегаваттного гиротрона. Так, изменение тока с 5 до 20 А при величине магнитного поля 8,8 Тл способствует изменению частоты генерации на ~130 МГц при изменении мощности на ~32 кВт.

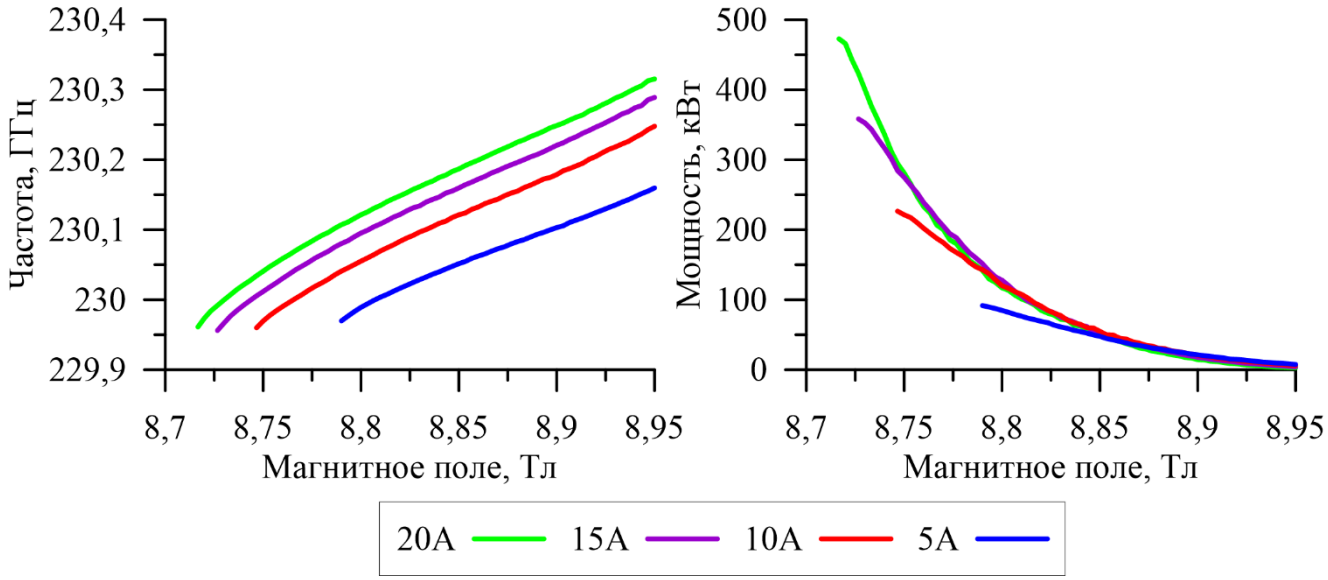


Рисунок 24. Зависимости частоты генерации (слева) и мощности излучения (справа) от величины магнитного поля для рабочей моды $TE_{18,8}$ для нескольких значений тока электронного пучка (5 А, 10 А, 15 А, 20 А) при ускоряющем напряжении 50 кВ в диодном режиме работы МИП.

В рамках той же модели было проведено теоретическое исследование зависимостей мощности и частоты генерации от величины магнитного поля для четырёх значений ускоряющего напряжения: 46, 48, 50 и 52 кВ (рисунок 25). Увеличение напряжения с 46 кВ до 52 кВ способствует увеличению максимальной мощности на ~60 кВт и перестройке частоты на ~54 МГц при магнитном поле 8,8 Тл.

Для решения задачи стабилизации частоты и управления режимами генерации использовалась система, работающая за счет быстрого изменения

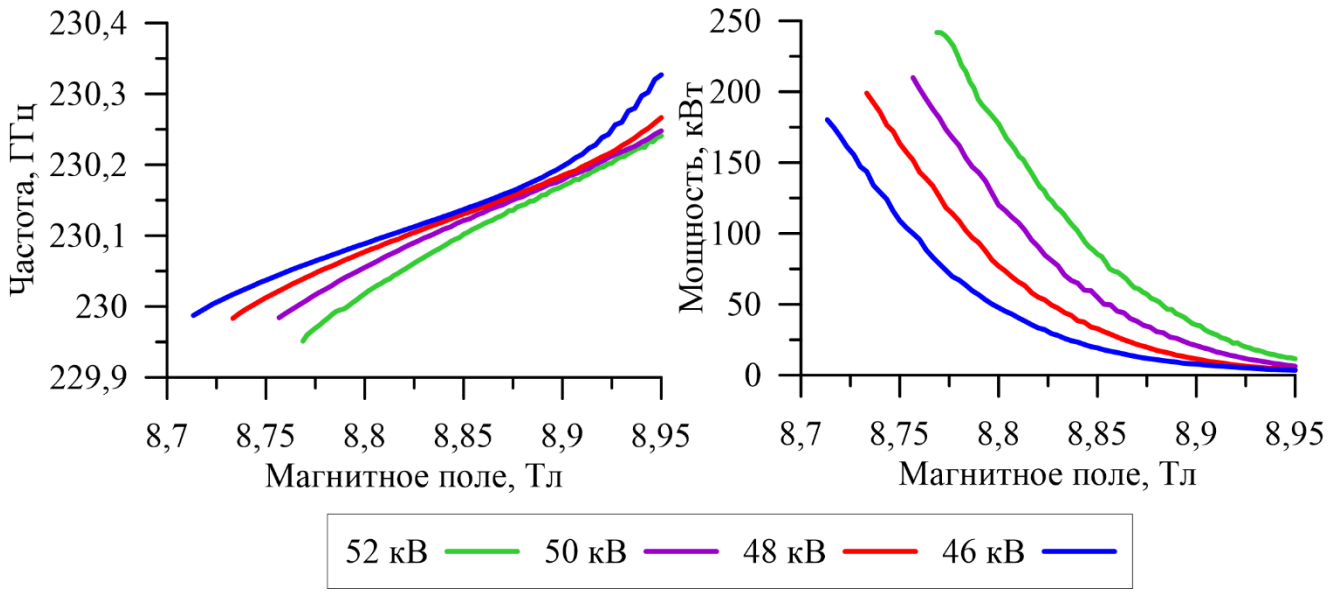


Рисунок 25. Зависимости частоты генерации (слева) и мощности излучения (справа) от величины магнитного поля для рабочей моды $TE_{18,8}$ для нескольких значений ускоряющего напряжения (46 кВ, 48 кВ, 50 кВ, 52 кВ) при токе пучка 10 А в диодном режиме работы МИП.

величины анодного напряжения (подробное описание приведено в разделе 2.2). Для определения требуемых технических характеристик при проектировании системы требуется провести оценку влияния анодного напряжения (при работе МИП в триодном режиме) на частоту и мощность генерации. Для этого, по аналогии с предыдущими результатами, были построены зависимости частоты и мощности излучения от величины магнитного поля для нескольких анодных напряжений (рисунок 26). Видно, что при изменении потенциала в анодной области мощность слабо меняется практически во всем диапазоне магнитных полей, однако зона срыва генерации смещается в область более высоких магнитных полей при увеличении анодного напряжения, что приводит к снижению максимальной выходной мощности СВЧ излучения.

В свою очередь, в таблице 4 представлены значения перестройки частоты в диапазоне 0–3 кВ с шагом 1 кВ для магнитных полей 8,8, 8,85 и 8,9 Тл. Из полученных данных следует, что чувствительность частоты к изменению анодного напряжения увеличивается с ростом магнитного поля (и уходом от режима с

максимальной мощностью генерации) и при уменьшении напряжения на аноде (выделено зелёным цветом).

Для более эффективной работы системы стабилизации необходимо проводить экспериментальные исследования в зонах с наибольшей чувствительностью частоты к изменению потенциала на аноде. Из полученных характеристик можно сделать вывод, что для этого необходимо использовать наименьшие значения напряжения (в связи с этим исследования при напряжениях более 3 кВ не проводились). При этом магнитное поле основного соленоида должно соответствовать области зоны генерации, удалённой от срыва и соответствующей меньшему уровню мощности. Это означает, что проектируемый гиротрон должен обладать запасом по максимальной выходной мощности генерации.

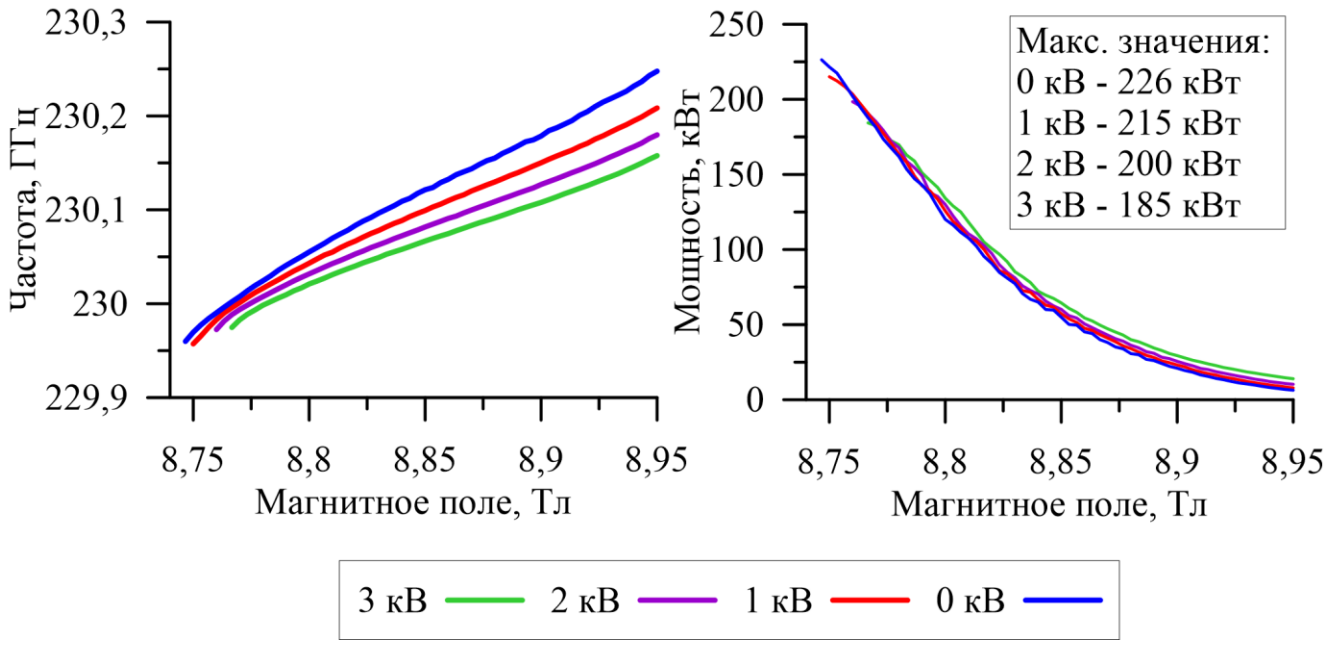


Рисунок 26. Зависимости частоты генерации от величины магнитного поля для нескольких значений потенциала на аноде (0 кВ, 1 кВ, 2 кВ, 3 кВ) при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка 10 А.

	8.8 Тл	8.85 Тл	8.9 Тл
0–1 кВ	12.0 МГц	22.3 МГц	28.4 МГц
1–2 кВ	11.5 МГц	17.4 МГц	23.3 МГц
2–3 кВ	10.7 МГц	15.0 МГц	19.0 МГц

Таблица 4. Значения перестройки частоты при изменении значения анодного напряжения для нескольких положений магнитного поля.

2.2 Экспериментальное исследование гиротрона-драйвера в режиме свободной генерации и в режиме с фазовой автоподстройкой частоты

Экспериментальное исследование гиротрона-драйвера проводилось на новом гиротронном стенде, расположенном в ИПФ РАН (рисунок 27).



Рисунок 27. Внешний вид стенда гиротрона-драйвера.

Гиротрон, созданный при сотрудничестве с компанией АО НПП «Гиком», выполнен в неразборном отпаянном корпусе из нержавеющей стали. Данная конструкция не предполагает использования внешней системы откачки до состояния глубокого вакуума, поэтому гиротрон оснащен встроенным электроразрядным насосом.

Основной соленоид, рабочий ток которого достигает 140,9 А, оснащен комплектным источником питания KJ-DSP, что позволяет создать в тёплом отверстии диаметром 100 мм магнитное поле, величина которого достигает 10 Тл.

В связи с ограничениями, связанными с возможностями системы охлаждения и электропитания как мегаваттного гиротрона, так и гиротрона-драйвера, режимы работы которых должны быть синхронизированы, в эксперименте был реализован только короткоимпульсный режим работы. Ускоряющая разность потенциалов электронного пучка формируется высоковольтным импульсным модулятором гиротронов М100/50/50, разработанным и изготовленным в ИПФ РАН [95]. Импульсы длительностью до 50 мкс с частотой повторения не более 5 Гц имеют максимальное выходное напряжение 100 кВ и ток 50 А, что позволяет достичь расчетных режимов генерации. Для измерения напряжения использован встроенный высоковольтный делитель с коэффициентом 1:2820. Оценка точности работы измерителя напряжения осуществлялась при помощи калиброванного делителя Northstar PVM-5. Измерение тока производилось при помощи катушки Роговского с чувствительностью 50 мВ/А.

Триодный режим работы МИП, в первую очередь необходимый для экспериментальных исследований в режимах со стабилизацией частоты генерации, требует создания стабильного потенциала на анодной части электронно-оптической системы. В роли высоковольтного источника питания анода выступал Spellman ST20-12, способный поддерживать ток до 600 мА при напряжении до 20 кВ. Пульсации выходного напряжения при заданных параметрах не превышают 0,1%.

Дополнительная подстройка параметров электронного пучка, таких как радиус встрела и питч-фактор, осуществлялась катодной катушкой.

Основные узлы гиротрона, такие как коллектор, анод, система вывода излучения и резонатор охлаждались проточной водой. Следует отметить, что охлаждение резонаторной области осуществлялось независимым контуром с высоким уровнем термостабилизации для исключения влияния колебаний температуры общей водяной системы на частоту генерации. Кроме того, управление температурой контура охлаждения резонатора позволяет осуществлять дополнительную независимую перестройку частоты генерации гиротрона за счет изменения его геометрических размеров из-за теплового расширения. Для

измерения мощности применялась система водяного калориметра, аналогичная описанной в главе 1.

В ходе экспериментального исследования гиротрона проведен ряд измерений максимальной выходной мощности и КПД при различных параметрах с целью поиска оптимального сочетания значений тока электронного пучка и напряжений на аноде и катоде.

Сначала была исследована зависимость от величины ускоряющего потенциала на катоде, представленная на рисунке 28. МИП работала в диодном режиме. Был рассмотрен ряд величин в диапазоне от 45 кВ до 55 кВ при двух разных значениях тока 10 и 15 А. На основе полученных данных можно сделать вывод, что при токе 10 А оптимальное значение напряжения составляет 50 кВ, которое соответствует мощности излучения 32 кВт при КПД 6,5%. Увеличение тока до 15 А способствует заметному росту мощности до 100 кВт и КПД 14% при ускоряющем напряжении 48 кВ.

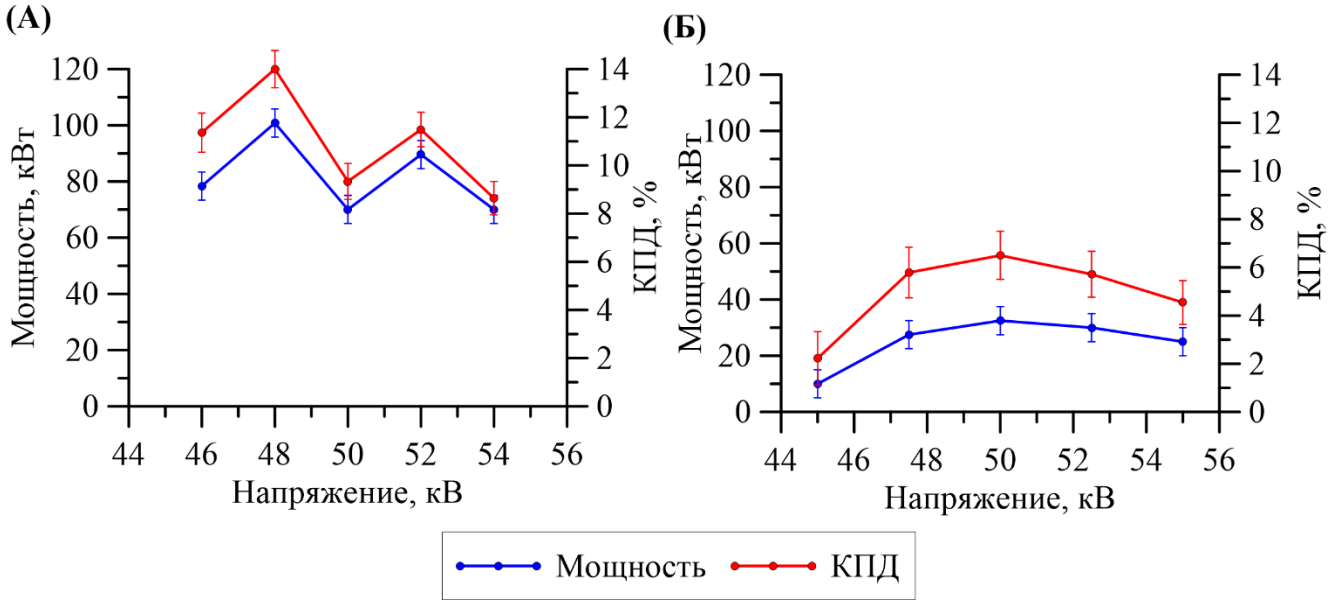


Рисунок 28. Зависимости максимальной мощности и КПД от величины ускоряющего напряжения. (А) – при токе пучка 15 А, (Б) – при токе пучка 10 А.

Далее проведена оценка зависимости выходной мощности от тока электронного пучка в диапазоне от 5 А до 20 А при ранее выбранных оптимальных значениях ускоряющего напряжения 48 кВ и 50 кВ и нулевом потенциале на аноде (диодный режим МИП) (рисунок 29). Наилучший результат (130 кВт и КПД 15%)

получен при напряжении 48 кВ и токе 18 А. Дальнейшее снижение уровня мощности при росте тока связано с ростом разброса скоростей электронов вследствие влияния пространственного заряда и уменьшением доли энергии, переданной электромагнитной волне. При напряжении 50 кВ точка, соответствующая максимальным значениям параметров выходного излучения (95 кВт и 9,5%), достигается при токе 20 А.

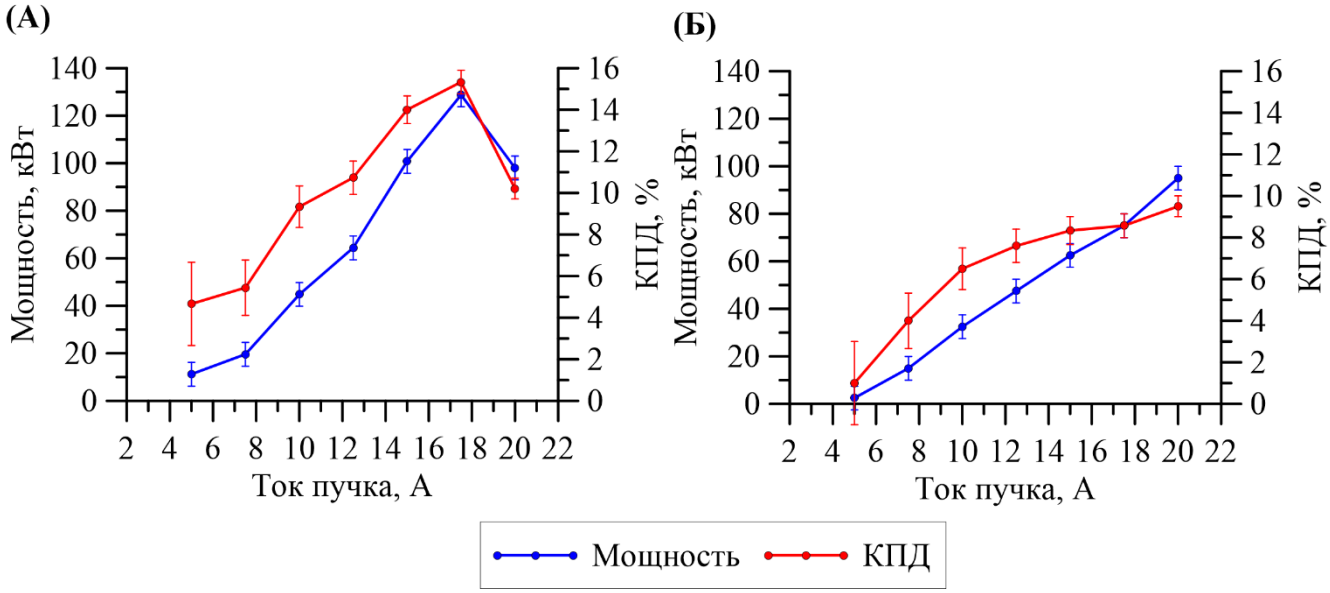


Рисунок 29. Зависимости максимальной мощности и КПД от значения тока электронного пучка. (А) – при ускоряющем напряжении 48 кВ, (Б) – при ускоряющем напряжении 50 кВ.

Далее были проведены исследования зависимости мощности и КПД генерации для нескольких значений анодного напряжения. Для этого были выбраны два набора значений тока и катодного напряжения, соответствующие оптимальному режиму, продемонстрированному на рисунке 28 (50 кВ, 10 А и 48 кВ, 15 А) и получены искомые зависимости, приведённые на рисунке 30. Полученные зависимости демонстрируют, что увеличение напряжения на аноде приводит к снижению уровня выходной мощности во всех исследуемых режимах. Это хорошо согласуется с теоретическими оценками, приведенными на рисунке 26. Это связано со снижением напряженности электрического поля в области электронно-оптической системы, что приводит к уменьшению питч-фактора и, как следствие, уменьшению эффективности электронно-волнового взаимодействия.

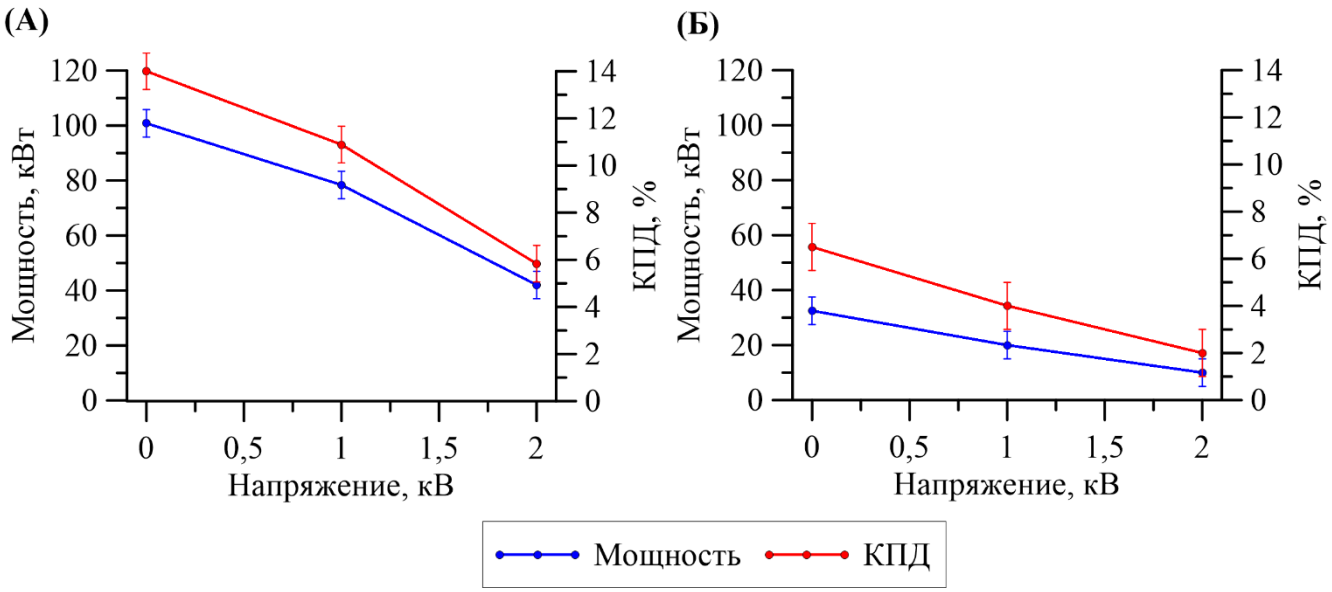


Рисунок 30. Зависимости максимальной мощности и КПД от величины анодного напряжения. (А) – при ускоряющем напряжении 48 кВ и токе 15 А, (Б) – при ускоряющем напряжении 50 кВ и токе 10 А.

Сравнивая полученные в эксперименте результаты с результатами численного моделирования, стоит отметить, что полученные характеристики заметно отличаются от расчетных: при напряжении 50 кВ и токе пучка 10 А экспериментально полученная выходная мощность ниже расчётной на 85%. Такой эффект может быть связан с возникновением конусообразной формы однородного участка резонатора при производстве, что, в свою очередь, приводит к уменьшению его добротности и резкому падению КПД генерации [96]. Данное предположение также подтверждается и последующим исследованием частотных характеристик, показавшим практически двукратное превышение чувствительности частоты генерации к техническим параметрам по сравнению с результатами моделирования. Однако для проведения работ по захвату частоты требуется мощность синхронизирующего сигнала до 100 кВт (~10% от мощности мегаваттного гиротрона). Это значение было получено при ускоряющем напряжении 48 кВ и токе пучка 15 А в диодном режиме МИП.

При этом, помимо мощностных характеристик, важно, чтобы частоты генерации драйвера и мегаваттного гиротрона были близки. И в данном случае, несмотря на низкую эффективность генерации излучения, частота излучения

гиротрона-драйвера на рабочей моде $TE_{18,8}$ составила 230,16 ГГц с шириной спектра, не превышающей 3 МГц в режиме без стабилизации частоты (рисунок 31), в то время как частота мегаваттного гиротрона, представленная на рисунке 15, равна 230,1 ГГц. Исходя из этого, было принято решение продолжить работу с данным гиротроном.

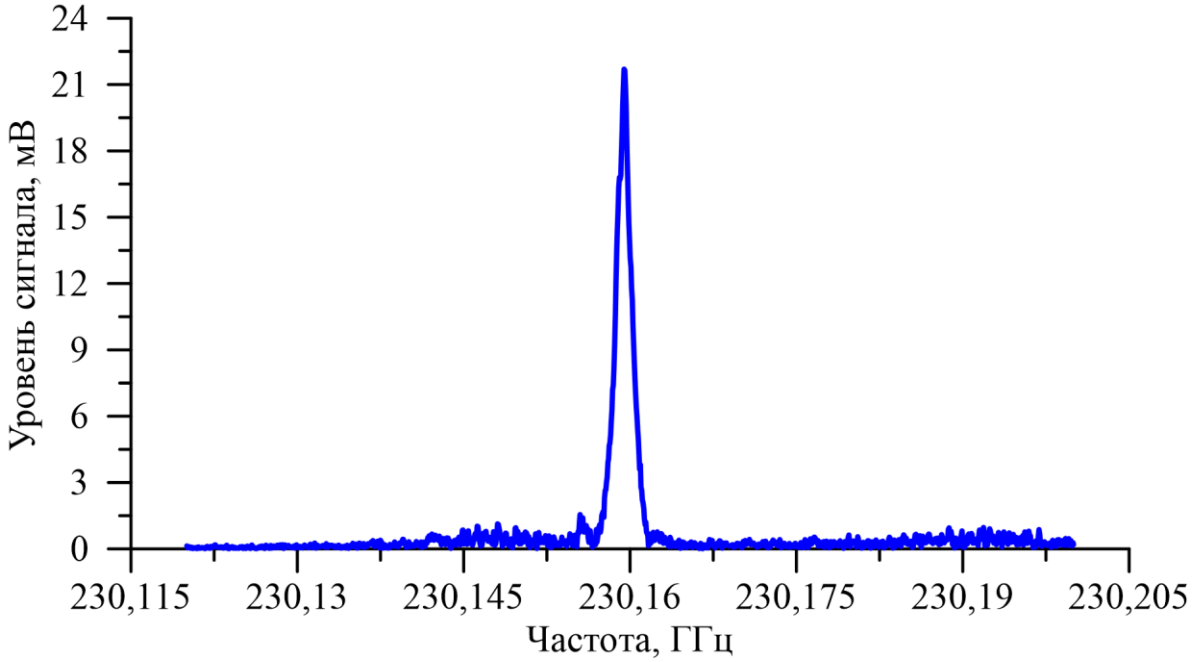


Рисунок 31. Спектр излучения рабочей моды $TE_{18,8}$ гиротрона-драйвера. Центральная частота составляет 230.16 ГГц.

Использование данного гиротрона как источника синхронизирующего излучения для экспериментального исследования режимов с захватом частоты подразумевает возможность выбора не только требуемой мощности, но и взаимного соотношения частот обоих гиротронов. Так как для приложений интересен захват частоты мегаваттного гиротрона при параметрах, соответствующих генерации с максимальной мощностью и КПД, невозможно организовать перестройку частоты при сохранении уровня мощности (за исключением вариации температуры охлаждающей жидкости резонаторной области, диапазона которой зачастую недостаточно для успешного проведения эксперимента). В свою очередь, гиротрон-драйвер обладает возможностью перестройки частоты при сохранении уровня мощности за счет выбора различных комбинаций параметров, таких как ток пучка, температура контура охлаждения резонатора и величина напряжения на катоде и

аноде (экспериментально это было продемонстрировано на менее мощном гиротроне с рабочей частотой 263 ГГц [А8]). На рисунке 32 построены зоны генерации, описывающие зависимость частоты излучения от величины магнитного поля основного соленоида при различных значениях параметров гиротрона.

Изменение таких величин, как ускоряющее напряжение и ток электронов (рисунок 32(А,Б)), позволяет оказать существенное влияние на частоту генерации (~260 МГц при изменении тока с 10 А до 20 А и ~80 МГц при увеличении потенциала с 48 кВ до 52 кВ). Однако изменение этих параметров приводит к существенному изменению мощности генерации, что противоречит поставленной задаче.

Наиболее удобный способ заключается в изменении температуры охлаждающей жидкости резонатора [А8], так как это оказывает влияние на его радиус и, как следствие, на частоту излучения. При этом мощность сохраняется неизменной. Применяемый в данном эксперименте чиллер S&A CW-6000 позволяет работать в диапазоне температур от 15°C до 35°C, что, согласно рисунку 32(В), способствует перестройке на 70 МГц.

Быстрое управление частотой генерации для функционирования системы стабилизации частоты реализуется за счет изменения напряжения на аноде МИП. Экспериментально полученные зоны генерации при разных анодных напряжениях, представленные на рисунке 32(Г), качественно сходятся с теоретическими оценками.

Следующий этап эксперимента заключается в исследовании работы гиротрона-драйвера в режиме со стабилизацией частоты. Нестабильность частоты излучения является следствием флуктуации выходного напряжения источников питания гиротрона, в первую очередь источника ускоряющего потенциала [97]. Колебания амплитуды на выходе у применяемого в данном эксперименте высоковольтного модулятора М100/50/50 в диапазоне напряжений 40–100 кВ не превышают 1%.

Механизм стабилизации частоты основан на подстройке частоты излучения к частоте опорного сигнала от маломощного генератора путем применения цепи с

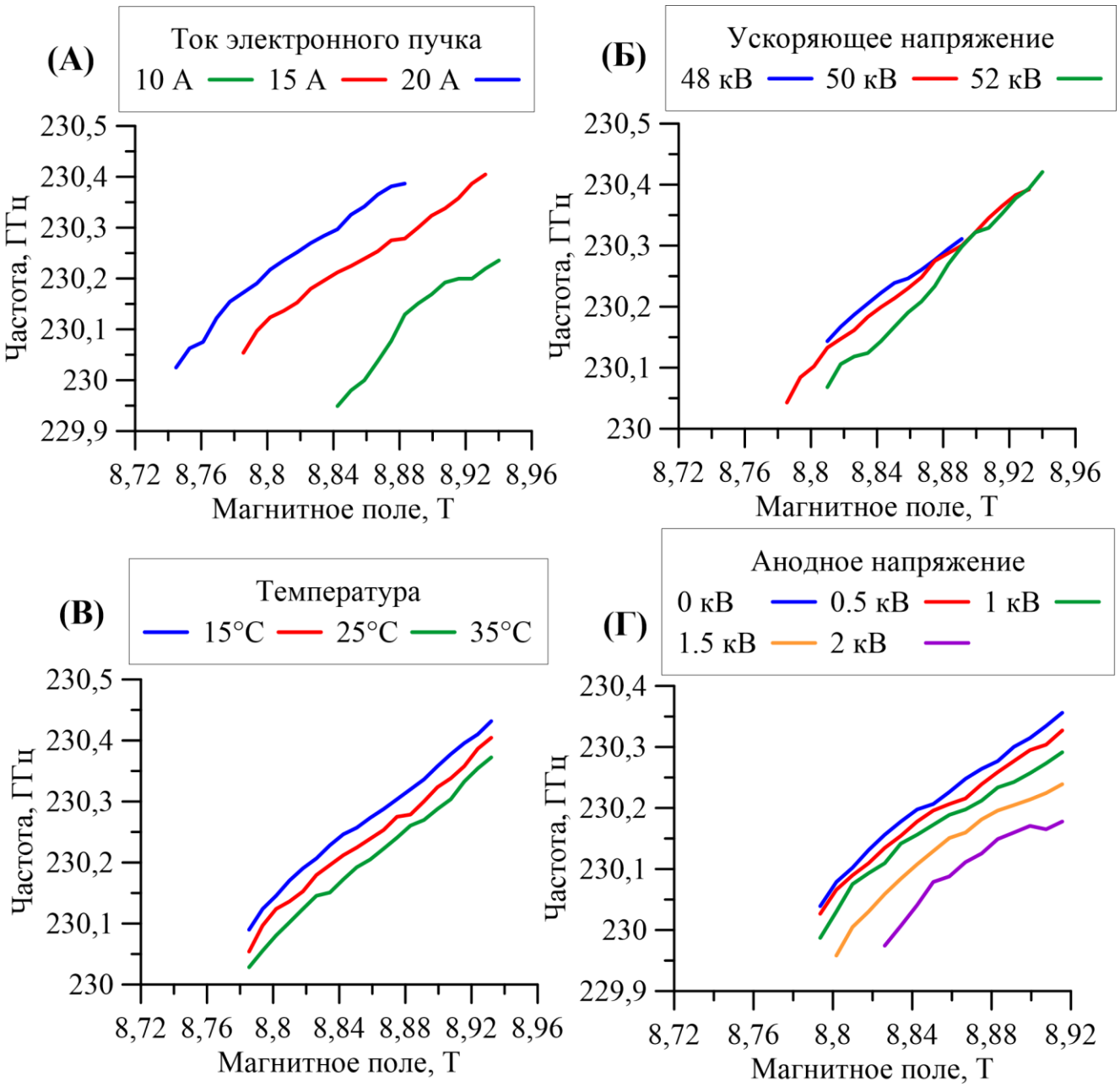


Рисунок 32. Зависимости частоты от величины магнитного поля основного соленоида при различных значениях параметров гиротрона. (А) – при токах пучка 10 А, 15 А, 20 А, ускоряющем напряжении 50 кВ, температуре резонатора 25°С в диодном режиме МИП; (Б) – при ускоряющем напряжении 48 кВ, 50 кВ, 52 кВ, токе пучка 15А и температуре резонатора 25°С в диодном режиме МИП; (В) – температурах резонатора 15°С, 25°С, 35°С, ускоряющем напряжении 50 кВ и токе пучка 15 А в диодном режиме МИП; (Г) – при анодном напряжении 0-2 кВ с шагом 0.5 кВ, ускоряющем напряжении 50 кВ, токе пучка 15 А и температуре резонатора 25°С.

обратной связью, управляемой сигналом с частотно-фазового детектора. Схемы подобного типа называются фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) [98]. На рисунке 33 приведен вариант, использованный в ходе данного экспериментального исследования. Ответвлённый от волнового пучка гиротрона сигнал малого уровня мощности поступал на гармонический смеситель АО «НИИПП» СМ-01.5, работающий в паре с диплексером ДПЛ-612. Здесь он смешивался с 18-й гармоникой сигнала гетеродина $F_{гет}$ с характерной частотой 12,78 ГГц, поступающего от генератора аналоговых сигналов Keysight E8257D. Полученные колебания на промежуточной частоте $F_{пч}$, равной 360 МГц, поступают на вход синхронизатора, имеющего в составе частотно-фазовый детектор, где, в ходе сравнения с опорным сигналом $F_{опорн}$ от высокочастотного генератора Г4-151, формировался сигнал ошибки $F_{ошибки}$. Одновременно с этим сигнал на промежуточной частоте поступал на вход осциллографа Keysight MXR204A, где путем быстрого преобразования Фурье определялся спектр промежуточной частоты. В свою очередь, сигнал ошибки в диапазоне 0–10 В поступал в качестве управляющего сигнала на блок управления анодным напряжением. На основе этого сигнала он модулировал подаваемое на анод высокое напряжение от источника Spellman ST20-12 с амплитудой до 800 В и частотой до 500 кГц при помощи встроенного высоковольтного импульсного тетрода ГМИ-83В. Получение максимальной амплитуды модуляции напряжения производилось путем настройки рабочей точки тетрода за счет уменьшения балластного сопротивления в цепи питания анода R_a до 5 кОм и увеличения тока в этой цепи с учетом ограничения мощности, выделяемой на тетроде и сопротивлении. Такое уменьшение сопротивления обеспечивало и увеличение быстродействия системы за счет снижения характерного времени $\tau \sim R_a C$, где C определяется ёмкостью анода гиротрона и не может изменяться в ходе эксперимента.

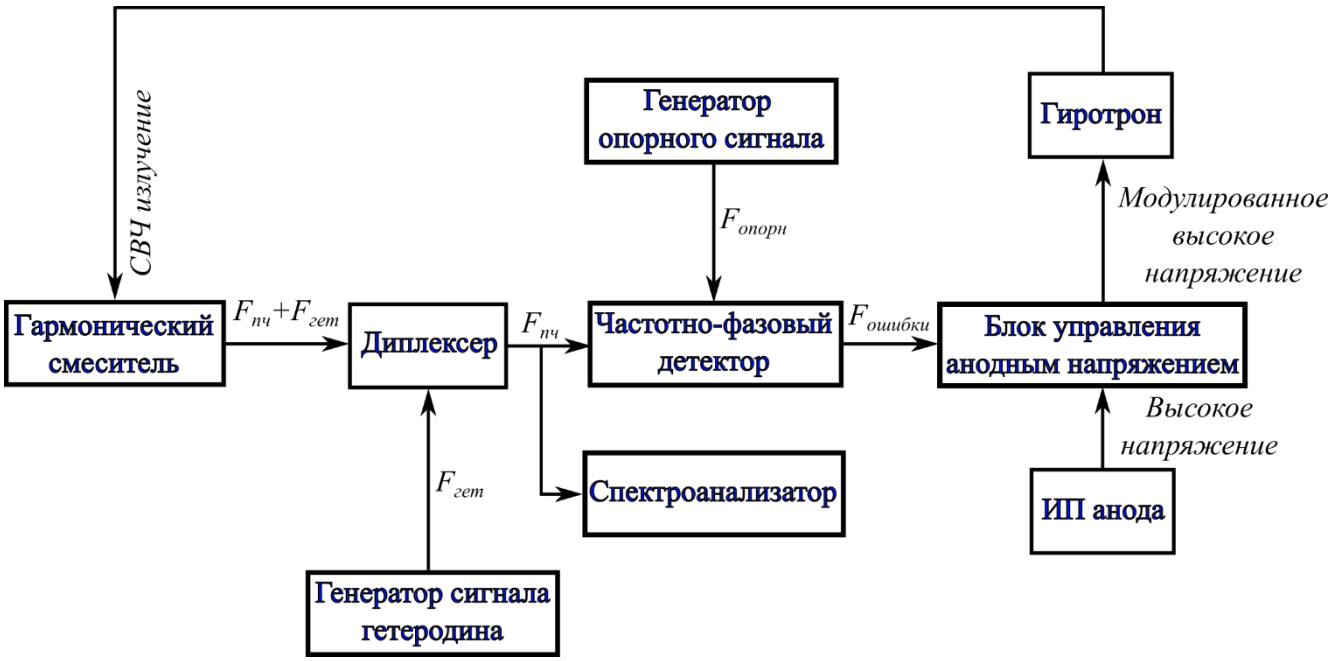


Рисунок 33. Блок схема системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Следует отметить, что стабилизация частоты возможна только в определенном диапазоне, определяемом частотой опорного сигнала, чувствительностью частоты гиротрона к изменению анодного напряжения и параметрами цепи с обратной связи системы ФАПЧ. На осциллограмме, приведенной на рисунке 34, изображены импульс ускоряющего напряжения (красная линия) длительностью 50 мкс, форма управляющего сигнала (синяя линия) и форма анодного напряжения (зелёная линия). График демонстрирует, что величина анодного напряжения качественно соответствует форме управляющего сигнала. Время срабатывания системы ФАПЧ составляло 10 мкс. В течение первых 20 мкс в ходе нарастания ускоряющего напряжения частота излучения гиротрона проходит через зону срабатывания ФАПЧ, чему соответствует первый максимум управляющего сигнала. Далее в течение последующих 10 мкс происходит установление значения ускоряющего напряжения, после чего частота снова попадает в диапазон срабатывания системы и не покидает его до окончания импульса. Таким образом, общая продолжительность работы со стабилизированным излучением составляет 20 мкс.

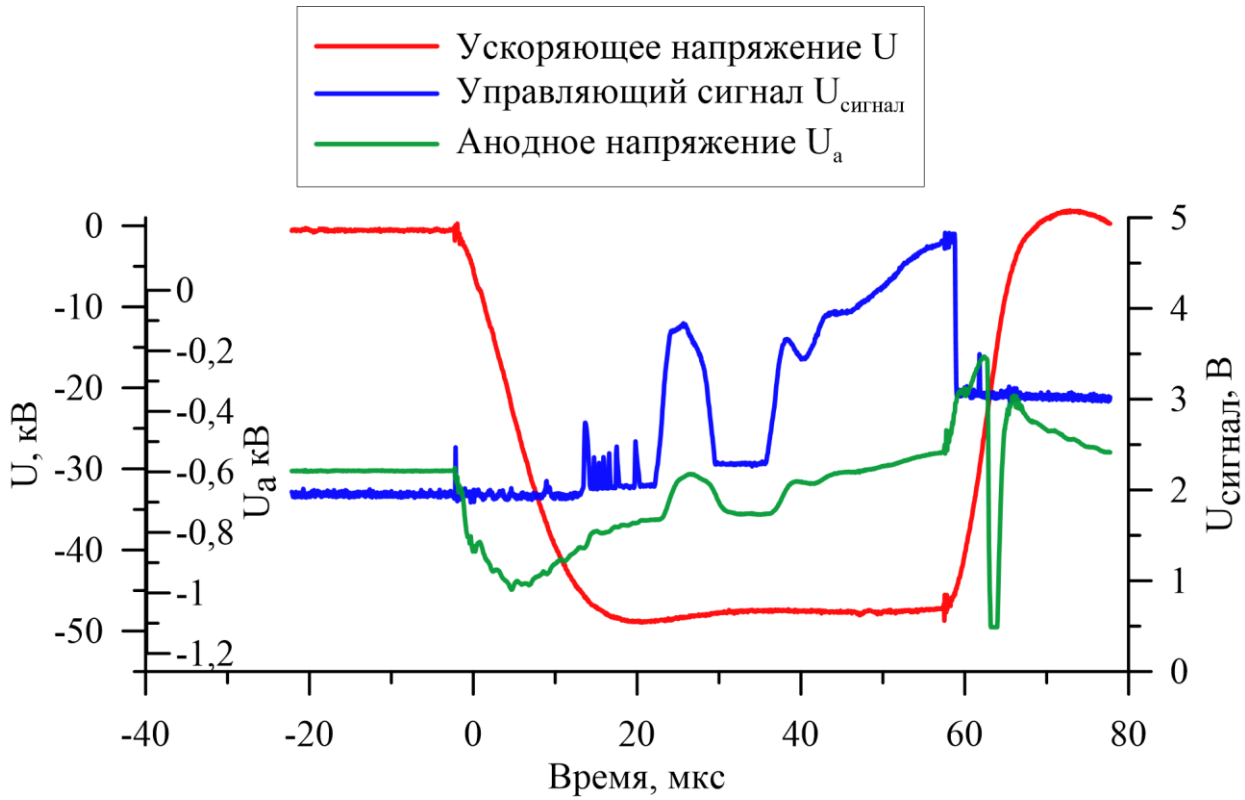


Рисунок 34. Осциллограмма ускоряющего напряжения (красный), управляющего сигнала, соответствующего сигналу ошибки от частотно фазового детектора (синий) и анодного напряжения (зелёный).

Спектры излучения как в случае свободной генерации (красная линия), так и в стабилизированном режиме (синяя линия) представлены на рисунке 35. Ширина стабилизированного сигнала составляет 180 кГц. Она ограничена его продолжительностью и возможностями системы стабилизации. Тем не менее наблюдается сильное сужение ширины спектра по сравнению со свободной генерацией с шириной около 1 МГц.

Для последующего создания линии транспортировки излучения от гиротрона-драйвера к мегаваттному гиротрону были проведены измерения поперечного распределения электромагнитного поля волнового пучка по схеме, описанной в главе 1. Полученные экспериментальные результаты, а также результаты реконструкции распределения поля и фазы приведены на рисунке 36. Согласно результатам, содержание гауссовой компоненты в распределении поля выходного пучка составило 96,9%.

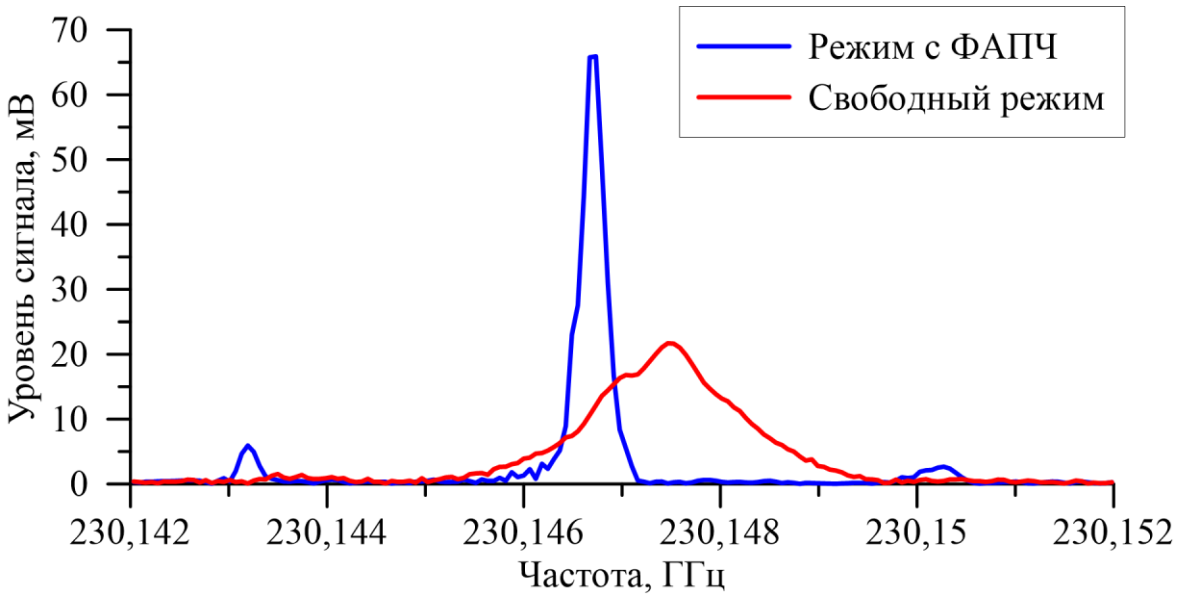


Рисунок 35. Спектры излучения гиротрона-драйвера в свободном режиме генерации (красный) и в режиме стабилизации частоты (синий).

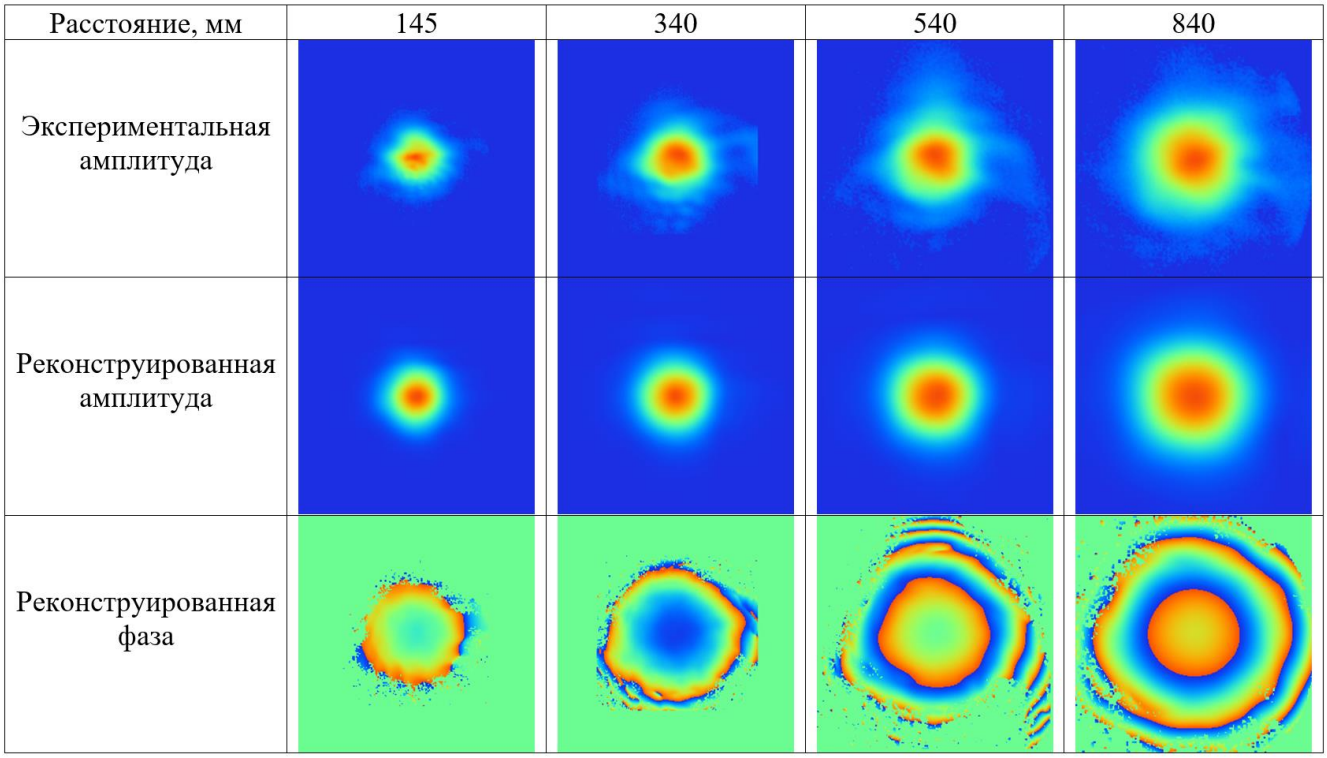


Рисунок 36. Измеренные распределения амплитуды поля (верхний ряд), реконструированные распределения амплитуды (средний ряд) и реконструированная фаза (нижний ряд) волнового пучка гиротрона в нескольких сечениях вдоль оси распространения. Апертура 160×160 мм

Заключение к главе 2

Представлены результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия, в особенности частотных характеристик гиротрона, описаны ключевые узлы гиротрона и продемонстрированы результаты экспериментального исследования гиротрона-драйвера в свободном режиме генерации, а также в режиме стабилизации частоты.

В п.2.1 приведены результаты численного моделирования электронно-оптической системы и электронно-волнового взаимодействия в гиротроне-драйвере с частотой излучения 230 ГГц. Определены рабочая мода и геометрические размеры резонатора. Приведены результаты численных расчетов триодной адиабатической МИП, определен радиус встрела. Выполнено моделирование стартовых токов рабочей мод и ближайших конкурентов. Особое внимание уделено результатам расчетов зависимостей мощности и частоты излучения от технических параметров гиротрона, таких как ускоряющее напряжение, ток электронного пучка и анодное напряжение.

В п 2.2. приведены результаты экспериментального исследования гиротрона-драйвера. Сначала в режиме свободной генерации получены зависимости максимальной выходной мощности от тока электронного пучка, ускоряющего и анодного напряжений. Максимальная мощность составила 130 кВт при 15% КПД. Частота излучения составила 230,16 ГГц. Далее проведено экспериментальное исследование гиротрона в режиме со стабилизацией частоты при использовании системы ФАПЧ. Удалось добиться сужения ширины спектра излучения (с 1 МГц до 180 кГц) на участке импульса длительностью 20 мкс. Так же исследовано содержание гауссовой составляющей в выходном волновом пучке, равное 96,9%.

Глава 3. Экспериментальное исследование режимов генерации гиротрона 230 ГГц/1 МВт под воздействием внешнего сигнала

Целью работ, описанных в данной главе, является объединение гиротронных комплексов, представленных в предыдущих главах, для исследования режимов генерации мегаваттного гиротрона под воздействием внешнего сигнала от частотно-стабилизированного источника. Мощность внешнего сигнала составляет до 5% от мощности мегаваттного гиротрона. При помощи численного моделирования исследованы конкуренция мод в процессе включения в присутствии внешнего сигнала и зависимости ширины зоны захвата от мощности сигнала. Исследовано влияние изменения режимов генерации на эффективность последующей рекуперации остаточной энергии электронного пучка. В эксперименте продемонстрированы режимы захвата мегаваттного гиротрона как в свободном режиме генерации драйвера, так и в стабилизированном системой ФАПЧ. Также проведено исследование биений, наблюдающихся вне зоны захвата [А9].

3.1. Моделирование электронно-волнового взаимодействия в мегаваттном гиротроне под воздействием внешнего сигнала

Для исследования режимов генерации и сценариев включения гиротрона использовалась та же модель, что и в главе 1. Предполагается, что внешний монохроматический сигнал имеет такую же поперечную структуру, что и рабочая мода мегаваттного гиротрона. Для численного моделирования мощность внешнего сигнала не превышала 50 кВт, что соответствует экспериментально полученной мощности гиротрона-драйвера в режиме стабилизации частоты при помощи ФАПЧ. Для определения оптимальной частоты внешнего сигнала, обеспечивающей

максимальную выходную мощность в режиме захвата, были выполнены расчеты нескольких зон генерации при разных частотах сигнала.

На рисунке 37 приведена полученная зона захвата генерации внешним сигналом с частотой 229,985 ГГц, соответствующая максимальной выходной мощности. В режиме захвата частоты выходная мощность гиротрона может быть увеличена с 980 кВт до 1115 кВт, а КПД увеличен с 30,6% до 33,3%. В случае рассматриваемого мегаваттного гиротрона воздействие внешнего сигнала позволяет продвинуться в область меньших магнитных полей (и большей расстройки циклотронного синхронизма) за счёт увеличения ВЧ поля в резонаторе, что способствует лучшей группировке электронов и увеличению отбора энергии.

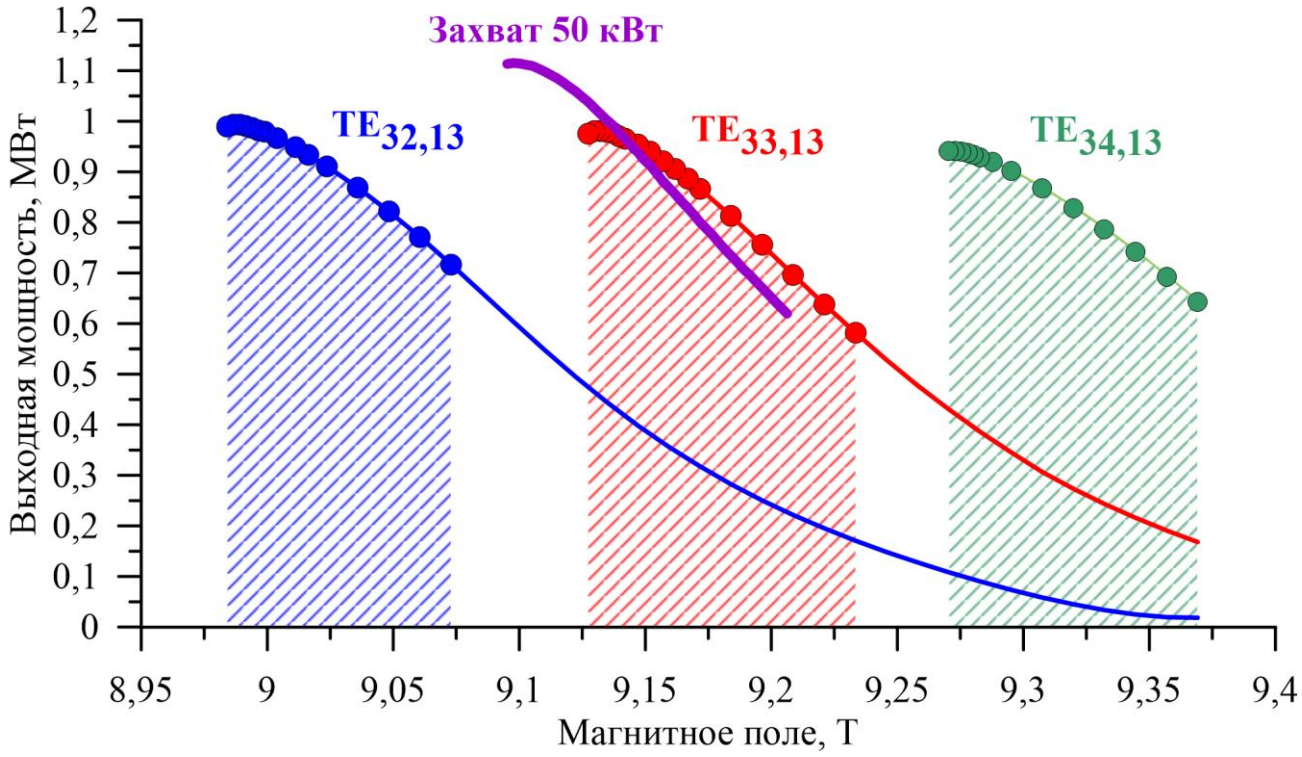


Рисунок 37. Расчетные зоны генерации рабочей моды $TE_{33,13}$ в свободном режиме (красный) и в режиме захвата сигналом мощностью 50 кВт (фиолетовый), а также мод конкурентов (синим и зеленым) при токе пучка 40 А и ускоряющем напряжении 80 кВ.

Также была исследована зависимость ширины зоны захвата от магнитного поля и мощности внешнего сигнала. На рисунке 38 приведены границы зон захвата в области высоких КПД гиротрона на плоскости магнитное поле – частота

внешнего сигнала для мощностей внешнего сигнала 20 и 50 кВт. Отдельной линией показана зависимость частоты генерации от магнитного поля для гиротрона без внешнего сигнала.

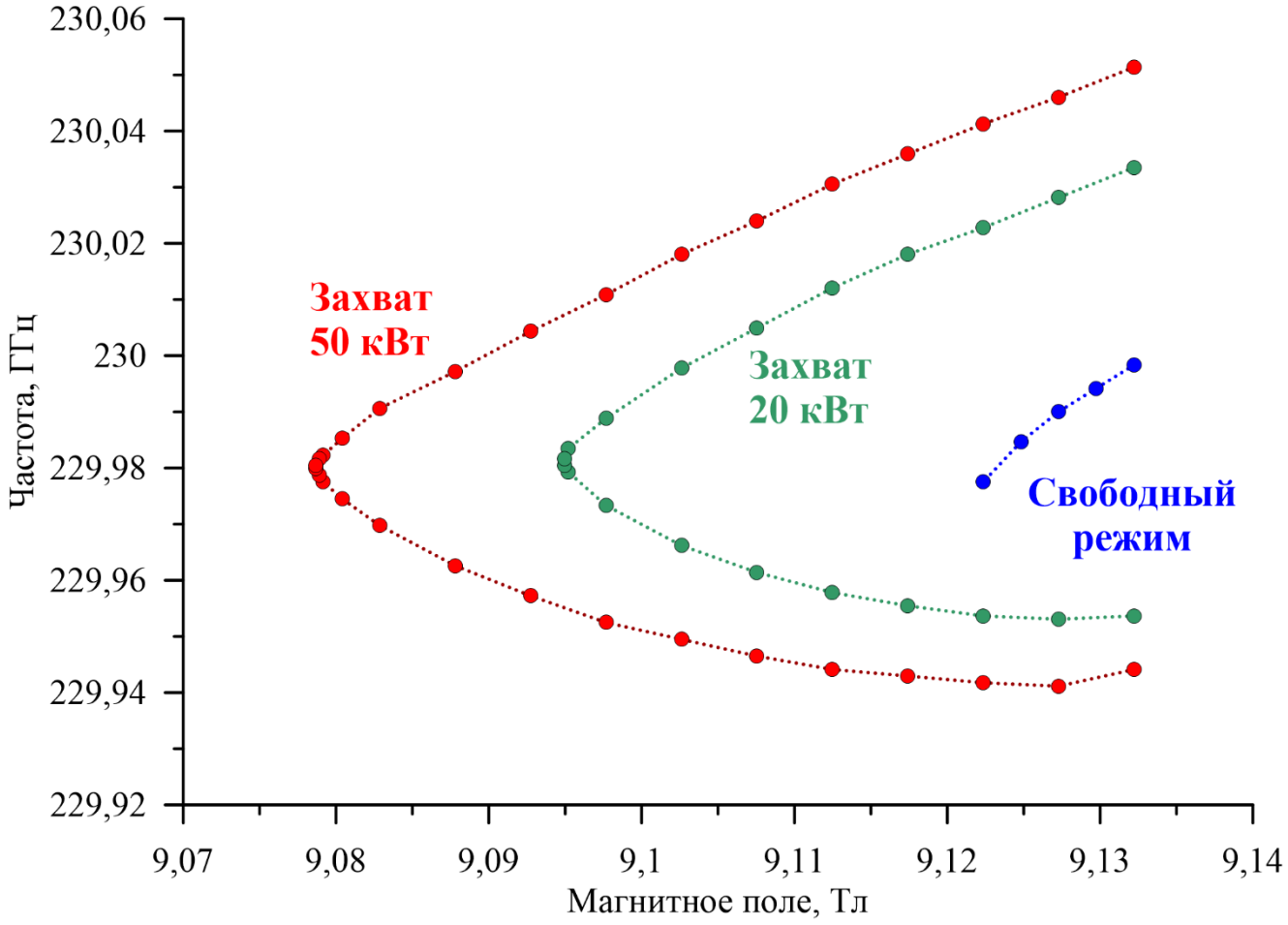


Рисунок 38. Границы зон захвата при мощности внешнего сигнала 50 кВт (красная линия), 20 кВт (зелёная линия) и зависимость частоты генерации от величины магнитного поля в режиме свободной генерации

Сравнение сценариев включения гиротрона без и с воздействием внешнего сигнала при величине магнитного поля 9,08 Тл (соответствующего максимальной мощности в режиме захвата) показано на рисунке 39. В данном моделировании увеличение ускоряющего напряжения с 30 кВ до 80 кВ продолжается до величины 40 000 в безразмерных единицах времени. Без внешнего сигнала система приходит к многомодовому режиму генерации (рисунок 39(А)), в то время как под воздействием внешнего сигнала (рисунок 39(Б)) происходит установление одномодовых колебаний $TE_{33,13}$. Захват частоты позволяет подавить возбуждение

мод-конкурентов на фронте импульса ускоряющего напряжения. Биения амплитуды рабочей моды в процессе включения определяются отличием мгновенной частоты генерации моды с изменяющейся продольной структурой поля от частоты внешнего сигнала. При достижении определенного напряжения, соответствующего попаданию мгновенной частоты в зону захвата, происходит установление стабильной одномодовой генерации.

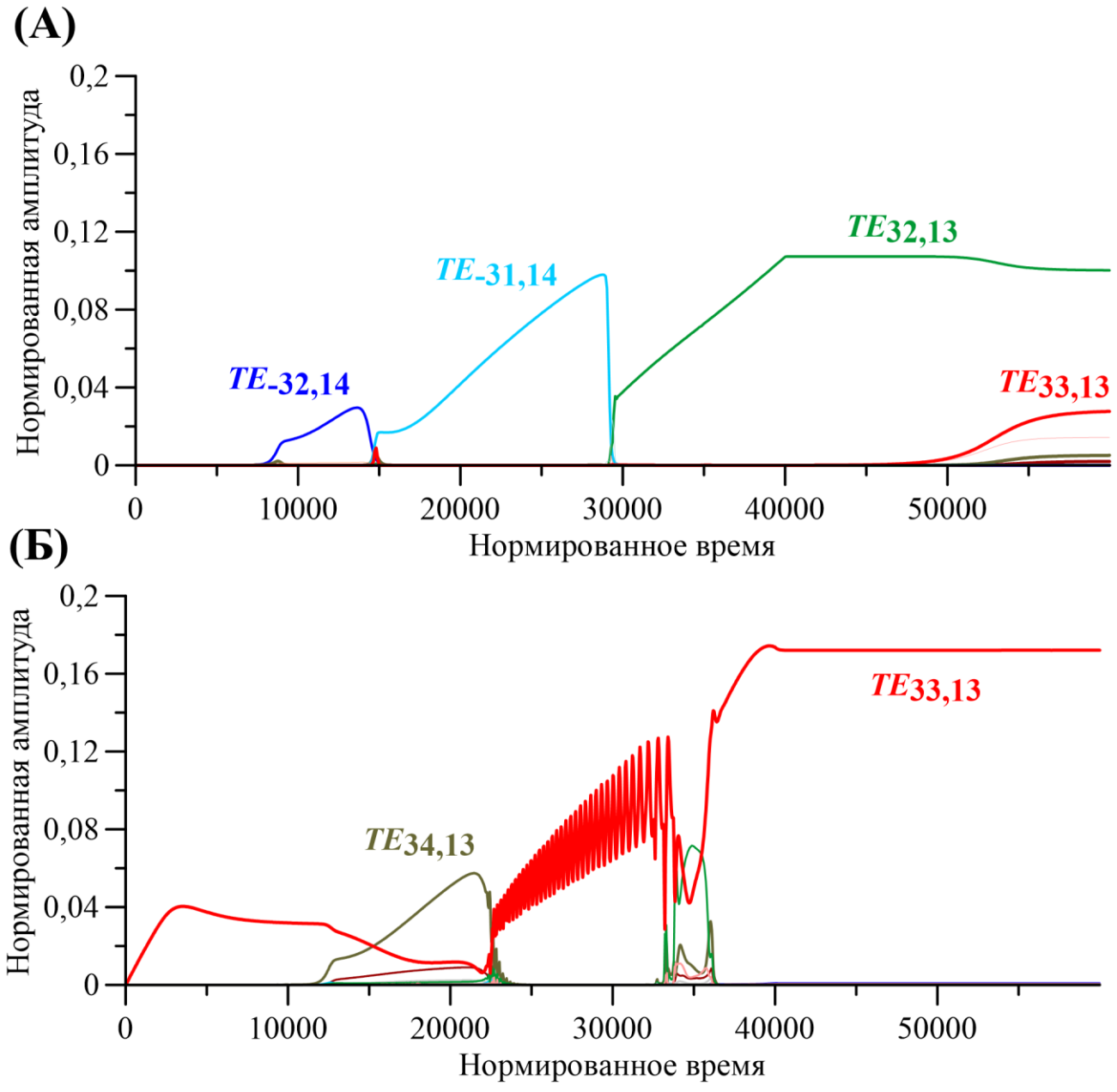


Рисунок 39. Кривые зависимости нормированных амплитуд рабочей и конкурирующих мод от нормированного времени (сценарии включения). (А) – в режиме свободной генерации, (Б) – в режиме захвата.

Здесь следует отметить, что все современные длинноимпульсные модели гиротронов оснащены системой рекуперации остаточной энергии электронов. Поэтому в рамках вышеупомянутой нестационарной модели с нефиксированной структурой поля также были проведены расчеты одноступенчатой рекуперации в режиме с максимальной выходной мощностью. Расчетные спектры остаточной после электронно-волнового взаимодействия энергии представлены на рисунке 40.

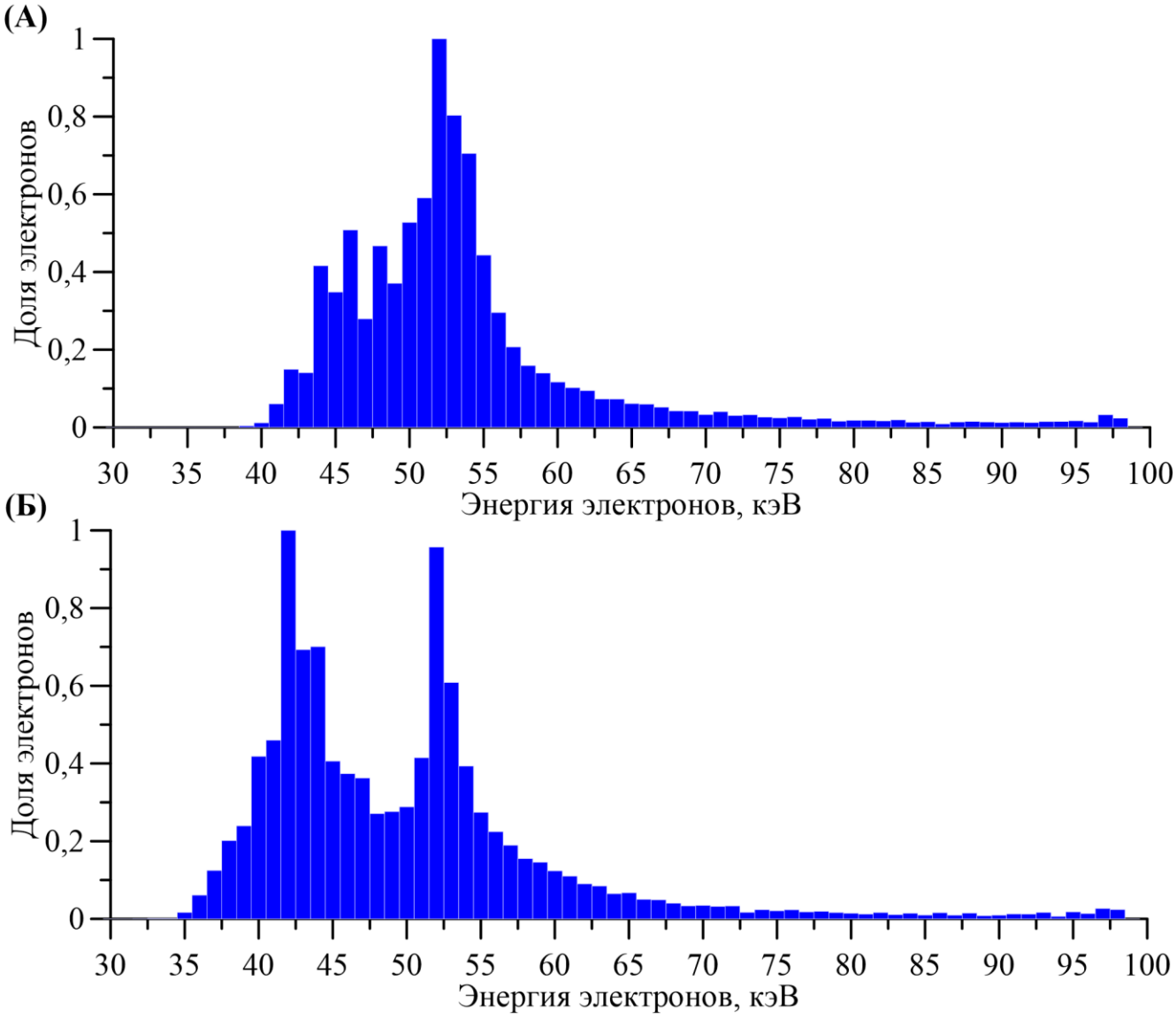


Рисунок 40. Нормированные диаграммы распределения остаточной энергии электронов в конце области взаимодействия МВт гиротрона 230 ГГц. (А) – распределение в режиме свободной генерации, минимальная энергия 35,5 кэВ; (Б) – распределение в режиме захвата, минимальная энергия 31,4 кэВ.

В случае работы в режиме свободной генерации (рисунок 40 (А)) минимальная энергия электронов в конце пространства взаимодействия составляет 35,5 кэВ. Расчёты демонстрируют, что применение системы рекуперации увеличивает волновой КПД с 30,7% до 55%. В свою очередь в режиме захвата (рисунок 40 (Б)) минимальная энергия электронов составляет 31,4 кэВ, а рекуперация позволяет увеличить волновой КПД с 34,8% до 57%.

С учетом рекуперации увеличение КПД, связанное с режимом захвата, снизилось с 3,4% до 2%, что ставит под вопрос целесообразность использования внешнего управляющего сигнала в задаче повышения мощности и КПД генерации МВт гиротронов. Однако следует учесть, что в данной конфигурации гиротрона плотность спектра конкурирующих мод позволяет достигнуть мощности близкой к 1 МВт и без режима захвата частоты. В следующих же поколениях гиротронов технические характеристики будут отличаться от рассматриваемого в данной работе варианта в сторону увеличения выходной мощности и частоты. При этом усиливающаяся конкуренция мод неизбежно приведет к трудностям при продвижении в область высоких мощностей и КПД, а, следовательно, влияние эффекта захвата частоты будет заметно выше. Так, в работе [А6], описывающей эксперимент по захвату частоты МВт гиротрона 170 ГГц с рабочей модой $TE_{28,12}$, прирост мощности составил 10%. В данной работе численное моделирование предполагает, как говорилось ранее, рост мощности составил 13%, а экспериментальные данные, представленные далее, демонстрирую увеличение на 17%. Эти цифры демонстрирует тенденцию к росту влияния захвата частоты внешним сигналом на уровень выходной мощности.

3.2 Результаты эксперимента

Для проведения эксперимента было необходимо спроектировать и изготовить систему транспортировки синхронизирующего сигнала (линию передачи), так как гиротроны расположены друг относительно друга на расстоянии 5 м, а выходное

окно драйвера и входное окно мегаваттного гиротрона по вертикальной координате разнесены на 0,5 м. Такое расположение гиротронных стендов продиктовано необходимостью избежать взаимного влияния магнитных силовых полей сверхпроводящих соленоидов. Уменьшение расстояния приведет к искажению профиля магнитного поля, что окажет негативное влияние на траекторию движения электронного пучка. Это приведет к снижению эффективности генерации гиротронов, а в худшем случае – повреждению внутренних элементов вследствие осаждения электронного пучка в не предназначенной для этого области.

Система транспортировки излучения состоит из гофрированных волноводов, двух поворотных углов с плоскими зеркалами, переключателя направления излучения, а также двух систем согласующих зеркал (ССЗ) (рисунок 41).

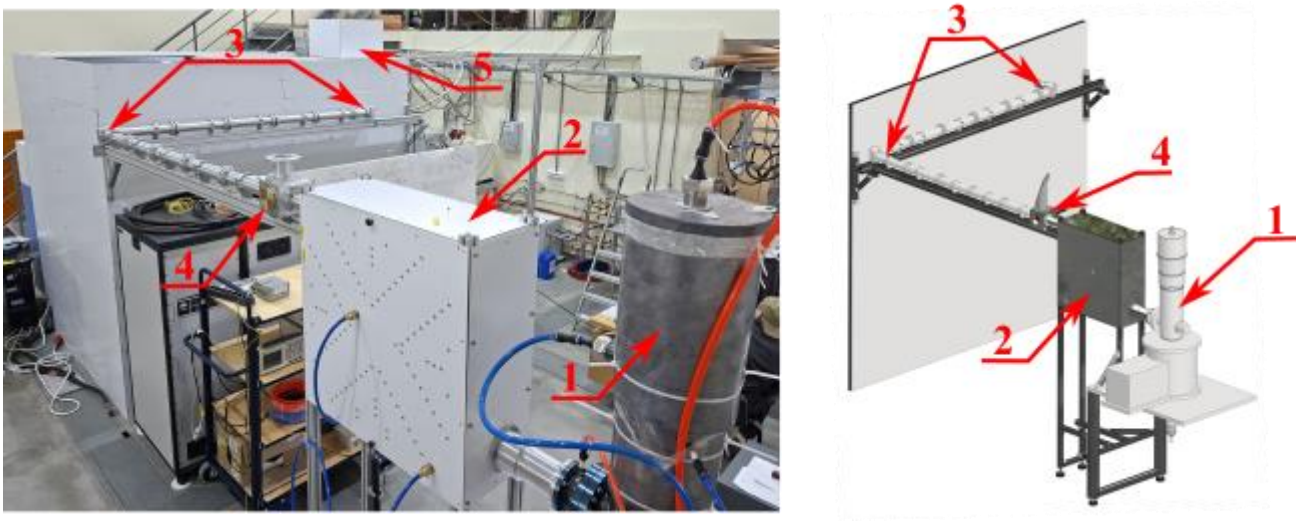


Рисунок 41. Внешний вид и трёхмерная модель линии передачи. 1 – гиротрон-драйвер, 2 – ССЗ гиротрона-драйвера, 3 – поворотные углы, 4 – переключатель, 5 – защитный кожух с мегаваттного гиротрона и его ССЗ.

Гофрированный волновод с рабочей модой HE_{11}, диаметром 50 мм и общей длиной 5 м, выполнен из алюминия и состоит из 13 секций по 0,4 м, скрепленных болтовыми соединениями. Конструкция фланцев обеспечивает точную стыковку элементов без видимых зазоров, что позволяет минимизировать дифракционные потери при прохождении излучения. Гофрировка синусоидальная, кольцевая с периодом 0,435 мм и глубиной 0,33 мм.

Поворотные углы предназначены для изменения направления волновода с целью совмещения торцов волноводов с блоками зеркал и окнами гиротронов. Углы оснащены плоскими зеркалами без систем юстировки, так как вся волноводная линия имеет жесткую конструкцию и не требует дополнительной настройки.

Переключатель расположен на начальном участке линии передачи и предназначен для перенаправления излучения драйвера на калориметрическую нагрузку во время настройки и поиска требуемого режима генерации гиротрона-драйвера. Корпус данного элемента выполнен из алюминия, а подвижная часть с ручным приводом – из латуни.

Двухзеркальные ССЗ предназначены для согласования волнового пучка гиротрона с модой HE_{11} круглого волновода. Система согласования гиротрона-драйвера (рисунок 42) имеет закрытый корпус, оснащенный дополнительными тефлоновыми трубками внутри для поглощения рассеянного излучения.

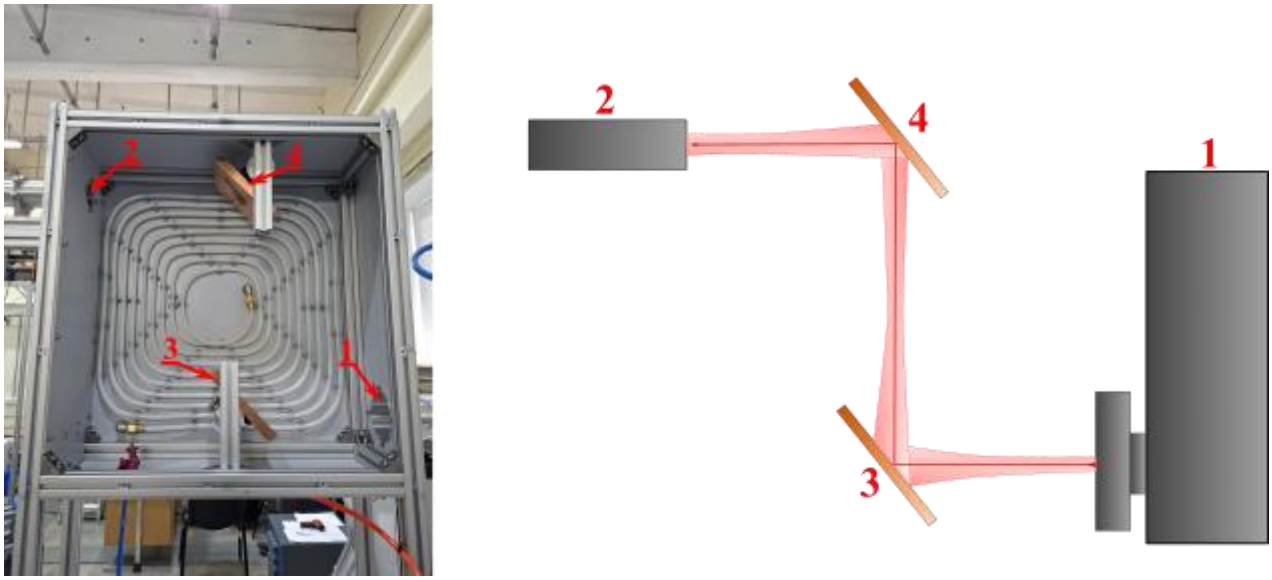


Рисунок 42. Внешний вид и принципиальная схема системы согласующих зеркал выходного пучка гиротрона-драйвера и моды волновода. 1 – гиротрон, 2 – волноводная линия, 3 – первое зеркало, 4 – второе зеркало.

В свою очередь, ССЗ мегаваттного гиротрона (рисунок 43), расположенная непосредственно возле входного окна, находилась внутри защитного кожуха гиротронного стенда и не требовала применения дополнительных защит от рассеянного СВЧ излучения. Несмотря на то, что квазипараболические зеркала

проще в изготовлении, для минимизации потерь при преобразовании пучка было принято решение использовать профилированную форму. Расчет профилей зеркал (рисунок 43 (Б) и (В)) проводился А. В. Чирковым на основе результатов измерений распределения амплитуды поперечной компоненты электромагнитного поля волнового пучка, описанных в предыдущих главах.

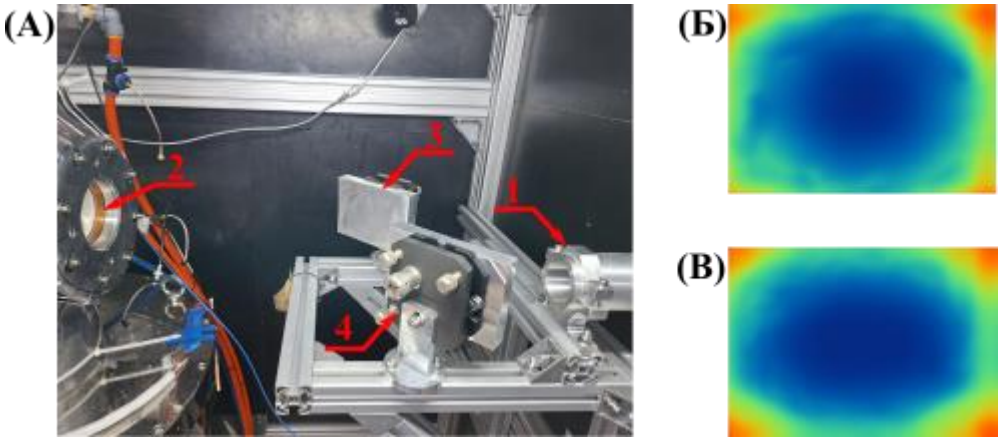


Рисунок 43. (А) – внешний вид собранной ССЗ мегаваттного гиротрона (1 – волноводная линия, 2 – входное окно мегаваттного гиротрона, 3 – второе зеркало, 4 – первое зеркало; (Б) и (В) – результаты численного моделирования профиля первого и второго зеркал соответственно.

На следующем этапе требовалось провести точную настройку линии, которая заключалась в юстировке зеркал обеих ССЗ. Каждое зеркало было укомплектовано механизмом юстировки по углу и в пространстве в диапазоне ± 10 мм. Для организации оптимальной работы профилированных зеркал волновой пучок должен попадать ровно в центр данных отражающих элементов. Также требуется обеспечить условия, при которых вектор распространения электромагнитной волны был ортогонален срезу волновода. Это позволит избежать многократного переотражения пучка внутри волновода, и как следствие, увеличенных омических потерь и искажения формы моды волновода на выходе из него.

Для визуализации следа волнового пучка в произвольных сечениях вдоль траектории распространения волны использовалась термографическая бумага, наклеенная на диэлектрический материал с высоким коэффициентом поглощения СВЧ излучения и низкой теплопроводностью. В данной работе роль диэлектрика

выполнял лист резины толщиной 4 мм. Падающая мощность передаёт тепловую энергию диэлектрику, который, в свою очередь, нагревает термографическую бумагу, меняющую цвет при повышении температуры. При этом низкая теплопроводность с высокой точностью обеспечивает соответствие изображения на бумаге реальному распределению амплитуды поля волны.

Сначала решалась прямая задача – волновой пучок от гиротрона-драйвера направлялся в сторону высокомощного гиротрона. Проводилась юстировка отражающих элементов только ССЗ маломощного источника синхронизирующего сигнала. Полученные в ходе данного этапа следы пучков приведены на рисунке 44. Пучки (А) и (Б) на зеркалах не имеют округлой формы, так как находятся в стадии преобразования, а вытянутая форма связана с расположением отражающих элементов под углом к вектору распространения излучения. Следы (В) и (Г) имеют округлую форму, а хорошее совпадение формы на входе и выходе волновода свидетельствует о том, что пучок входит в линию ортогонально срезу волновода, который, в свою очередь, не имеет перекосов по всей своей длине.

После этого аналогичным образом была решена обратная задача – возбуждена мода обратного вращения $TE_{-33,13}$ мегаваттного гиротрона и проведена настройка другого ССЗ, направляя пучок от мощного гиротрона в сторону драйвера.

На финальном этапе настройки линии передачи, путём тонкой настройки ССЗ мегаваттного гиротрона, требовалось создать условия, при которых траектория синхронизирующего излучения от драйвера, с точностью до экспериментальных погрешностей, совпадала с траекторией выходного волнового пучка рабочей моды обратного вращения мегаваттного гиротрона. Данное требование позволит организовать корректную работу входного канала квазиоптического преобразователя и снизит потери на преобразовании волнового пучка в моду резонатора. Для этого на фланце входного окна был сделан прожиг бумаги излучением мощного гиротрона, после чего, путём тонкой юстировки зеркал, след пучка от гиротрона-драйвера совмещался с прожигом. Результаты приведены на рисунке 45. Центры пучков совпали в пределах погрешности измерений.

Совпадение результатов распространения пучка от гиротрона-драйвера к МВт гиротрону и от МВт гиротрона к драйверу гарантирует корректный ввод внешнего сигнала в МВт гиротрон с минимальным уровнем потерь.

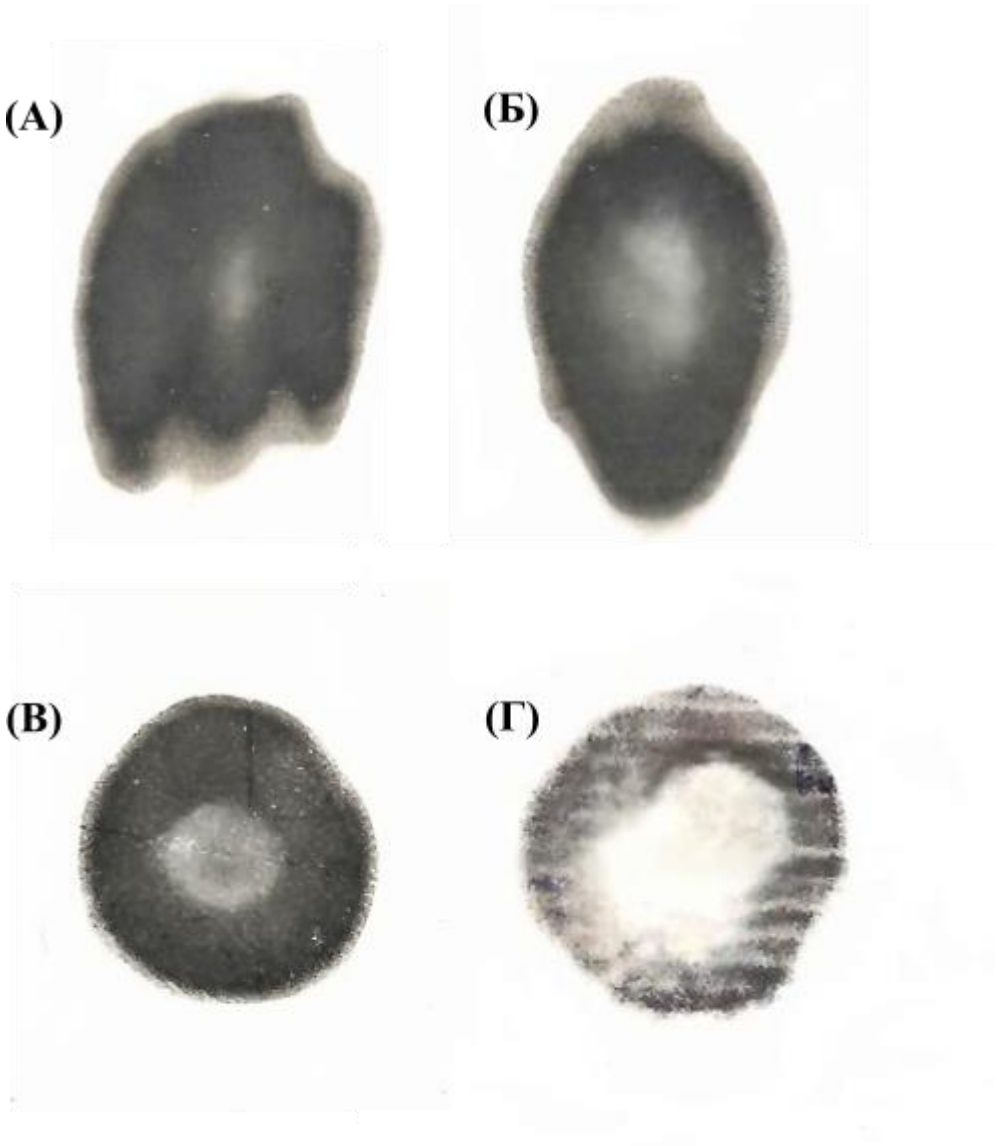


Рисунок 44. Следы пучков на элементах ССЗ гиротрона-драйвера и линии передачи. (А) – на первом зеркале, (Б) – на втором зеркале, (В) – на входном срезе волновода, (Г) – на выходном срезе волновода.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования по захвату частоты мегаваттного гиротрона внешним сигналом в режиме свободной генерации гиротрона-драйвера. Для успешного захвата частоты требовалось обеспечить правильную синхронизацию импульсов ускоряющего напряжения

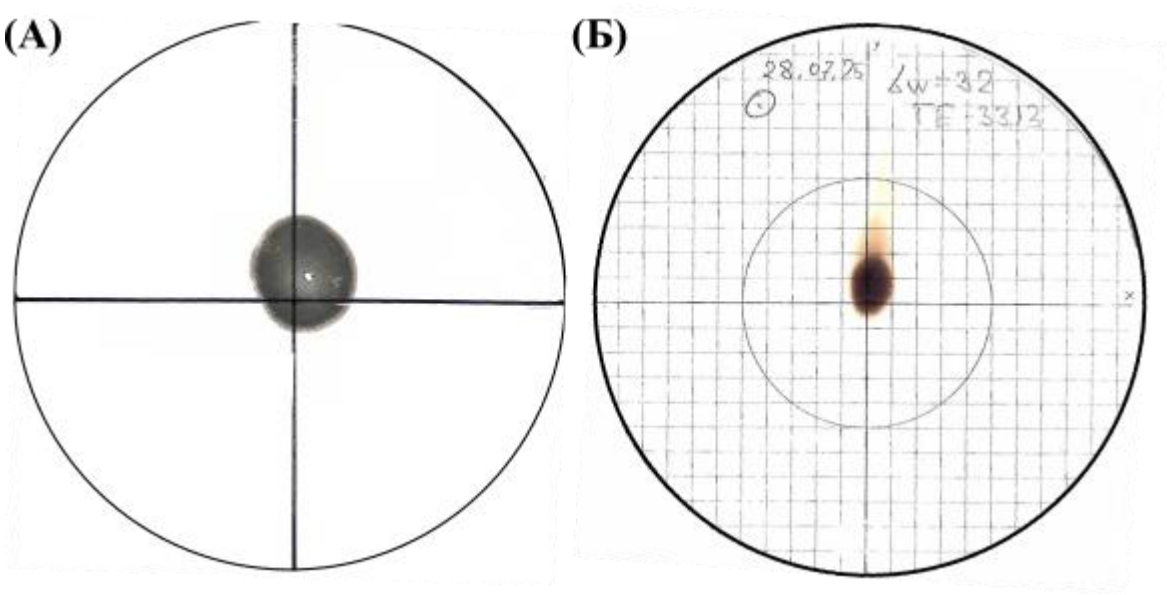


Рисунок 45. Следы пучков на срезе фланца входного окна мегаваттного гиротрона (32 мм от окна). (А) – след излучения от драйвера, (Б) – след излучения от мегаваттного гиротрона

обоих гиротронов. Так как внешний сигнал позволяет подавить конкурирующие моды на переднем фронте импульса ускоряющего напряжения, необходимо, чтобы весь импульс мегаваттного гиротрона был расположен внутри импульса драйвера в зоне стабильного ускоряющего напряжения. В свою очередь, стабильность ускоряющего напряжения гиротрона-драйвера в ходе импульса обеспечивает стабильность частоты генерации.

В связи с тем, что максимальное время работы источника ускоряющего напряжения драйвера составляет 50 мкс [95], было принято решение снизить длительность импульса мегаваттного гиротрона до 35 мкс. Для управления источниками ускоряющего напряжения и настройки параметров задержки использовались два генератора импульсов Keysight 33500B и Keysight 33521A. Первый генератор подавал команды запуска одновременно высоковольтному источнику драйвера и второму генератору, который, в свою очередь, через установленное время задержки задавал импульс запуска для ГИН мегаваттного гиротрона.

Для определения частоты генерации как мегаваттного гиротрона, так и драйвера применялась схема, идентичная применённой при работе системы ФАПЧ,

описанной в разделе 2.2. Так как калориметрическая нагрузка, расположенная непосредственно после выходного окна мегаваттного гиротрона, одновременно являлась поглотителем излучения обоих гиротронов, то ответвлённый сигнал малого уровня мощности отбирался из зоны между выходным окном и калориметрической нагрузкой.

В ходе первого этапа экспериментальной работы частота излучения мегаваттного гиротрона была постоянна и равнялась 230,006 ГГц (рисунок 46(А)), мощность составляла 750 кВт. В свою очередь, путём вариации параметров частота драйвера постепенно смещалась из зоны более высоких значений в сторону сближения с МВт гиротроном. Мощность поддерживалась постоянной и составляла 50 кВт. В процессе сближения наблюдались биения (рисунок 46(В)), подробное исследование которых описано ниже. При достижении значения частоты драйвера 230,054 ГГц (рисунок 46(Б)) произошёл захват частоты (рисунок 46(Г)). Эффект биений пропал, остался только один максимум, соответствующий частоте излучения драйвера с шириной спектра ~2 МГц. При этом прерывание синхронизирующего сигнала путём остановки подачи команд запуска источника ускоряющего напряжения гиротрона-драйвера приводило к возврату к значениям частоты, представленным на рисунке 46(А).

В ходе дальнейшего исследования была определена ширина области захвата. При мощности синхронизирующего сигнала 50 кВт с частотой 230,035 ГГц полуширина полосы захвата составила 50 МГц, что соответствует теоретическим оценкам.

Далее было проведено экспериментальное исследование зависимости мощности генерации от величины магнитного поля основного соленоида в режиме захвата внешним сигналом с частотой 230,0348 ГГц. На рисунке 47(А) продемонстрировано, что в режиме захвата удалось увеличить зону генерации и продвинуться в зону более низких магнитных полей с 9,12 Тл до 9,09 Тл. При этом мощность излучения мегаваттного гиротрона выросла с 940 кВт до 1100 кВт (увеличение на 17%) и КПД соответственно с 29,4% до 32,8%. Это согласуется с теоретическими исследованиями в рамках многомодовой нестационарной модели

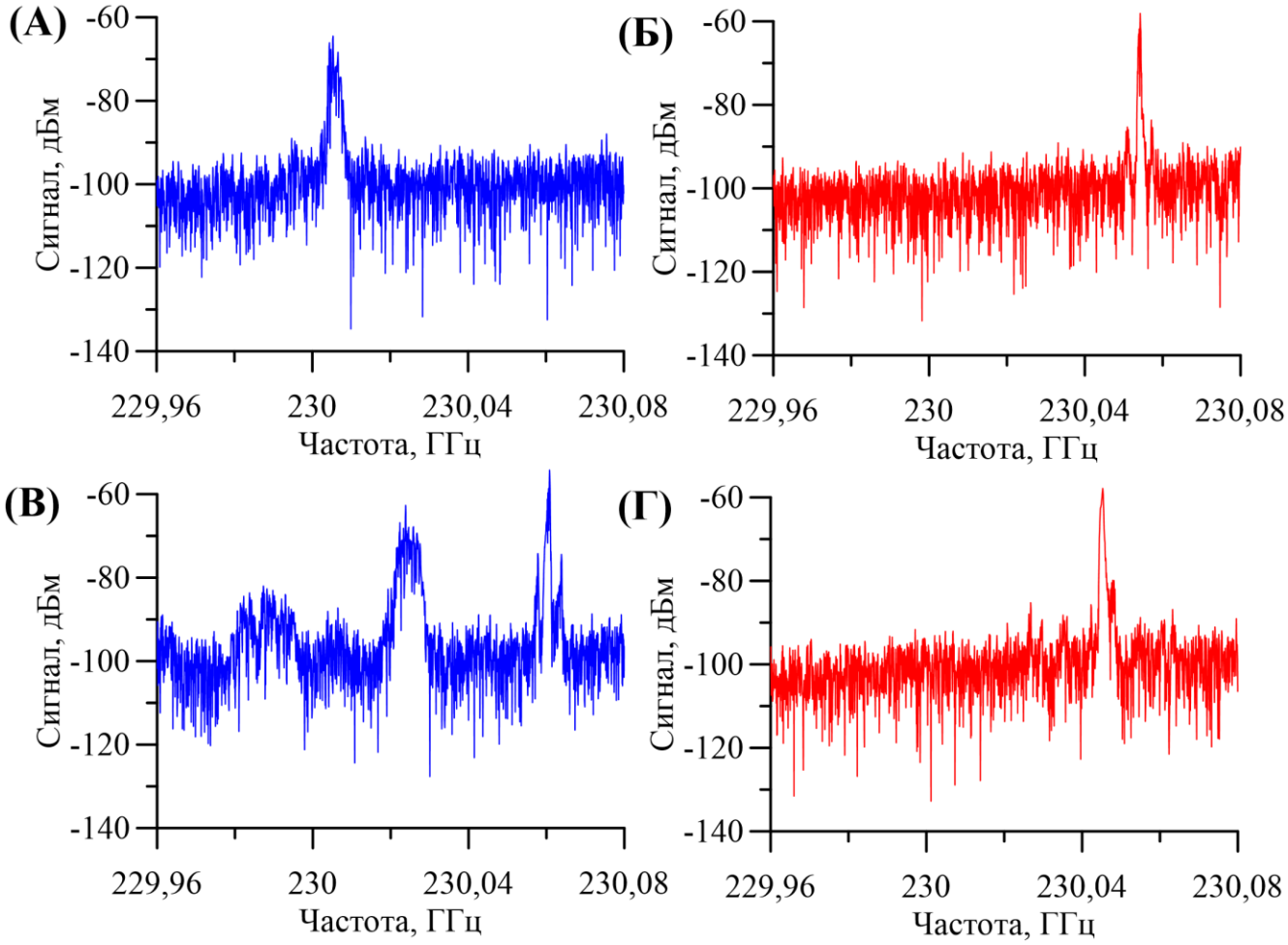


Рисунок 46. (А) – спектр излучения мегаваттного гиротрона в свободном режиме, частота составляет 230.006 ГГц; (Б) – спектр излучения гиротрона-драйвера в зоне захвата, частота 230.054 ГГц; (В) – спектр биений; (Г) – спектр излучения мегаваттного гиротрона в режиме захвата, частота 230.054 ГГц.

с нефиксированной структурой поля с учётом разброса по скоростям электронов 21,5% (рисунок 47(Б)). При тех же параметрах численное моделирование демонстрирует близкое к экспериментальным результатам увеличение выходной мощности на 13%.

Как было продемонстрировано на рисунке 46(В), при выходе из полосы захвата наблюдались биения на частоте рабочей моды. На рисунке 48 приведены графики зависимости разности частот автономных колебаний гиротронов и частоты биений от частоты мегаваттного гиротрона. Исследования проводились при частоте синхронизирующего излучения гиротрона-драйвера 230.035 ГГц и мощности 50 кВт, при этом генерация мегаваттного гиротрона перестраивалась за

счет изменения магнитного поля криомагнита. Качественно полученная картина согласуется с классической теорией захвата автогенератора внешней силой [99].

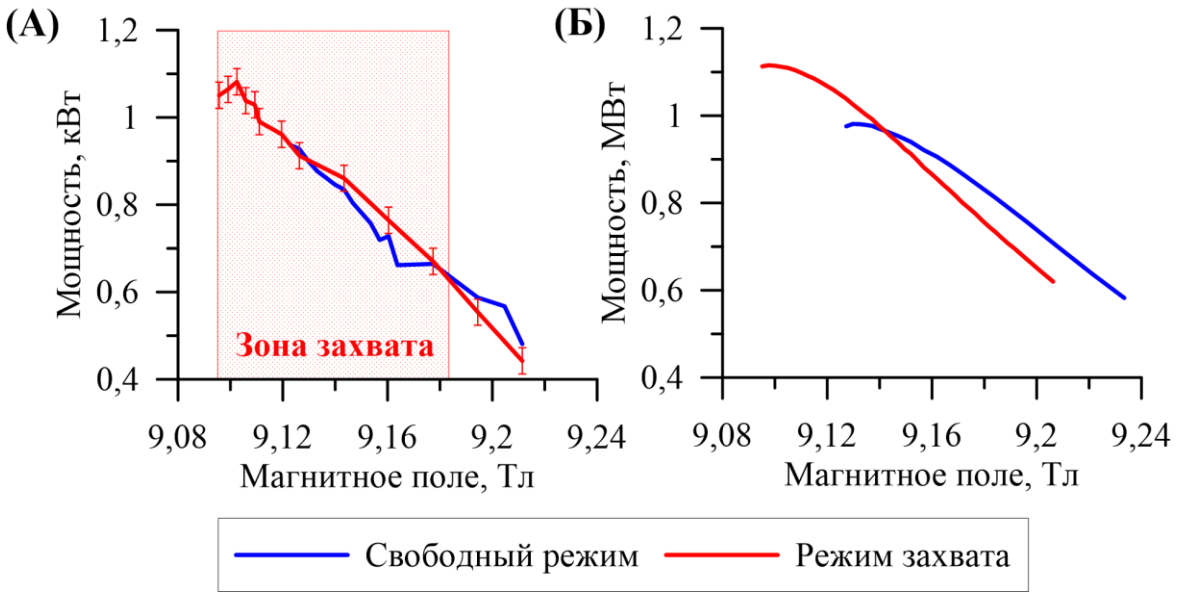


Рисунок 47. Графики зависимости мощности излучения мегаваттного гиротрона от величины магнитного поля в свободном режиме (синий график) и в режиме захвата частоты внешним сигналом (красный график). (А) – экспериментальные данные; (Б) – результаты численных расчетов. Красный прямоугольник обозначает зону захвата.

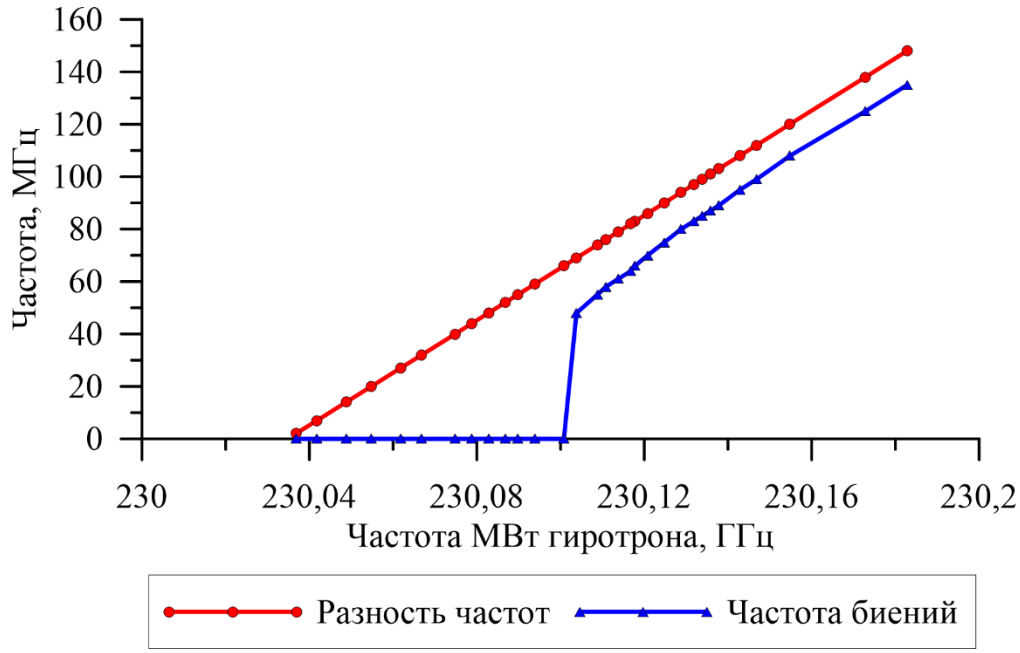


Рисунок 48. Зависимости разности частот мегаваттного гиротрона и драйвера (красная линия) и частоты биений (синяя линия) от частоты излучения мегаваттного гиротрона.

Далее частота генерации драйвера была стабилизирована системой ФАПЧ. Однако в связи с тем, что ширина стабилизированной части импульса гиротрона составляет 20 мкс, требовалось уменьшить длительность импульса мегаваттного гиротрона до 15 мкс. Это привело к тому, что в этом режиме не удалось провести измерение выходной мощности мегаваттного гиротрона, так как средняя выходная мощность излучения снизилась до уровня, сопоставимого с погрешностью системы измерения мощности.

Результаты измерения спектров в режиме захвата частоты стабилизированным сигналом приведены на рисунке 49. Частота спектра МВт гиротрона в захваченном режиме совпадает с частотой спектра драйвера и составляет 230,085 ГГц и ширина не превышала 400 кГц. При отсутствии внешнего синхронизирующего сигнала от драйвера ширина спектра МВт гиротрона достигала 4 МГц, а центральная частота составляла 230,109 ГГц.

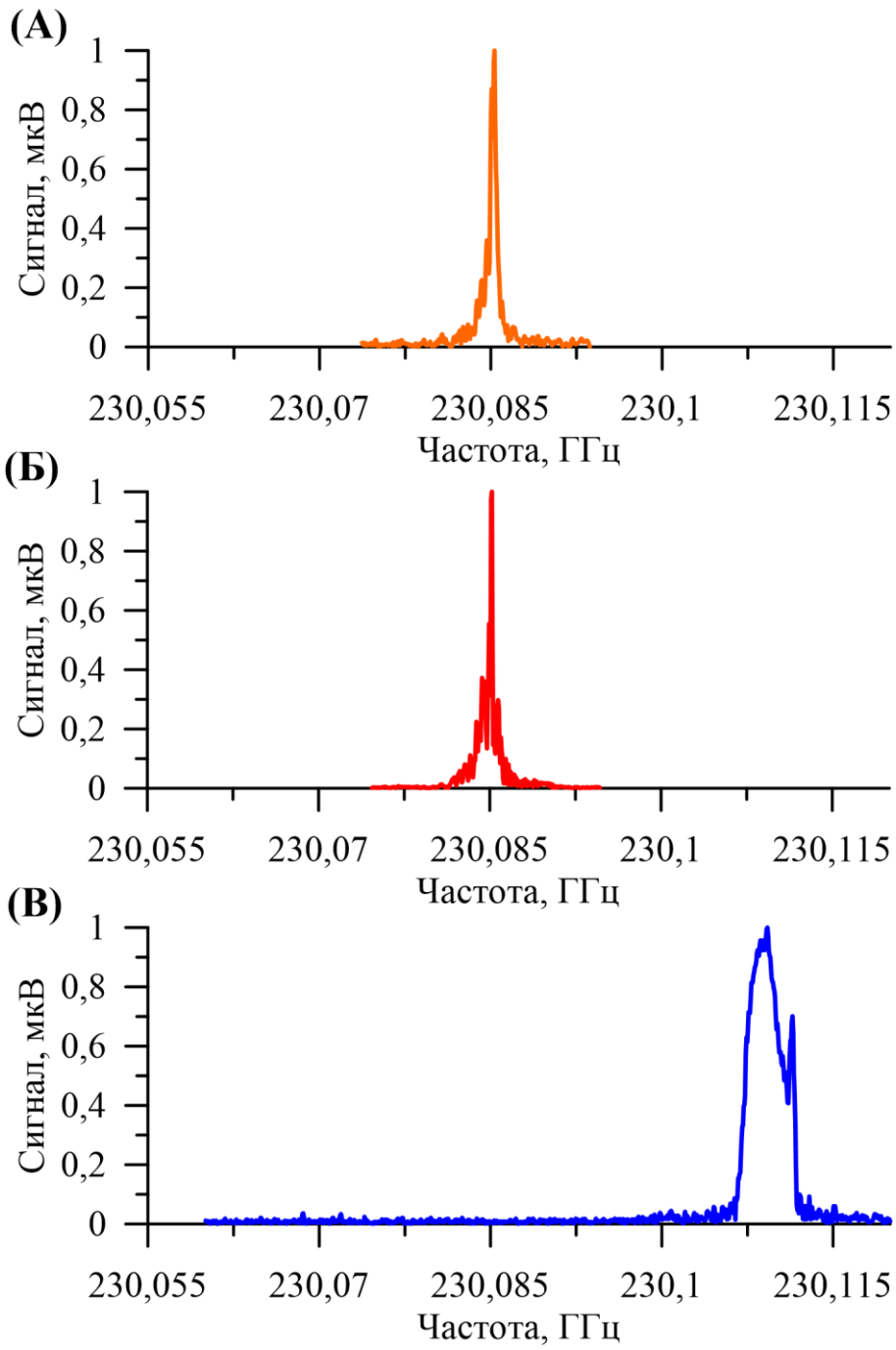


Рисунок 49. (А) – спектр излучения мегаваттного гиротрона в режиме захвата, частота составляет 230.085 ГГц; (Б) – спектр излучения гиротрона-драйвера, частота 230.085 ГГц; (В) – спектр излучения мегаваттного гиротрона в свободном режиме, частота 230.109 ГГц.

Заключение к главе 3

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования режима захвата частоты мегаваттного 230 ГГц гиротрона внешним синхронизирующим сигналом гиротрона-драйвера

В п.3.1 приведены результаты моделирования, показывающие возможность увеличения выходной мощности до 1,1 МВт в режиме захвата частоты. Проведено исследование зависимости ширины зоны захвата от частоты внешнего сигала и ведущего магнитного поля гиротрона для разных мощностей сигнала. Исследована эффективность системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка и показано, что увеличение полного КПД гиротрона с рекуперацией оказывается меньше, чем прирост волнового КПД полученного при расчете электронно-волнового взаимодействия. Тем не менее, применение захвата частоты в гиротронах с плотным спектром мод позволяет увеличить как выходную мощность, так и итоговый КПД системы.

В п 3.2. приведена результаты экспериментального исследования режимов захвата частоты. Продемонстрирован рост максимальной выходной мощности (с 940 кВт до 1100 кВт) и КПД (с 29,4% до 32,8%) мегаваттного гиротрона при работе в режиме захвата, при этом спектральные характеристики излучения мегаваттного гиротрона полностью определяются спектром внешнего сигнала. Исследован эффект биений вблизи зоны захвата.

Заключение

1. Для гиротронов мегаваттного уровня мощности теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность устойчивой одномодовой генерации излучения на рекордной частоте 230 ГГц. На основе проведенных исследований создан импульсный (100 мкс) прототип гиротрона для системы нагрева плазмы в токамаке с реакторными технологиями (ТРТ); в свободном (без воздействия внешнего сигнала) режиме генерации получена выходная мощность 940 кВт с КПД 29.4%.

2. Реализован импульсный (50 мкс) гиротрон-драйвер с рабочей частотой 230 ГГц, стабилизированный за счет использования системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с быстрым (единицы мкс) управлением анодным напряжением триодной магнетронно-инжекторной пушки. Длительность установления стабилизированного режима генерации в эксперименте составила ~20 мкс, при выходной мощности до 60 кВт, ширине линии излучения 180 кГц и диапазоне перестройки частоты 0.3 ГГц. Продемонстрировано существенное (в 8 раз) обужение спектра выходного излучения по сравнению с режимом свободной генерации.

3. Для исследования гиротронов мегаваттного уровня мощности разработан и создан экспериментальный стенд, оснащенный комплектом источников питания, необходимыми магнитами, системами блокировок и защит, сбора и обработки данных и откачным постом. Стенд предусматривает возможность использовать как НТСП, так и ВТСП магниты и позволяет проводить испытания разборных и отпаянных вариантов гиротронов в импульсном режиме.

4. Экспериментально получен режим захвата частоты гиротрона 230 ГГц/1 МВт стабилизированным сигналом от гиротрона-драйвера. В соответствии с результатами теоретического анализа продемонстрирован рост выходной мощности с 940 кВт до 1100 кВт и КПД с 29.4% до 32.8%; ширина спектра излучения в режиме захвата определялась шириной спектра гиротрона-драйвера.

5. Выполнены оценки эффективности системы одноступенчатой рекуперации энергии пучка в мощном мегаваттном гиротроне, работающем в режиме захвата частоты внешним сигналом. Показано увеличение итогового КПД по сравнению с режимом свободной генерации с 55% до 57%, несмотря на снижение минимальной остаточной энергии электронов.

Приложение 1. Описание расчетной модели гиротрона

В ходе численного моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия применялась аналитическая модель, которая представляет собой многомодовые укороченные уравнения гиротрона с фиксированной продольной структурой поля и произвольным поперечным сечением резонатора и произвольным поперечным распределением электронного пучка с учетом разброса по скоростям электронов [А3]. Движение электронов описывается следующим уравнением:

$$\frac{dp}{d\varsigma} + ip\frac{a_\perp^2}{a_\parallel}\left(\Delta\frac{1}{a_\perp^2} + |p|^2 - 1\right) = \sum_s F_s f_s(\varsigma) L_{n,s}(p^*)^{n_s-1}\frac{\gamma_0}{\gamma}\frac{a_\perp^{n_s-2}}{a_\parallel}e^{i\Delta_s\varsigma\frac{1}{a_\parallel}}$$

где s – номер моды, p – нормированный поперечный импульс электрона, $\varsigma = \frac{\beta_{\perp 0}^2}{2\beta_{\parallel 0}}\frac{\omega_0}{c}z$ – безразмерная продольная координата, z – продольная координата, $a_{\parallel,\perp} = \frac{\beta_{\parallel,\perp 0}^0}{\beta_{\parallel,\perp 0}}$ – отношение скоростей электронов в начале области взаимодействия к скорости центральной фракции распределения электронов по скоростям, $\Delta_s = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2}\frac{\omega_s - n_s\omega_0}{\omega_0}$ – расстройка частоты моды от опорной частоты, f_s – продольная структура поля, $L_{n,s} = \frac{1}{\chi_s^{n_s}}\left[\frac{d}{dX_0} + i\frac{d}{dY_0}\right]_s^n \Psi_s$ – дифференциальный оператор на мембранной функции s-й моды, n_s – помер гармоники s-й моды, γ – Лоренц фактор электронов в ходе роста ускоряющего напряжения, γ_0 – энергия электронов при полном ускоряющем напряжении, $\beta_{\perp 0}$ – отношение поперечной скорости электрона в начале резонатора к скорости света в вакууме, $\beta_{\parallel 0}$ – отношение продольной скорости электрона в начале резонатора к скорости света в вакууме, ω_0 – опорная частота, близкая к циклотронной частоте, c – скорость света в вакууме, ω_s – циклотронная частота, χ_s – поперечное волновое число s-й моды, $\Psi_s = J_m(\chi R)exp(-im\varphi)$ – мембранная функция цилиндрического резонатора [100], R – Радиус регулярной части резонатора, m – азимутальный индекс моды, φ – азимутальная координата, J_m – функция Бесселя m-го порядка

Возбуждение моды резонатора описывается уравнением:

$$\frac{dF_s}{d\tau} + i\left(n_s - \frac{\omega_{s0}}{\omega_0}\right)F_s + \frac{\omega_{s0}}{2\omega_0 Q_s}F_s$$

$$= \frac{-I_s}{2\pi}\frac{\int W(\boldsymbol{R})\int W(\nu_\parallel)\int_0^\varsigma\int_0^{2\pi} a_\perp^{n_s} p^{n_s} f_s^* L_{n,s}^* e^{-i\Delta_s\varsigma\frac{1}{a_\parallel}} d\vartheta_0 d\varsigma dS_\perp d\nu_\parallel}{\int\int W(\boldsymbol{R})\, W(\nu_\parallel) a_\parallel dS_\perp d\nu_\parallel}$$

где $\tau = \omega_0 t$ – безразмерное время, t – время, Q_s – полная добротность s-й моды, $W(\boldsymbol{R})$ и $W(\nu_\parallel)$ - функции распределения по поперечному сечению резонатора и по скоростям электронов, ϑ_0 – начальная фаза электрона на ларморовской орбите в момент влёта в резонатор, $S_\perp$ - поперечное сечение резонатора

Соответствующие данному типу резонатора безразмерная нормированная амплитуда поля s-ой моды F_s и безразмерный параметр тока I_s определяются как:

$$F_s = \frac{eA_s}{mc\gamma_0\omega_0}\frac{n_s^{n_s}}{2^{n_s-1}n_s!}\beta_{\perp 0}^{n_s-4}$$

$$I_s = \frac{8\pi e I}{mc\gamma_0\omega_0^2\beta_{\parallel 0}}\left(\frac{n_s^{n_s}\beta_{\perp 0}^{n-2}}{2^n n_s!}\right)^2 \frac{1}{\int_{S_\perp}|\Psi_s|^2 dS_\perp \int_0^{\varsigma_{end}}|f_s|^2 d\varsigma}$$

Где A_s – амплитуда поля, e – заряд электрона, m – масса электрона, I – ток электронов.

КПД генерации в стационарном одномодовом режиме определяется как:

$$\eta_s = t_{\perp 0}\int W(\boldsymbol{R})\int W(\nu_\parallel)\, a_\parallel a_\perp^2 \frac{\int_0^{2\pi} 1 - |p(\varsigma_e)|^2 d\vartheta_0}{2\pi\int W(\nu_\parallel) a_\parallel d\nu_\parallel} d\nu_\parallel dS_\perp = t_{\perp 0}\eta_\perp$$

где $t_{\perp 0} = \frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\perp 0}^2+\beta_{\parallel 0}^2}$ – доля энергии вращения по отношению к общей энергии центральной доли распределения электронов по скоростям.

Уравнение баланса в данной модели представляет собой:

$$\frac{\omega_s}{Q_s\omega_0}|F_s|^2 = I_s\eta_\perp$$

Также для проведения корректных расчетов гиротронов укороченные уравнения дополняются выражениями для фактора связи электронного пучка G_s и стартовых токов I_s^{st}:

$$G_s = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\int_{S\perp} W(R_0) \left| L_{n,s} \right|^2 dS_\perp}{\int_{S_\perp} |\Psi_s|^2 dS_\perp}$$

$$I_s^{st} = \frac{\omega_s}{-Q_s \omega_0 \int W(\boldsymbol{R}) \int W(v_\parallel)\, a_\parallel a_\perp^2 \left| L_{n,s} \right|^2} * \frac{1}{\left(n_s + a_\parallel \frac{d}{d\Delta} \right) \left| \int_0^{\varsigma_e} f_s e^{\frac{i\Delta_s \varsigma + i n_s \Delta\varsigma}{a_\parallel}} d\varsigma \right|^2 \frac{1}{W(v_\parallel) a_\parallel dv_\parallel} dv_\parallel dS_\perp}$$

где λ – длина волны.

Данная модель использовалась для начальных оценок параметров гиротронов, как требующая наименьших вычислительных мощностей.

Список публикаций по теме диссертации

A1. A.A. Ananichev, A.P. Fokin, A.N. Kuftin, V.N. Manuilov, L.G. Popov, A.V. Chirkov, E.M. Tai, M.V. Morozkin, M.Yu. Glyavin, G.G. Denisov. Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak // IEEE Electron Device Letters (Volume: 46, Issue: 11, November 2025) DOI: 10.1109/LED.2025.3604060.

A2. A.V. Kirsanov, A.P. Fokin, A.N. Kuftin, A.A. Ananichev, G.Yu. Golubiatnikov, B.Z. Movshevich, A.S. Zuev, V.N. Manuilov, E.M. Tai, M.Yu. Glyavin, G.G. Denisov. Experimental Study of a Stabilized 230-GHz Gyrotron-Driver for Frequency Locking of Megawatt-Level Gyrotrons // IEEE Transactions on Electron Devices (Volume: 72, Issue: 10, October 2025) DOI: 10.1109/TED.2025.3602037.

A3. Фокин А.П., Ананичев А.А., Зуев А.С., Глявин М.Ю. Моделирование гиротрона с произвольным поперечным сечением резонатора и фиксированной продольной структурой поля // Изв. ВУЗов Радиофизика, 67, 6, 478-490 (2024). DOI: 10.52452/00213462_2024_67_06_478.

A4. A.S. Zuev, A.P. Fokin, A.A. Ananichev, E.S. Semenov, O.P. Plankin, A.N. Kuftin, V.E. Zapevalov, M.Yu. Glyavin. Realization of an Octave Frequency Step-Tuning of Sub-terahertz Gyrotron for Advanced Fusion Research // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 42, pages 1131–1141 (2021) DOI: 10.1007/s10762-021-00832-4

A5. M.S. Gitlin, S.A. Bulanova, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, A.A. Orlovskiy, A.A. Ananichev, A.I. Tsvetkov. Imaging of a High-Power Millimeter Wave Beam Using a Millimeter Wave-Induced Gas Breakdown Initiated by a Metal-Dielectric Screen // IEEE Transactions on Plasma Science, Volume: 50, Issue: 2, Feb. 2022 DOI: 10.1109/TPS.2022.3142902

A6. A.N. Kuftin, G.G. Denisov. A.V. Chirkov, M.Yu. Shmelev, V.I. Belousov, A.A. Ananichev, B.Z. Movshevich, I.V. Zotova, M.Yu. Glyavin. First Demonstration of

Frequency-Locked Operation of a 170 GHz/1 MW Gyrotron // IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 9, pp. 1563–1566, Sep. 2023, DOI: 10.1109/LED.2023.3294755

A7. С.И. Гусев, А.Б. Ермаков, П.Ю. Крашенинин, В.П. Макаров, Г.М. Мустафа, С.В. Чистилин, Э.А. Шарипов, А.А, Ананичев, А.П. Фокин, М.Ю. Глявин., “Лестничный генератор высоковольтных импульсов ЛГВИ-100/50,” Приборы и техника эксперимента, vol. 1, pp. 1–22, 2026

A8. А.А. Ананичев, А.С. Седов, А.И. Цветков, Н.В. Чекмарев. Использование одновременной перестройки нескольких управляющих параметров для стабилизации мощности излучения субтерагерцового гиротрона при перестройке частоты генерации // Приборы и техника эксперимента. № 2. - С. 68-72, 2022. DOI: 10.31857/S0032816222020094

A9. A.A. Ananichev, A.N. Kuftin, A.P. Fokin, I.V. Zheleznov, I.V. Zotova, Y.V. Novozhilova, M.L. Kulygin, A.S. Zuev, A.V. Kirsanov, D.S. Krupin, B.Z. Movshevich, A.V. Chirkov, A.S. Sergeev, G.Yu. Golubiatnikov, M.Yu. Shmelev, L.G. Popov, E.A. Solyanova, E.M. Tai, M.Yu. Glyavin and G.G. Denisov. Frequency-locked operation of a 230-GHz / 1-MW gyrotron prototype for TRT // IEEE Transactions on Electron Devices. DOI: 10.1109/TED.2026.3740081.

A10. A.A. Ananichev, A.V. Chirkov, G.G. Denisov, A.P. Fokin, Yu.M. Guznov, A.N. Kuftin, A.N. Leontyev, V.N. Manuilov, L.G. Popov, E.A. Soluyanova, E.M. Tai. Preliminary experiments on a demountable prototype of a MW level 230 GHz gyrotron // VIII international conference Frontiers of Nonliner Physics» Moskow, Russia, 1–6 September 2024.

A11. A.A. Ananichev, A.V. Chirkov, G.G. Denisov, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, S.Yu. Kornishin, A.N. Kuftin, A.G. Litvak, V.N. Manuilov, L.G. Popov, E.A. Soluyanova, E.M. Tai. First experiments on a demountable prototype of a MW level 230 GHz gyrotron // 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium–Spring (PIERS-Spring). DOI: 10.1109/PIERS-Spring66516.2025.11276244.

A12. A.A. Ananichev, A.V. Chirkov, G.G. Denisov, A.P. Fokin, M.Yu. Glyavin, G.Yu. Golubiatnikov, S.Yu. Kornishin, A.N. Kuftin, A.G. Litvak, V.N. Manuilov, B.Z. Movschevich, Y. V. Novozhilova, L.G. Popov, E.A. Soluyanova, E.M. Tai. Gyrotrons as stable sources of radiation for frequency locking // 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), DOI: 10.1109/PIERS-Spring66516.2025.11276632.

A13. A.A. Ananichev, A.S. Zuev A.P. Fokin and M.Yu. Glyavin. The theory of a gyrotron with an arbitrary resonator cross-section and fixed axial field structure // 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), doi: 10.1109/PIERS-Spring66516.2025.11276336.

A14. A.P. Fokin, A.A. Ananichev, A.S. Zuev, M.Yu. Glyavin. Simulation of a Sub-THz Quasi-optical Gyrotron within a Multi-mode Self-consistent Model with Fixed Axial Field Structure // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), DOI: 10.1109/PIERS62282.2024.10618297.

A15. А.П. Фокин, А.А. Ананичев, А.Н. Куфтин, М.В. Морозкин, А.В. Чирков, В.Н. Мануилов, Л.Г. Попов, Е.М. Тай, А.Г. Литвак, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов. Экспериментальное исследование прототипа мегаваттного гиротрона с частотой генерации 230 ГГц // XIV Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ". Т. 1, с. 141–144.

A16. А.А. Ананичев. Experimental investigation of 230 GHz gyrotron for modern tokamaks // International Workshop on Terahertz Technologies (IWTT 2026)

Список литературы

1. Hannah Ritchie, Pablo Rosado, Max Roser. Energy Production and Consumption [Электронный ресурс]. URL: https://ourworldindata.org/energy-production-consumption (дата обращения: 29.07.2026).
2. The Road to Fusion Energy [Электронный ресурс]. URL: https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap (дата обращения: 03.05.2026).
3. Batani D., Gorini G. Controlled Thermonuclear Fusion // Reviews in Advanced Sciences and Engineering. 2013. Т. 2, № 3. С. 186–191. DOI: 10.1166/rase.2013.1032.
4. L'Annunziata M. F. Radioactivity and Our Well-Being // Radioactivity. Elsevier, 2016. С. 1–66. DOI: 10.1016/B978-0-444-63489-4.00001-0.
5. Wagner F., Becoulet A., Budny R., Erckmann V., Farina D., Giruzzi G., Kamada Y., Kaye A., Koechl F., Lackner K., Marushchenko N., Murakami M., Oikawa T., Parail V., Park J. M., Ramponi G., Sauter O., Stork D., Thomas P. R., Tran Q. M., Ward D., Zohm H., Zucca C. On the heating mix of ITER // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. Т. 52, № 12. С. 124044. DOI: 10.1088/0741-3335/52/12/124044.
6. Poli E., Tardini G., Zohm H., Fable E., Farina D., Figini L., Marushchenko N. B., Porte L. Electron-cyclotron-current-drive efficiency in DEMO plasmas // Nuclear Fusion. 2013. Т. 53, № 1. С. 013011. DOI: 10.1088/0029-5515/53/1/013011.
7. Omori T., Albajar F., Bonicelli T., Carannante G., Cavinato M., Cismondi F., Darbos C., Denisov G., Farina D., Gagliardi M., Gandini F., Gassmann T., Goodman T., Hanson G., Henderson M. A., Kajiwara K., McElhaney K., Nousiainen R., Oda Y., Oustinov A., Parmar D., Popov V. L., Purohit D., Rao S. L., Rasmussen D., Rathod V., Ronden D. M. S., Saibene G., Sakamoto K., Sartori F., Scherer T., Singh N. P., Strauß D., Takahashi K. Progress in the ITER electron cyclotron heating and current drive system design // Fusion Engineering and Design. 2015. Т. 96–97. С. 547–552. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.12.023.
8. Goodman T. P., Felici F., Sauter O., Graves J. P. Sawtooth Pacing by Real-Time Auxiliary Power Control in a Tokamak Plasma // Phys. Rev. Lett. 2011. Т. 106, № 24. С. 245002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.245002.
9. Henderson M. A., Heidinger R., Strauss D., Bertizzolo R., Bruschi A., Chavan R., Ciattaglia E., Cirant S., Collazos A., Danilov I., Dolizy F., Duron J., Farina D., Fischer U., Gantenbein G., Hailfinger G., Kasparek W., Kleefeldt K., Landis J.-D., Meier A., Moro A., Platania P., Plaum B., Poli E., Ramponi G., Saibene G., Sanchez F., Sauter O., Serikov A., Shidara H., Sozzi C., Spaeh P., Udintsev V. S.,

Zohm H., Zucca C. Overview of the ITER EC upper launcher // Nuclear Fusion. 2008. Т. 48, № 5. С. 054013. DOI: 10.1088/0029-5515/48/5/054013.

10. Over $2.5 Billion Invested in Fusion Industry in Past Year [Электронный ресурс]. URL: https://www.fusionindustryassociation.org/over-2-5-billion-invested-in-fusion-industry-in-past-year/ (дата обращения: 03.05.2026).

11. Lawson J. D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor // Proceedings of the Physical Society. Section B. 1957. Т. 70, № 1. С. 6–10. DOI: 10.1088/0370-1301/70/1/303.

12. Bromberg J. Lisa. Fusion : science, politics, and the invention of a new energy source. MIT Press, 1982. 344 с.

13. Kikuchi M. A Review of Fusion and Tokamak Research Towards Steady-State Operation: A JAEA Contribution // Energies (Basel). 2010. Т. 3, № 11. С. 1741–1789. DOI: 10.3390/en3111741.

14. Spitzer L. The Stellarator Concept // Phys. Fluids. 1958. Т. 1, № 4. С. 253–264. DOI: 10.1063/1.1705883.

15. Betti R., Hurricane O. A. Inertial-confinement fusion with lasers // Nat. Phys. 2016. Т. 12, № 5. С. 435–448. DOI: 10.1038/nphys3736.

16. 60 years of progress [Электронный ресурс]. URL: https://www.iter.org/fusion-energy/60-years-progress (дата обращения: 03.05.2026).

17. Artsimovich L. A., Mirnov S. V, Strelkov V. S. Investigation of the ohmic heating of a plasma in the `tokamak-3' toroidal apparatus // Journal of Nuclear Energy. Part C, Plasma Physics, Accelerators, Thermonuclear Research. 1965. Т. 7, № 3. С. 305–313. DOI: 10.1088/0368-3281/7/3/310.

18. Rome J. A., Callen J. D., Clarke J. F. Neutral-beam injection into a tokamak, part I: fast-ion spatial distribution for tangential injection // Nuclear Fusion. 1974. Т. 14, № 2. С. 141–151. DOI: 10.1088/0029-5515/14/2/001.

19. Mantsinen M. J., Jacquet P., Lerche E., Gallart D., Kirov K., Mantica P., Taylor D., Van Eester D., Baruzzo M., Carvalho I., Challis C. D., Dal Molin A., Delabie E., De La Luna E., Dumont R., Dumortier P., Eriksson J., Frigione D., Garcia J., Garzotti L., Giroud C., Henriques R., Hobirk J., Kappatou A., Kazakov Y., Keeling D., King D., Kiptily V., Lennholm M., Lomas P., Lowry C., Maggi C. F., Mailloux J., Maslov M., Menmuir S., Monakhov I., Morales R. B., Noble C., Nocente M., Patel A., Pucella G., Reux C., Rigamonti D., Rimini F., Sheikh A., Silburn S., Siren P., Solano E. R., Stancar Z., Tardocchi M. Experiments in high-performance JET plasmas in preparation of second harmonic ICRF heating of tritium in ITER // Nuclear Fusion. 2023. Т. 63, № 11. С. 112015. DOI: 10.1088/1741-4326/aceb08.

20. Zhang X. J., Zhao Y. P., Wan B. N., Gong X. Z., Li J. G., Lin Y., Qin C. M., Taylor G., Xu G. S., Sun Y. W., Gao B. X., Qian J. P., Wang F. D., Lu B., Luo C., Zhang L., Hu L. Q., Song Y. T., Yu C. X., Liu W. D., Wukitch S., Wilson J. R., Hosea J. C. First results from H-mode plasmas generated by ICRF heating in the EAST // Nuclear Fusion. 2013. T. 53, № 2. C. 023004. DOI: 10.1088/0029-5515/53/2/023004.

21. Golant V. E. Electron Cyclotron Heating of a Tokamak Plasma // Phys. Scr. 1982. T. T2B. C. 428–434. DOI: 10.1088/0031-8949/1982/T2B/020.

22. Pietrzyk Z. A., Pochelon A., Behn R., Bondeson A., Dutch M., Goodman T. P., Tran M. Q., Whaley D. R. Electron cyclotron resonance heating on the TCA tokamak // Nuclear Fusion. 1993. T. 33, № 2. C. 197–209. DOI: 10.1088/0029-5515/33/2/I02.

23. Wolf R. C. Electron-cyclotron-resonance heating in Wendelstein 7-X: A versatile heating and current-drive method and a tool for in-depth physics studies // Plasma Phys. Control. Fusion. Institute of Physics Publishing, 2019. T. 61, № 1. DOI: 10.1088/1361-6587/aaeab2.

24. Prater R. Heating and current drive by electron cyclotron waves // Phys. Plasmas. 2004. T. 11, № 5 PART 2. C. 2349–2376. DOI: 10.1063/1.1690762.

25. Loarte A., Pitts R. A., Wauters T., Nunes I., de Vries P., Kim S. H., Köchl F., Polevoi A., Lehnen M., Artola J., Jachmich S., Pshenov A., Bai X., Carvalho I. S., Dubrov M., Gribov Y., Schneider M., Zabeo L., Bonnin X., Pinches S. D., Poli F., Lopez G. S., Merola M., Escourbiac F., Hunt R., Chen L., Boilson D., Veltri P., Casal N., Preynas M., Mukherjee A., Helou W., Kazarian F., Willms S., Bonnet I., Michling R., Giancarli L., van der Laan J., Walsh M., Udintsev V., Reichle R., Vayakis G., Fossen A., Turnyanskiy M., Becoulet A., Kamada Y., Zhuang G., Xu G., Gong X., Huang J., Jia M., Ding R., Qian J., Sun Y., Yang Q., Zhang L., Xu M., Zhang L., Brezinsek S., Stober J., Hobirk J., Rimini F., Garcia J., Rao S. L., Ghosh J., Sharma D., Magesh B., Bhattacharya R. P., Matsunaga G., Urano H., Hirose T., Ogawa K., Motojima G., Sung C. K., Lee H. H., Park J. K., Cheon M. S., Jeon Y. M., Konovalov S., Lebedev S., Kirneva N., Kashchuk Y., Bakharev N., Chen X., Bortolon A., Casali L., Maingi R., Turco F., Schmid K., Liu Y., Martín-Solís J. R., Angioni C., Pusztai I., Fajardo D., Mateev D., Lerche E., van Eester D., Vincenzi P., Futtersack R., Bobkov V., Colas L. The new ITER baseline, research plan and open R&D issues // Plasma Phys. Control. Fusion. 2025. T. 67, № 6. C. 065023. DOI: 10.1088/1361-6587/add9c9.

26. Flyagin V. A., Nusinovich G. S. Gyrotron oscillators // Proceedings of the IEEE. 1988. T. 76, № 6. C. 644–656. DOI: 10.1109/5.4454.

27. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. The Gyrotron at 50: Historical Overview // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2014. Т. 35, № 4. С. 325–381. DOI: 10.1007/s10762-014-0050-7.

28. Nusinovich G. S. Introduction to the physics of gyrotrons. The Johns Hopkins University Press, 2004.

29. Flyagin V. A., Gaponov A. V., Petelin I., Yulpatov V. K. The Gyrotron // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1977. Т. 25, № 6. С. 514–521. DOI: 10.1109/TMTT.1977.1129149.

30. Litvak A., Sakamoto K., Thumm M. Innovation on high-power long-pulse gyrotrons // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. Т. 53, № 12. С. 124002. DOI: 10.1088/0741-3335/53/12/124002.

31. Sakamoto K., Tsuneoka M., Kasugai A., Imai T., Kariya T., Hayashi K., Mitsunaka Y. Major Improvement of Gyrotron Efficiency with Beam Energy Recovery // Phys. Rev. Lett. 1994. Т. 73, № 26. С. 3532–3535. DOI: 10.1103/PhysRevLett.73.3532.

32. Read M. E., Lawson W. G., Dudas A. J., Singh A. Depressed collectors for high-power gyrotrons // IEEE Trans. Electron Devices. 1990. Т. 37, № 6. С. 1579–1589. DOI: 10.1109/16.106260.

33. Ponomarenko S., Laqua H. P., Avramidis K. A., Gantenbein G., Gontard J., Hollmann F., Illy S., Ioannidis Z. C., Jelonnek J., Jin J., Kohler S., Krier L., Leggieri A., Legrand F., Lietaer G., Lievin C., Marsen S., Moseev D., Noke F., Rzesnicki T., Stange T., Thumm M., Wolf R. C. Experimental Results of the Novel 1.5-MW-Class 140-GHz Continuous-Wave Gyrotron for the Wendelstein 7-X Stellarator // IEEE Electron Device Letters. 2024. Т. 45, № 12. С. 2550–2553. DOI: 10.1109/LED.2024.3484218.

34. Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // Meas. Sci. Technol. 2010. Т. 21, № 5. С. 54017. DOI: 10.1088/0957-0233/21/5/054017.

35. Tan P., Huang J., Liu K., Xiong Y., Fan M. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // Science China Information Sciences. 2012. Т. 55, № 1. С. 1–15. DOI: 10.1007/s11432-011-4515-1.

36. М. И. Петелин, В. К. Юлпатов. Мазеры на циклотронном резонансе. Лекция 2. Укороченные уравнения автоколебания МЦР-монотрона // Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров) Кн. 4. 1974. С. 144–178.

37. Цимринг Ш. Е. Формирование винтовых электронных пучков // Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар для инженеров) Кн. 4. Саратов: СГУ, 1974. С. 3–94.

38. Kuftin A. N., Lygin V. K., Manuilov V. N., Raisky B. V, Solujanova E. A., Tsimring S. E. Theory of helical electron beams in gyrotrons // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1993. Т. 14, № 4. С. 783–816. DOI: 10.1007/BF02084288.

39. Zapevalov V. E., Denisov G. G., Flyagin V. A., Sh. Fix A., Kuftin A. N., Litvak A. G., Agapova M. V., Iljin V. N., Khmara V. A., Myasnikov V. E., Nichiporenko V. O., Popov L. G., Usachev S. V., Alikaev V. V., Iljin V. I. Development of 170 GHz/1 MW Russian gyrotron for ITER // Fusion Engineering and Design. 2001. Т. 53, № 1–4. С. 377–385. DOI: 10.1016/S0920-3796(00)00513-5.

40. Tsimring S. E. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. DOI: 10.1002/0470053763.

41. Denisov G. G., Kuftin A. N., Malygin V. I., Venediktov N. P., Vinogradov D. V, Zapevalov V. E. 110 GHz gyrotron with a built-in high-efficiency converter // International Journal of Electronics. 1992. Т. 72, № 5–6. С. 1079–1091. DOI: 10.1080/00207219208925634.

42. Yukikazu Iwasa. Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational Issues. Springer, 2009. 1–716 с.

43. Hirose R., Hayashi S., Fukumizu S., Muroo Y., Miyata H., Okui Y., Itoki A., Kamikado T., Ozaki O., Nunoya Y., Okuno K. Development of 15 T Cryogen-Free Superconducting Magnets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2006. Т. 16, № 2. С. 953–956. DOI: 10.1109/TASC.2006.871282.

44. Glyavin M. Yu., Luchinin A. G., Golubiatnikov G. Yu. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2008. Т. 100, № 1. С. 15101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.015101.

45. Flyagin V. A., Luchinin A. G., Nusinovich G. S. Submillimeter-wave gyrotrons: Theory and experiment // Int. J. Infrared Millimeter Waves. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 1983. Т. 4, № 4. С. 629–637. DOI: 10.1007/BF01009400.

46. Bykov Y., Eremeev A., Glyavin M., Kholoptsev V., Luchinin A., Plotnikov I., Denisov G., Bogdashev A., Kalynova G., Semenov V., Zharova N. 24–84-GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Т. 32, № 1. С. 67–72. DOI: 10.1109/TPS.2004.823904.

47. Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nuclear Fusion. 2019. Т. 59, № 7. С. 73001. DOI: 10.1088/1741-4326/ab2005.

48. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., Tai E. M., Azizov E. A., Ilin V. I. Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. Т. 32, № 3. С. 337–342. DOI: 10.1007/s10762-010-9743-8.

49. Kajiwara K., Ikeda R., Shinya T., Yajima S., Yamazaki H., Kobayashi T. Development of ITER Gyrotrons in JADA // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2023. С. 1–2. DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157182.

50. Jelonnek J., Aiello G., Avramidis K., Gantenbein G., Grossetti G., Illy S., Ioannidis Z. C., Jin J., Kalaria P., Marek A., Pagonakis I. G., Rzesnicki T., Ruess S., Ruess T., Scherer T., Schmid M., Strauss D., Thumm M., Wilde F., Wu C., Zein A. 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. С. 1–3. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8067248.

51. Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // IEEE Journal of Microwaves. 2021. Т. 1, № 1. С. 260–268. DOI: 10.1109/JMW.2020.3030917.

52. Darbos C., Albajar F., Bonicelli T., Carannante G., Cavinato M., Cismondi F., Denisov G., Farina D., Gagliardi M., Gandini F., Gassmann T., Goodman T., Hanson G., Henderson M. A., Kajiwara K., McElhaney K., Nousiainen R., Oda Y., Omori T., Oustinov A., Parmar D., Popov V. L., Purohit D., Rao S. L., Rasmussen D., Rathod V., Ronden D. M. S., Saibene G., Sakamoto K., Sartori F., Scherer T., Singh N. P., Strauß D., Takahashi K. Status of the ITER Electron Cyclotron Heating and Current Drive System // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2016. Т. 37, № 1. С. 4–20. DOI: 10.1007/s10762-015-0211-3.

53. Carannante G., Cavinato M., Cindric K., De Vries P., Felici F., Ferrari M. G., Ferrò G., Henderson M., Neto A., Preynas M., Reich M., Sartori F., Zabeo L. ITER ECH&CD Control System: Architecture, interfaces and status of development // EPJ Web Conf. 2023. Т. 277. С. 04002. DOI: 10.1051/epjconf/202327704002.

54. Belov Y. N., Chirkov A. V, Denisov G. G., Efimov Y. V, Eremeev A. G., Litvak A. G., Malygin V. I., Miasnikov V. E., Popov L. G., Roy I. N., Sokolov E. V, Soluyanova E. A., Tai E. M., Usachev S. V. Completion phase of Russian gyrotron system development for ITER // 2016 41st International Conference on Infrared,

Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2016. С. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758426.

55. Ikeda R., Kajiwara K., Nakai T., Ohgo T., Yajima S., Shinya T., Kobayashi T., Takahashi K., Moriyama S., Eguchi T., Mitsunaka Y., Oda Y., Sakamoto K. Progress on performance tests of ITER gyrotrons and design of dual-frequency gyrotrons for ITER staged operation plan // Nuclear Fusion. 2021. Т. 61, № 10. С. 106031. DOI: 10.1088/1741-4326/ac21f7.

56. Tran M. Q., Agostinetti P., Aiello G., Avramidis K., Baiocchi B., Barbisan M., Bobkov V., Briefi S., Bruschi A., Chavan R., Chelis I., Day Ch., Delogu R., Ell B., Fanale F., Fassina A., Fantz U., Faugel H., Figini L., Fiorucci D., Friedl R., Franke Th., Gantenbein G., Garavaglia S., Granucci G., Hanke S., Hogge J.-P., Hopf C., Kostic A., Illy S., Ioannidis Z., Jelonnek J., Jin J., Latsas G., Louche F., Maquet V., Maggiora R., Messiaen A., Milanesio D., Mimo A., Moro A., Ochoukov R., Ongena J., Pagonakis I. G., Peponis D., Pimazzoni A., Ragona R., Rispoli N., Ruess T., Rzesnicki T., Scherer T., Spaeh P., Starnella G., Strauss D., Thumm M., Tierens W., Tigelis I., Tsironis C., Usoltceva M., Van Eester D., Veronese F., Vincenzi P., Wagner F., Wu C., Zeus F., Zhang W. Status and future development of Heating and Current Drive for the EU DEMO // Fusion Engineering and Design. 2022. Т. 180. С. 113159. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113159.

57. Krasilnikov A. V., Konovalov S. V., Bondarchuk E. N., Mazul’ I. V., Rodin I. Yu., Mineev A. B., Kuz’min E. G., Kavin A. A., Karpov D. A., Leonov V. M., Khayrutdinov R. R., Kukushkin A. S., Portnov D. V., Ivanov A. A., Belchenko Yu. I., Denisov G. G. Tokamak with Reactor Technologies (TRT): Concept, Missions, Key Distinctive Features and Expected Characteristics // Plasma Physics Reports. 2021. Т. 47, № 11. С. 1092–1106. DOI: 10.1134/S1063780X21110192.

58. Jelonnek J., Aiello G., Alberti S., Avramidis K., Braunmueller F., Bruschi A., Chelis J., Franck J., Franke T., Gantenbein G., Garavaglia S., Granucci G., Grossetti G., Illy S., Ioannidis Z. C., Jin J., Kalaria P., Latsas G. P., Pagonakis I. Gr., Rzesnicki T., Ruess S., Scherer T., Schmid M., Strauss D., Wu C., Tigelis I., Thumm M., Tran M. Q. Design considerations for future DEMO gyrotrons: A review on related gyrotron activities within EUROfusion // Fusion Engineering and Design. 2017. Т. 123. С. 241–246. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.047.

59. Флягин В.А., Г.С. Нусинович, В.К. Юлпатов, Н.А. Городецкая. Гиротроны. Горький: Академия наук СССР Институт прикладной физики, 1980. 34–34 с.

60. Ergakov V. S., Moiseev M. A. Theory of synchronization of oscillations in a cyclotron-resonance maser monotron by an external signal // Radiophysics and Quantum Electronics. 1975. Т. 18, № 1. С. 89–97. DOI: 10.1007/BF01037666.

61. MANHEIMER W. M. Theory of the multi-cavity phase locked gyrotron oscillator // International Journal of Electronics. 1987. Т. 63, № 1. С. 29–47. DOI: 10.1080/00207218708939106.

62. McCurdy A. H., Armstrong C. M. Mode selection by priming in an overmoded electron cyclotron maser // Physics of Fluids B: Plasma Physics. 1991. Т. 3, № 1. С. 212–227. DOI: 10.1063/1.859939.

63. Bakunin V. L., Denisov G. G., Novozhilova Yu. V. Frequency and phase stabilization of a multimode gyrotron with megawatt power by an external signal // Technical Physics Letters. 2014. Т. 40, № 5. С. 382–385. DOI: 10.1134/S1063785014050034.

64. Bakunin V. L., Denisov G. G., Novozhilova Y. V. Principal Enhancement of THz-Range Gyrotron Parameters Using Injection Locking // IEEE Electron Device Letters. 2020. Т. 41, № 5. С. 777–780. DOI: 10.1109/LED.2020.2980218.

65. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // Phys. Plasmas. 2015. Т. 22, № 3. DOI: 10.1063/1.4913672.

66. Bakunin V. L., Denisov G. G., Novozhilova Yu. V, Fokin A. P. Mode Competition Effect on Frequency Locking of a Multimode Gyrotron by a Monochromatic External Signal // Radiophysics and Quantum Electronics. 2017. Т. 59, № 8–9. С. 638–647. DOI: 10.1007/s11141-017-9730-1.

67. Yakunina K. A., Kuznetsov A. P., Ryskin N. M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // Phys. Plasmas. 2015. Т. 22, № 11. DOI: 10.1063/1.4935847.

68. 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. Т. 106, № 26. С. 263501. DOI: 10.1063/1.4923269.

69. Denisov G., Kuftin A., Manuilov V., Chirkov A., Popov L., Zapevalov V., Zuev A., Sedov A., Zheleznov I., Glyavin M. Concept design of the megawatt power level gyrotron stabilized by a low-power signal for DEMO project // Nuclear Fusion. 2022. Т. 62, № 3. С. 036020. DOI: 10.1088/1741-4326/ac4946.

70. Kuftin A. N., Denisov G. G., Chirkov A. V., Shmelev M. Y., Belousov V. I., Ananichev A. A., Movshevich B. Z., Zotova I. V., Glyavin M. Y. First Demonstration of Frequency-Locked Operation of a 170 GHz/1 MW Gyrotron // IEEE Electron Device Letters. 2023. Т. 44, № 9. С. 1563–1566. DOI: 10.1109/LED.2023.3294755.

71. Kuftin A. N., Golubiatnikov G. Yu., Vilkov V. A., Fokin A. P., Novozhilova Y. V., Glyavin M. Yu., Denisov G. G. Experimental Study of Extended Operating Zone

of a 170-GHz/1-MW Gyrotron Locked by a Narrowband External Signal // IEEE Trans. Electron Devices. 2024. Т. 71, № 11. С. 7061–7065. DOI: 10.1109/TED.2024.3457568.

72. Bakunin V. L., Guznov Yu. A., Denisov G. G., Zaitsev N. I., Zapevalov S. A., Kuftin A. N., Novozhilova Yu. V, Fokin A. P., Chirkov A. V, Shevchenko A. S. An Experimental Study of the Influence of an External Signal on the Generation Mode of a Megawatt-Power Gyrotron // Technical Physics Letters. 2018. Т. 44, № 6. С. 473–475. DOI: 10.1134/S1063785018060020.

73. Woskoboinikow P. Development of gyrotrons for plasma diagnostics (invited) // Review of Scientific Instruments. 1986. Т. 57, № 8. С. 2113–2118. DOI: 10.1063/1.1138757.

74. Idehara T., Myodo M., Itakura Y., Ogawa I. 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. Т. 2. С. 523–524. DOI: 10.1109/ICIMW.2005.1572645.

75. Erckmann V., Gasparino U. Electron cyclotron resonance heating and current drive in toroidal fusion plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. Т. 36, № 12. С. 1869–1962. DOI: 10.1088/0741-3335/36/12/001.

76. Sabchevski S., Di Palma E., Spassovsky I., Dattoli G. Gyrotrons as High-Frequency Drivers for Undulators and High-Gradient Accelerators // Applied Sciences. 2022. Т. 12, № 12. С. 6101. DOI: 10.3390/app12126101.

77. Gashturi A. P., Glyavin M. Yu., Denisov G. G., Zheleznov I. V., Zotova I. V., Manuilov V. N., Samsonov S. V., Sergeev A. S. Development of a millimeter-wave cyclotron resonance rectifier for advanced systems of wireless energy transmission // Journal of Radio Electronics. 2025. Т. 2025, № 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2025.3.14.

78. Samsonov S. V., Denisov G. G., Bogdashov A. A., Gachev I. G., Glyavin M. Yu., Zheleznov I. V., Zotova I. V., Maslov V. V. Ka-Band Inverted Gyrotron With 80% Efficiency of Microwave-to-DC Power Conversion // IEEE Electron Device Letters. 2025. Т. 46, № 11. С. 2153–2156. DOI: 10.1109/LED.2025.3610912.

79. Denisov G. G., Glyavin M. Yu., Fokin A. P., Kuftin A. N., Tsvetkov A. I., Sedov A. S., Soluyanova E. A., Bakulin M. I., Sokolov E. V, Tai E. M., Morozkin M. V, Proyavin M. D., Zapevalov V. E. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // Review of Scientific Instruments. 2018. Т. 89, № 8. С. 84702. DOI: 10.1063/1.5040242.

80. Zapevalov V. E., Kalynov Yu. K., Kuftin A. N., Malygin S. A., Tai E. M. Low-Q cavities for high-power gyrotrons // Radiophysics and Quantum Electronics. 1994. Т. 37, № 3. С. 233–236. DOI: 10.1007/BF01054033.

81. Manuilov V. N., Glyavin M. Yu. Synthesis of Current–Voltage Characteristics of 670 GHz Gyrotron Magnetron Injection Gun and Calculation of the Helical Electron Beam Parameters at the Leading Edge of a High-Voltage Pulse // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2013. Т. 34, № 2. С. 119–126. DOI: 10.1007/s10762-012-9953-3.

82. O. W. Richardson. (Thermionic) Emission From Hot Bodies . 2003. 196–196 с.

83. Gashturi A. P., Chirkov A. V, Denisov G. G., Paveliev A. B. Comparison of Different Methods for Calculating Gyrotron Quasi-Optical Mode Converters // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2013. Т. 34, № 1. С. 62–70. DOI: 10.1007/s10762-012-9948-0.

84. Aiello G., Scherer T., Avramidis K., Casal N., Franke T., Gagliardi M., Gantenbein G., Henderson M., Jelonnek J., Meier A., Saibene G., Schreck S., Strauss D., Thumm M., Tran M. Q., Wild C., Woerner E. Diamond Window Technology for Electron Cyclotron Heating and Current Drive: State of the Art // Fusion Science and Technology. 2019. Т. 75, № 7. С. 719–729. DOI: 10.1080/15361055.2019.1643690.

85. Parshin V. V. Dielectric materials for gyrotron output windows // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1994. Т. 15, № 2. С. 339–348. DOI: 10.1007/BF02096245.

86. Каменский М.В., Морозкин М.В., Проявин М.Д., Орловский А.А. Усовершенствование автоматизации гиротронных комплексов на основе элементов современной микроэлектроники // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, 2022. С. 432–436.

87. Проявин Михаил Дмитриевич, Котомина Валентина Евгеньевна. Способ изготовления СВЧ-компонентов сложной формы, имеющих развитую металлическую рабочую поверхность: пат. 2795771 USA. Russia: FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY, 2022.

88. Proyavin M. D., Kotomina V. E., Orlovskiy A. A., Zaslavsky V. Yu., Morozkin M. V., Palitsin A. V., Rodin Y. V., Sobolev D. I., Peskov N. Y. Application of Chemical Metallization of Photopolymer Structures Additive Technology in the Production of Components for Electronic Devices // Micromachines (Basel). 2023. Т. 14, № 10. С. 1897. DOI: 10.3390/mi14101897.

89. Chirkov A. V, Denisov G. G., Aleksandrov N. L. 3D wavebeam field reconstruction from intensity measurements in a few cross sections // Opt. Commun. 1995. Т. 115, № 5–6. С. 449–452. DOI: 10.1016/0030-4018(94)00630-D.

90. Kuznezov S. O., Malygin V. I. Determination of gyrotron wave beam parameters // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1991. Т. 12, № 11. С. 1241–1252. DOI: 10.1007/BF01014682.

91. Ergakov V. S., Moiseev M. A. Theory of synchronization of oscillations in a cyclotron-resonance maser monotron by an external signal // Radiophysics and Quantum Electronics. 1975. Т. 18, № 1. С. 89–97. DOI: 10.1007/BF01037666.

92. Krivosheev P. V, Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. Numerical Simulation Models of Forming Systems of Intense Gyrotron Helical Electron Beams // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. Т. 22, № 8. С. 1119–1145. DOI: 10.1023/A:1015006230396.

93. Zavol’sky N. A., Zapevalov V. E., Moiseev M. A. Numerical Modeling of the Processes of Electron-Wave Interaction in the Cavities of High-Power Gyrotrons With a Frequency of 300 GHz // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika. 2021. Т. 64, № 3. С. 192–205. DOI: 10.52452/00213462_2021_64_03_192.

94. Semenov E. S., Zuev A. S., Fokin A. P. Calculation of electrodynamic characteristics and electron-wave interaction in gyrotron resonators based on the ANGEL software package // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1. С. 35–47. DOI: 10.38028/ESI.2022.25.1.003.

95. Movshevich B. Z., Ananichev A. A., Glyavin M. Yu. High-Voltage Pulse Power Supplies for Powerful Sub-THz/THz Gyrotrons // 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). IEEE, 2025. С. 1–3. DOI: 10.1109/PIERS-Spring66516.2025.11276645.

96. Zuev A. S., Sedov A. S., Semenov E. S., Fokin A. P., Glyavin M. Yu. Analysis of the Possibilities to Control Diffraction Quality Factors of the Cavities of Subterahertz Gyrotrons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. Т. 48, № 11. С. 4037–4040. DOI: 10.1109/TPS.2020.3025689.

97. Dumbrajs O., Nusinovich G. S. Effect of technical noise on radiation linewidth in free-running gyrotron oscillators // Phys. Plasmas. 1997. Т. 4, № 5. С. 1413–1423. DOI: 10.1063/1.872345.

98. Schiller S., Roth B., Lewen F., Ricken O., Wiedner M. C. Ultra-narrow-linewidth continuous-wave THz sources based on multiplier chains // Applied Physics B. 2009. Т. 95, № 1. С. 55–61. DOI: 10.1007/s00340-008-3279-9.

99. Adler R. A Study of Locking Phenomena in Oscillators // Proceedings of the IRE. 1946. Т. 34, № 6. С. 351–357. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.229930.

100. LUCHININ A. G., NUSINOVICH G. S. An analytical theory for comparing the efficiency of gyrotrons with various electrodynamic systems // International Journal of Electronics. 1984. Т. 57, № 6. С. 827–834. DOI: 10.1080/00207218408938970.