

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

На правах рукописи

Зуев Андрей Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИРОТРОНОВ

1.3.4. – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Запевалов Владимир Евгеньевич

Нижний Новгород – 2023

Оглавление

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

| | |
|---|-----|
| 2.1.3 Результаты численного моделирования | 65 |
| 2.1.4 Экспериментальные результаты | 67 |
| 2.2 Использование локальной неоднородности на выходе из резонатора для управления дифракционной добротностью резонаторов терагерцовых гиротронов | 69 |
| 2.2.1 Терагерцовый гиротрон для экспериментов по ДПЯ..... | 70 |
| 2.2.2 Эффект локальной неоднородности на выходе из пространства взаимодействия | 71 |
| 2.2.3 Трансформация мод в резонаторе терагерцового гиротрона с неоднородностью на коллекторном конце..... | 73 |
| 2.2.4 Результаты численного моделирования | 75 |
| 2.3 Специфика влияния омических потерь на работу гиротронов терагерцового диапазона ... | 77 |
| 2.3.1 Влияние омических потерь на эффективность электронно-волнового взаимодействия..... | 77 |
| 2.3.2 Влияние омических потерь на устойчивость рабочего режима..... | 82 |
| 2.3.3 О возможности снижения доли омических потерь в терагерцовых гиротронах малой мощности путем охлаждения его резонатора до криогенных температур..... | 86 |
| 2.4 Основные выводы по главе 2..... | 91 |
| | |
| ГЛАВА 3. Многоствольные гиротронные системы для обеспечения многочастотной генерации | 92 |
| 3.1 Описание схемы многоствольного гиротрона..... | 94 |
| 3.2 Электронно-оптические системы многоствольного гиротрона..... | 97 |
| 3.2.1 Азимутальный дрейф электронного пучка | 97 |
| 3.2.2 ЭОС для многоствольного гиротрона 140 ГГц..... | 103 |
| 3.3 Примеры построения МСГ | 107 |
| 3.3.1 Многоствольная система с широкополосной плавной перестройкой частоты | 107 |
| 3.3.2 Частотно-перестраиваемый многоствольный гиротрон с «изолированными» электронными пучками | 110 |
| 3.3.3 Многоствольный гиротрон на высоких гармониках гирочастоты | 111 |
| 3.4 Многоствольный гиротрон с одновременной генерацией излучения на кратных частотах для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии | 113 |
| 3.4.1 Проектирование электронной пушки | 115 |
| 3.4.2 Электронно-волновое взаимодействие в МСГ на высоких гармониках | 122 |
| 3.4.3 Особенности электронно-волнового взаимодействия в МСГ с обращённой электродинамической системой (режим гиро-ЛОВ) | 126 |
| 3.4.4 Влияние качества внутренней поверхности резонатора..... | 130 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.5 Возможности рекуперации на коллекторе и система вывода излучения..... | 131 |
| 3.5 Основные выводы по главе 3..... | 133 |
| | |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 134 |
| СПИСОК ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 135 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ | 137 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 138 |
| СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ | 153 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчётные модели, используемые для описания электронно-волнового взаимодействия в гиротроне | 160 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

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

Гиротрон — мощный источник (генератор или усилитель) излучения в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, основанный на магнитотормозном излучении электронов, движущихся по винтовым траекториям. Гиротрон содержит магнетронно-инжекторную пушку, резонатор, коллекторную систему, систему вывода излучения и выходное окно. Каноническая схема гиротрона изображена на рисунке В1. Винтовой электронный пучок (ВЭП) в гиротроне формируется под действием скрещенных статических магнитного и электрического полей в системе катод-анод. Далее при адиабатическом движении в плавно нарастающем магнитном поле происходит компрессия электронного пучка, что приводит к увеличению доли вращательной энергии электронов. Взаимодействие электронного пучка с высокочастотными полями одной или нескольких собственных мод резонатора происходит в области однородного участка магнитного поля соленоида. Электроны, отдавшие часть своей энергии, оседают на коллектор, в котором распределение магнитного поля и профиль поверхности подобраны с учётом допустимой тепловой нагрузки. Выходящий из резонатора волновой пучок при помощи серии профилированных зеркал с возможностью преобразования его поперечной структуры выводится через выходное окно.

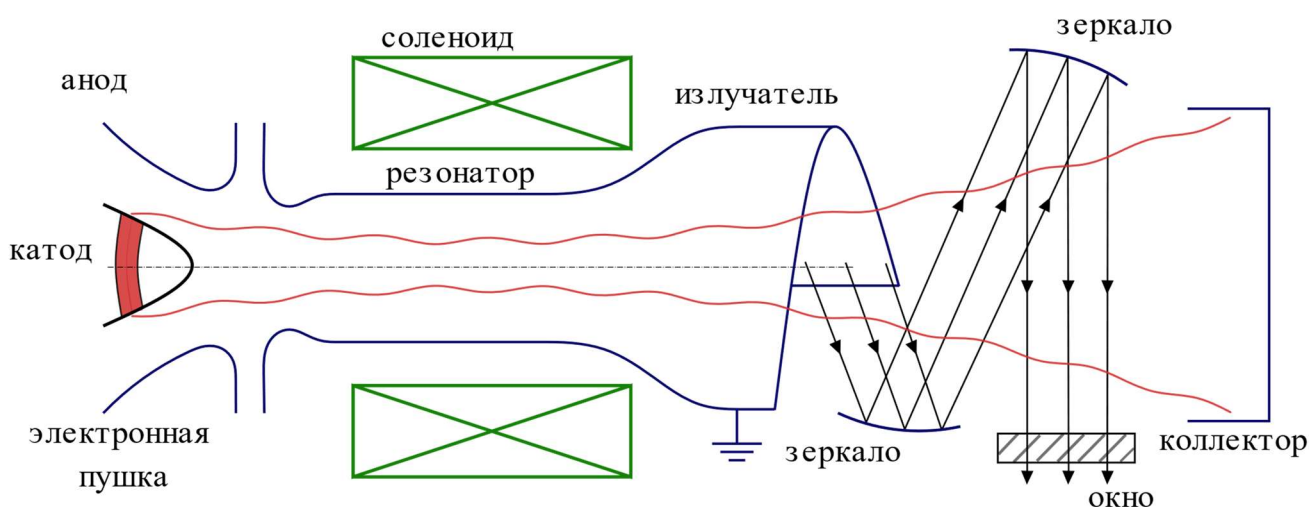


Рисунок В1 — Схема гиротрона

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

$$\omega \approx n\omega_H + \kappa_{\parallel}v_{\parallel}, \quad (B1)$$

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

В настоящее время выделяются два основных направления развития гиротронов: увеличение мощности выходного излучения [13–15] и продвижение в терагерцовый диапазон [16–21]. Субтерагерцовые гиротроны мегаваттного уровня мощности, работающие в режиме длинных импульсов, активно используются для электронно-циклотронного нагрева плазмы, управления током, подавления неустойчивости и активной диагностики в установках термоядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием плазмы [13]. В свою очередь, источники терагерцового излучения требуются, например, в спектроскопии высокого разрешения, для диагностики различных сред, в медицинских и биологических приложениях. Мощные источники терагерцового излучения применяются для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения [22], для создания «точечных» источников ультрафиолетового излучения [23]. Для некоторых приложений важным фактором является контроль частоты выходящего излучения с возможностью плавной перестройки этой частоты. Например, частотно-перестраиваемые источники излучения активно используются в ЯМР-спектроскопии, что позволяет значительно уменьшить время, необходимое для накопления информации [24–26].

Для многих приложений необходимы источники с разным уровнем мощности выходного излучения, перестраиваемые в широком интервале частот. Это требуется, в частности, и в спектроскопии, и для задач по диагностике плазмы, где широкополосная перестройка частоты излучения позволяет оперативно получить информацию о слоях плазмы разной плотности [27, 28]. По совокупности параметров одним из перспективных, или даже единственным источником излучения с требуемыми характеристиками является гиротрон. Даже сравнительно маломощные терагерцовые гиротроны на гармониках гирочастоты имеют достаточную мощность выходного излучения для большинства спектроскопических приложений. Гиротроны на порядки превосходят по уровню мощности другие электронные приборы и для ряда приложений не имеют альтернативных решений. Таким образом, всякое продвижение гиротронов по частоте, эффективности и выходной мощности является востребованным.

Подавляющее большинство промышленно выпускаемых гиротронов имеют канонический вид, показанный на рисунке В1, но всё большее развитие приобретают неканонические гиротроны [29]. Причиной этому, с одной стороны, является исчерпание возможностей методов селекции, обычно используемых в канонических гиротронах. С другой стороны, уникальные свойства неканонических гиротронов существенно расширяют возможности приборов гиротронного типа и открывают новые перспективы для вакуумной электроники.

Хотя предложено и исследовано большое количество различных способов увеличения диапазона перестройки и повышения рабочей частоты, тем не менее, все возможности гиротронов полностью не изучены. На сегодняшний день поиск и исследование перспективных методов расширения частотных возможностей современных гиротронных комплексов представляется одним из наиболее актуальных направлений дальнейшего их развития.

Цели и задачи исследования

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

1. Разработка двух вариантов многочастотных субтерагерцовых канонических гиротронов с мощностью выходного излучения до 200 Вт и до 200 кВт с целью выявления специфики работы частотно-перестраиваемых гиротронов с разным уровнем мощности.

2. Исследование перспективности введения в гиротрон селективного отражателя с целью решения проблемы конкуренции со стороны мод, работающих на более низких циклотронных гармониках.
3. Анализ специфики влияния омических потерь на процессы взаимодействия мод и эффективность работы гиротрона в разных частотных диапазонах. Исследование возможности понижения доли омической добротности за счёт выбора материала и технологии изготовления резонатора гиротрона и его температурного режима.
4. Исследование влияния локальной неоднородности, расположенной на выходном конце резонатора терагерцового гиротрона, на режим работы гироприбора с учётом возможных отклонений профиля резонатора от заданного, неизбежно возникающих при его изготовлении.
5. Разработка перспективных схем многолучевых многоствольных гиротронов для перестройки и повышения рабочей частоты.

Научная новизна

Все результаты диссертационной работы получены впервые, в частности:

1. Спроектированы два новых частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с триодной магнетронно-инжекторной пушкой (МИП), существенно отличающихся уровнем мощности выходного излучения. Проанализированы особенности маломощного низковольтного частотно-перестраиваемого гиротрона со сверхразмерным резонатором, предназначенного для использования в спектроскопии ядерного магнитного резонанса и других приложениях, с интервалом частот 0,20–0,27 ТГц и мощностью выходного излучения 200 Вт. Предложен вариант мощного частотно-перестраиваемого гиротрона для работы в широком интервале частот (0,1–0,26 ТГц) с выходной мощностью от 120 кВт до 260 кВт, спроектированный с учётом ограничений, налагаемых магнитной системой. Выявлены основные особенности частотно-перестраиваемых гиротронов с существенно разным уровнем (три порядка) выходной мощности.
2. Экспериментально продемонстрирована возможность дискретной перестройки частоты гиротрона почти на октаву в диапазоне 130–250 ГГц с уровнем мощности более 35 кВт. Результаты экспериментов сопоставлены с данными численного моделирования и имеют место их взаимное соответствие.
3. Экспериментально продемонстрирована возможность селективного возбуждения мод на высоких циклотронных гармониках за счёт введения в систему отражённого сигнала. Получены высокие значения КПД (8%) и мощности (3 кВт) на частоте 40,5 ГГц при работе на третьей циклотронной гармонике.

4. Для повышения эффективности гироприбора и селекции мод предложены новые способы понижения доли омических потерь в терагерцовых гиротронах: изменение материала (уменьшение концентрации примесей) и технологии изготовления резонатора, охлаждение резонатора до криогенных температур.
5. Показано, что введение специальной локальной неоднородности позволяет в некоторой мере скомпенсировать изменение добротности резонатора гиротрона, обусловленное возникающей в процессе изготовления небольшой конусностью регулярной части резонатора. Предлагаемый подход рассмотрен на примере гиротрона с мощностью выходного излучения десятки ватт на частоте 527 ГГц, предназначенного для спектроскопических приложений.
6. Предложена новая схема многолучевого многоствольного гиротрона. Рассмотрены перспективные варианты реализации гироприбора для задач по перестройке и повышению рабочей частоты.
7. Показана возможность реализации многоствольного гиротрона с плавной перестройкой в диапазоне 133,2–146,3 ГГц по уровню мощности выходного излучения десятки ватт.
8. Предложен перспективный вариант многоствольного гиротрона с одновременной многочастотной генерации на востребованных в ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения частотах: 263, 395 и 527 ГГц.

Научная и практическая значимость работы

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

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

Другой подход, который заключается в использовании криогенно охлаждаемых резонаторов при создании гиротронов терагерцового диапазона, также показал свою

потенциальную эффективность в повышении КПД гиротрона и улучшении селективных свойств мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками.

В работе исследуется перспективность нового типа неканонического гироприбора — многоствольного гиротрона. Многоствольные гиротроны ещё не являются в достаточной мере освоенными приборами, но, вместе с этим, имеют свои уникальные преимущества и свои перспективы для важных специфических приложений. Проведенные исследования способствуют созданию нового поколения гироприборов для широкого спектра научных и технических приложений.

Основные положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

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

Апробация результатов работы и публикации

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

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

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

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

- V, VII, IX, X Всероссийские научно-технические конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2016, 2018, 2021, 2022 гг.);
- XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, СГУ, 2018 г.);
- 3rd International Conference Terahertz and Microwaves Radiation: Generation, Detection and Application (TERA-2018), Nizhniy Novgorod, October 22–25, 2018;
- научно-техническая конференция «Мощные вакуумные СВЧ приборы — 2019» (Москва, АО «НПП» Торий, 22–23 мая 2019 г.);
- 29, 30-ой Международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, СевГУ, 2019, 2020 гг.);
- 7ая всероссийская микроволновая конференция (Москва, ИПЭ, 25–27 ноября 2020);
- the 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz, August 29 – September 3, 2021);
- Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS, 21–25 Nov. 2021);
- XX, XXI Международная конференция и молодежная школа «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии» (г. Нижний Новгород, ННГУ, 2020, 2021 гг.)

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (№№ 15-42-02380 р_поволжье_a, 16-32-00166 мол_a, 19-02-00832 А, 18-32-00772 мол_a), грантами РНФ (№№ 17-79-10422, 19-72-10127, 19-79-30071), грантом президента РФ (МК-3413.2021.1.2). По теме работы опубликовано 56 публикаций [А1-А56], из них 12 статей в рецензируемых журналах, 7 статей в сборниках трудов конференций, 36 тезисов докладов, 1 патент.

Личный вклад автора в проведённые исследования

Все результаты, включенные в диссертационную работу и вошедшие в работы [А1-А56], получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами. Проектирование электронно-оптической систем для частотно-перестраиваемых гиротронов, описанных в первой и третьей главах, проведена совместно с О. П. Планкиным и Е. С. Семеновым. Измерения широкополосной дискретной перестройки частоты на базе мощного субтерагерцового гиротрона выполнены совместно с А. П. Фокиным. Измерения по возбуждению моды, синхронной с третьей циклотронной гармоникой, с частотой генерации 40,5 ГГц, выполнены совместно с А. П. Фокиным и А. С. Седовым. Исследования отражательных способностей различных материалов в широком интервале частот и температур при помощи резонансного спектрометра [30] выполнены В. В. Паршиным и Е. А. Серовым.

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

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из Введения, трёх глав, Заключения, Списка часто используемых обозначений, Списка используемых сокращений, Списка литературы, Списка публикаций автора по теме диссертации и Приложения А. Общий объем диссертационной работы 162 страницы, включая 82 рисунка, 21 таблицу.

Краткое содержание работы

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

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

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

В параграфе 1.3 подробно рассматривается возможность реализации частотно-перестраиваемого гиротрона высокой мощности, работающего на 27 различных модах в диапазоне частот 97–261 ГГц. Для большинства рабочих мод мощность выходного излучения превысила 200 кВт. Проведён комбинированный анализ и совместная оптимизация электронно-

оптической и электродинамической систем. Выполнен анализ эффективности одноступенчатой рекуперации в такой системе. Предложена оптимизированная коллекторная система для работы гиротрона во всём указанном диапазоне частот. Средняя тепловая нагрузка на стенку коллектора без рекуперации составила около $0,5 \text{ кВт/см}^2$ и $0,3 \text{ кВт/см}^2$ с рекуперацией.

В параграфе 1.4 представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований широкополосной, практически октавной, дискретной перестройки частоты в прототипе мощного субтерагерцового гиротрона, предназначенного для нагрева плазмы и исследования томсоновского рассеяния в перспективных установках управляемого ядерного синтеза. Рассмотрены ограничения, налагаемые электронно-оптической системой и системой вывода излучения; исследованы возможности управления параметрами электронного пучка за счет коррекции магнитного поля путем использования дополнительной катушки, расположенной вблизи катодного узла. Определены рабочие моды и соответствующие им параметры электронно-оптической и магнитной систем гиротронного комплекса. В экспериментах с дополнительной катушкой с максимальным полем $0,03 \text{ Тл}$ продемонстрировано возбуждение десяти мод в диапазоне $133\text{--}250 \text{ ГГц}$ с мощностью от 35 до 200 кВт .

Во **второй главе** рассмотрены перспективные методы дополнительной селекции мод в гиротронах при работе на высоких циклотронных гармониках. В частности, в параграфе 2.1 представлены результаты экспериментальных исследований по возбуждению в непрерывном гиротроне моды на третьей циклотронной гармонике с помощью селективной обратной связи за счёт отражений. Селективное отражение выходного сигнала вводилось путём изменения толщины выходного окна. В ходе измерений продемонстрирована устойчивая генерация при работе на третьей циклотронной гармонике на частоте $40,9 \text{ ГГц}$ с мощностью выходного излучения 3 кВт и КПД 8% .

В следующем параграфе второй главы анализируются возможности уменьшения влияния слабой конусности регулярного участка резонатора на выходные характеристики гиротрона при помощи введения небольшой по размеру неоднородности в конце регулярного участка резонатора. Введение локальной неоднородности позволяет скомпенсировать возможное изменение добротности резонатора и снизить чувствительность режима работы терагерцового гиротрона к возникшей при изготовлении небольшой конусности регулярного участка резонатора. Анализ выполнен на примере разработанного в ИПФ РАН терагерцового гиротрона с частотой генерации $0,527 \text{ ТГц}$, предназначенного для спектроскопических задач.

В последнем параграфе исследуется специфика работы гиротронов в терагерцовом диапазоне. В гиротронах, предназначенных для освоения терагерцового диапазона частот, первостепенным является вопрос реализации устойчивой одномодовой генерации при работе на

модах, синхронных с высокими циклотронными гармониками. Как показали исследования, характерная для таких приборов высокая доля омических потерь в резонаторе не только ограничивает мощность выходного излучения и коэффициент полезного действия гиротрона, но и влияет на устойчивость его рабочего режима. Рассмотрена возможность ослабления этих нежелательных эффектов путём снижения доли омических потерь за счёт выбора материала, технологии изготовления резонатора и температурного режима.

В третьей главе предложена новая схема неканонического гиротрона — многоствольный гиротрон. Простейшая схема многоствольного гиротрона (МСГ) включает преимущества как канонического гиротрона (адиабатическая система формирования винтовых электронных пучков), так и гиротрона с приосевым пучком (эффективная селекция мод, синхронных с высокими гармониками гирочастоты) и привлекательна для приложений с требованием умеренного уровня мощности. Этот прибор позволяет значительно расширить частотные возможности современных гиротронов и существенно снизить стоимость по сравнению с набором гиротронов с аналогичными выходными характеристиками.

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

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

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

оптической системы многоствольного гиротрона терагерцового диапазона. В пунктах 3.4.2–3.4.4 приведены результаты исследования электронно-волнового взаимодействия, проанализированы особенности электронно-волнового взаимодействия в МСГ с обращённой электродинамической системой (режим гиро-ЛОВ). В параграфе 3.4.5 рассматривается перспективность рекуперации и предложены варианты системы вывода излучения в многоствольном гиротроне.

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

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

Благодарности

Выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю, доктору физико-математических наук Владимиру Евгеньевичу Запевалову. Я глубоко признателен своим коллегам Михаилу Юрьевичу Глявину, Владимиру Владимировичу Паршину, Олегу Петровичу Планкину, Антону Сергеевичу Седову, Евгению Сергеевичу Семенову, Евгению Александровичу Серову, Андрею Павловичу Фокину и всем остальным соавторам за продуктивное сотрудничество при решении многих научных проблем, в том числе нашедших отражение в этой работе. Я благодарен своей супруге за помощь и поддержку. Выражаю благодарность руководству ИПФ РАН за предоставленную возможность выполнить работу в стенах института, сотрудникам отделения физики плазмы и электроники больших мощностей и отдела электронных приборов за вдохновляющую атмосферу.

ГЛАВА 1. Субтерагерцовые гиротроны с широкополосной перестройкой частоты

Для многих приложений необходимы источники с разным уровнем мощности выходного излучения, перестраиваемые в широком интервале частот. По совокупности параметров частота и мощность для многих приложений одним из перспективных, или даже единственным источником излучения с требуемыми характеристиками является гиротрон.

Гиротрон является узкополосным источником излучения. Диапазон плавной перестройки частоты зависит от добротности рабочего типа колебаний и ограничен минимальной дифракционной добротностью $Q_{dif,min} = 4\pi \cdot (L/\lambda)^2$. Диапазон плавной перестройки может быть увеличен при помощи последовательного возбуждения серии мод $TE_{m,p,q}$ с разным продольным индексом q [31–34]. При этом перестройка частоты осуществляется посредством изменения основного магнитного поля прибора, ускоряющего напряжения или температурного режима (для термического расширения) резонатора гиротрона. Диапазон такой перестройки весьма ограничен. Как правило, полоса плавной перестройки частоты в гиротроне редко превышает 5% от средней рабочей частоты, что сужает круг возможных приложений [35]. Диапазон плавной перестройки может быть увеличен в гиротронах с конусообразными резонаторами [36–38].

Существенно бóльший частотный диапазон может быть получен при реализации ступенчатой (дискретной) перестройки частоты излучения. В гиротронах такая перестройка частоты достигается возбуждением последовательности поперечных мод при изменении основного магнитного поля прибора. Такой подход особенно перспективен в мощных гиротронах, которые, как правило, имеют сверхразмерный резонатор и работают на модах с высокими поперечными индексами. Высокая плотность спектра мод позволяет лучше освоить рабочий диапазон частот путём возбуждения бóльшего числа мод.

Возможности и методы ступенчатой перестройки частоты в гиротронах известны достаточно давно и в настоящее время опубликовано значительное число работ, посвященных их реализации [39–43, А1–А3]. Указанные методы в той или иной степени характерны для всех гиротронов: изменение гирочастоты (рабочего магнитного поля или ускоряющего напряжения) в гиротроне практически всегда приводит к последовательному и, в некоторых случаях, одновременному возбуждению нескольких собственных мод резонатора. Основанная на этом эффекте широкополосная ступенчатая перестройка частоты в диапазоне от 130 до 260 ГГц была продемонстрирована в Сиднейском университете ещё в 1982 году при работе более чем на 20 поперечных модах с уровнем мощности в несколько сотен милливольт [39]. Позже диапазон дискретной перестройки был расширен до 150–600 ГГц (двукратное увеличение диапазона

перестройки) путём реализации возбуждения мод, синхронных со второй гармоникой циклотронной частоты [40].

Аналогичный способ ступенчатой широкополосной перестройки частоты распространён и в мощных гиротронах. Так, в [42] рассмотрен гиротрон с мегаваттным уровнем мощности, работающий в диапазоне 100–156 ГГц. Параметры гиротрона оптимизированы для достижения максимальной мощности выходного излучения с учётом ограничения тепловой нагрузки на стенку резонатора. Похожие работы проведены в институте Карлсруэ (KIT), Германия, где в коаксиальном гиротроне экспериментально реализована дискретная перестройка частоты в диапазоне 134–169,5 ГГц с мощностью более 1 МВт [43]. В [42, 43] использовались криомагниты с магнитным полем до 7 Тл. Появление и быстрое развитие «сухих» (не требующих заливки криогенными жидкостями) сверхпроводящих магнитных систем повышает интерес к разработке частотно-перестраиваемых субтерагерцовых и терагерцовых гиротронных комплексов. Коммерчески доступные магнитные системы, работающие в непрерывном режиме, создают магнитное поле до 15 Тл.

Во многих работах особое внимание уделяется увеличению «коэффициента заполненности» полосы перестройки, равному отношению суммарного интервала перестройки ко всему рабочему диапазону (см., например, [44, 45]). В [44] рассматривается перспективность одновременного использования подходов плавной и ступенчатой (дискретной) частотной перестройки. Авторам удалось найти параметры системы, обеспечивающие теоретически плавную перестройку частоты в интервале 309–462 ГГц. Другим способом увеличить коэффициент заполненности является использование связанных резонаторов с трансформацией мод (“СРТМ”) вместо канонического квазирегулярного резонатора [45]. Выбор подходящей длины и радиуса каждого регулярного сектора “СРТМ” позволяет многократно увеличить количество рабочих мод и, следовательно, повысить коэффициент заполненности. Другим способом расширить частотные возможности гиротрона является использование многолучевых и многоствольных систем, подробно рассмотренных в третьей главе.

Одновременно с этим непрерывно развиваются и предлагаются новые разновидности мазеров на циклотронном резонансе, предназначенные для осуществления широкополосной дискретной или плавной перестройки частоты. Среди прочих выделяется концепция гиротронной лампы обратной волны (гиرو-ЛОВ), основанная на использовании в качестве электродинамической системы отрезка открытой квазиоптической линии передачи, в которой гауссов волновой пучок направляется зеркалами по зигзагообразной траектории [46]. В рамках численного моделирования показана перспективность такого прибора с возможностью плавной перестройки частоты в диапазоне от 120 до 320 ГГц (более октавы), при этом расчётная мощность выходного излучения менялась в диапазоне от 1 до 2,5 кВт.

1.1 Общие принципы дискретной перестройки частоты в гиротроне

Проиллюстрируем подход реализации ступенчатой перестройки частоты в гиротроне. На рисунке 1.1 изображены дисперсионные характеристики несколько собственных мод цилиндрического резонатора и пунктирные прямые, вдоль которых выполняется условие циклотронного синхронизма (В1). При изменении магнитного поля прямые смещаются вдоль оси ординат, при изменении ускоряющего напряжения меняется их наклон. Последовательное изменение ускоряющего напряжения или магнитного поля позволяет обеспечить выполнение условия циклотронного синхронизма для серии собственных мод резонатора.

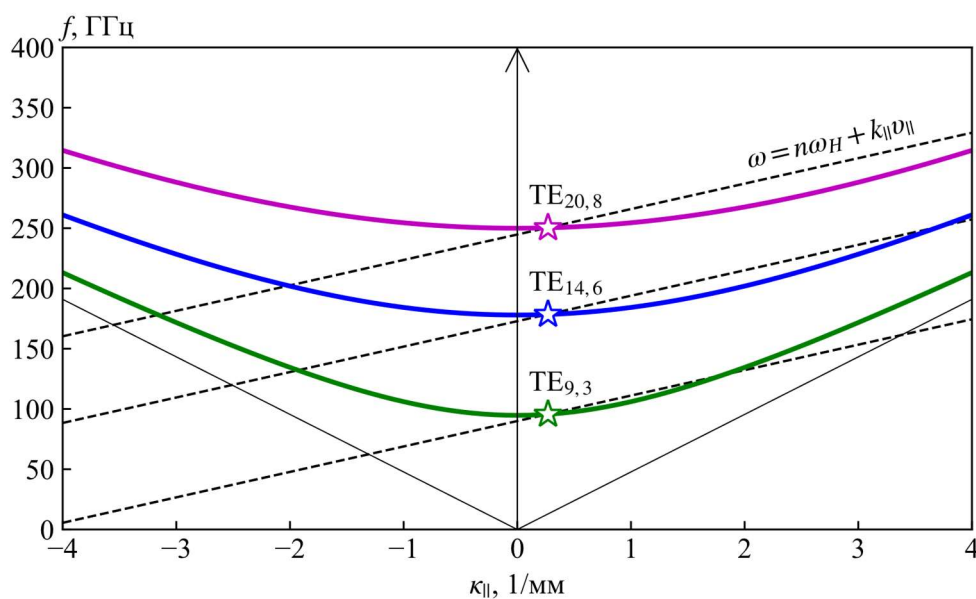


Рисунок 1.1 — Дисперсионная диаграмма гиротрона из параграфа 1.3 для мод $TE_{9,3}$, $TE_{14,6}$ и $TE_{20,8}$

Задачу проектирования гиротрона со ступенчатой перестройки частоты можно разделить на четыре подзадачи:

- формирование электронного пучка с требуемыми характеристиками в широком диапазоне магнитных полей;
- обеспечение эффективного взаимодействия электронного пучка с выбранными модами резонатора гиротрона;
- проектирование квазиоптической системы вывода энергии, позволяющей трансформировать рабочие моды в гауссов волновой пучок с минимальными дифракционными потерями;
- разработка широкополосного или частотно-перестраиваемого выходного окна.

Первая глава преимущественно посвящена совместному рассмотрению первых двух подзадач, рассматриваются перспективные варианты решения четвёртой, при этом практически не обсуждается третья подзадача. В этой главе в качестве примера рассмотрены два варианта широкополосных частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с относительно

малой (не более 200 Вт) [A1] и большой мощностью (около 200 кВт) [A2] выходного излучения, что позволяет проанализировать специфику частотной перестройки в приборах существенно разного уровня мощности. В случае маломощного гиротрона дополнительно рассмотрена возможность осуществления плавной перестройки частоты путем последовательного возбуждения серии продольных мод. Основная задача при проектировании широкополосного частотного-перестраиваемого гиротрона большой мощности заключалась в увеличении диапазона дискретной перестройки при помощи совместной оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем.

Оба гиротрона проектировались для уже существующего в ИПФ РАН гиротронного комплекса на основе использования криомагнита JASTEC-10T100 (рис. 1.2), имеющего максимальное магнитное поле 10 Тл с диаметром проходного отверстия 100 мм. Криомагниты со сходными характеристиками в настоящее время производятся фирмами в США, Японии и Великобритании, поэтому задача оптимизации системы гиротрон-криомагнит носит достаточно общий характер. В завершающем разделе первой главы приведены результаты экспериментальных исследований на гиротронном комплексе ИПФ РАН.

Общий подход к оптимизации гиротрона для реализации ступенчатой перестройки частоты включает совместное рассмотрение электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона. Для этого в гиротронах требуется достаточно плотный спектр собственных мод, что подразумевает работу на высших модах цилиндрического резонатора ($m \gg 1$, $p \gg 1$). Отметим, что с повышением рабочей частоты растёт доля омических потерь, что ведёт к возрастанию удельной тепловой нагрузки на стенку резонатора и является дополнительным фактором при выборе рабочей моды и режима гиротрона. Одним из основных способов уменьшения плотности тепловых нагрузок является увеличение поперечных размеров резонатора и, соответственно, переход к более высоким модам. Однако разместить гиротрон сравнительно высокой мощности, тем более многочастотный, в ограниченном пространстве криомагнита — достаточно сложная задача. Максимальная частота излучения в гиротроне существенно ограничена магнитным полем криомагнита и ускоряющим напряжением:



Рисунок 1.2 — Криомагнит
JASTEC-10T100

$$f[\text{ГГц}] \approx 28 \cdot \frac{nB_0[\text{Тл}]}{\gamma}. \quad (1.1)$$

Дополнительные пространственные ограничения накладываются на подсистемы формирования и транспортировки электронного пучка и вывода микроволнового излучения. Электронная пушка многочастотного гиротрона должна формировать электронные пучки с требуемыми параметрами в широком интервале магнитных полей. Для предварительного анализа перспективных вариантов использования магнетронно-инжекторных электронных пушек (МИП) для частотно-перестраиваемых гиротронов целесообразно использование адиабатической теории [10]. В рамках данной теории отношение осцилляторной энергии электронов к их полной энергии t_{\perp} в рабочем пространстве при перестройке на соседнюю моду зависит от магнитного поля, анодного и ускоряющего напряжений:

$$t_{\perp} \sim \frac{R_c^6 U_a^2}{R_0^6 \omega^2 U_0}. \quad (1.2)$$

Здесь R_c — средний радиус эмиссионного пояса на катоде, R_0 — средний радиус ведущих центров электронных орбит в пространстве взаимодействия (радиус встрела), U_a и U_0 — анодное и ускоряющее напряжения соответственно. Согласно (1.2), радиус встрела R_0 и рабочая частота ω при перестройке на соседнюю моду с сохранением параметров пучка должны удовлетворять соотношению

$$R_0^3 \omega = \text{const}. \quad (1.3)$$

Соотношения (1.2), (1.3) определяют перечень мод, подходящих для дискретной перестройки частоты. Для подстройки радиуса пучка в пространстве взаимодействия обычно используется катушка, корректирующая магнитное поле вблизи катода. Далее с целью дополнительной закрутки электронного пучка может меняться ускоряющее или анодное напряжение.

В рассматриваемых гиротронах оптимальная длина резонатора, соответствующая максимальному КПД, существенно отличается для разных мод. Возможна ситуация, когда длина резонатора недостаточна для эффективного возбуждения низкочастотной рабочей моды, в то время как для высокочастотной моды она больше оптимальной. В этом случае выбирается компромиссная длина резонатора, достаточная для возбуждения всех выбранных мод с приемлемым уровнем выходной мощности. Немаловажным фактором для выбора длины резонатора является продольное распределение магнитного поля, однородный участок которого ограничивает длину резонатора.

На выходе из резонатора волновой пучок со сложной поперечной структурой при помощи квазиоптического преобразователя (системы профилированных зеркал) преобразуется в гауссов пучок и выводится через выходное окно. В настоящее время существуют системы вывода с возможностью преобразования и вывода энергии нескольких мод со сходной

каустикой, при этом дифракционные потери в них составляют менее 5% от всего излучения [47]. Ведётся разработка квазиоптических систем с выводом излучения мод с разным направлением азимутального вращения [48, 49]. Такой подход, в том числе, открывает возможность введения в систему отраженного или внешнего сигнала с целью стабилизации рабочей частоты или селекции рабочего типа колебаний.

В подобных системах важным является разработка широкополосного выходного окна. Обычно в гиротроне используется однодисковое выходное окно, которое в общем случае не позволяет обеспечить требуемый уровень пропускания для всего рассматриваемого диапазона частот. Дополнительные возможности по минимизации отражения для набора мод предоставляет использование просветляющей пластинки, двухдискового окна или широкополосного профилированного окна [50–52]. Кроме того, хорошей альтернативой является вывод излучения под углом Брюстера [43]. В брюстеровских окнах при параллельной поляризации падающей волны независимо от частоты отсутствует отражение.

1.2 Гиротрон малой мощности с диапазоном перестройки 0,2–0,27 ТГц

1.2.1 Методика расчёта электронно-волнового взаимодействия

Разработка гиротрона вне зависимости от задач, которые перед ним стоят, начинается с предварительного определения его рабочих параметров. Первым шагом выбирается желаемая частота излучения, которая определяется, как правило, требованиями приложений при учёте разного рода ограничений, например, магнитной системы, источника питания и др. Требуемое магнитное поле для первоначальных оценок может быть найдено из условия синхронизма (В1) и зависит от требуемой частоты излучения, номера рабочей циклотронной гармоники и ускоряющего напряжения. Гиротрон обычно работает вблизи критической частоты ω_c одной из собственных мод волновода кругового сечения. Выбор рабочей моды определяет радиус регулярной части резонатора

$$R_r \approx c \nu_{m,p} / \omega_c, \quad (1.4)$$

где $\nu_{m,p}$ — p -ый корень производной функции Бесселя J_m . Далее в зависимости от мощности выходного излучения и других требований к источнику излучения следует оптимизация основных его параметров: ускоряющего напряжения, тока электронного пучка, электронно-оптической системы, профиля резонатора и др.

Первым шагом, как правило, оптимизируется профиль резонатора. Профиль резонатора гиротрона включает закритическое сужение, расположенное со стороны электронной пушки, квазирегулярный участок, в котором происходит взаимодействие электронного пучка с высокочастотным полем, и расширяющуюся выходную часть, через которую выводится

энергия излучения. Для синтеза резонаторов применяют широкий диапазон моделей, которые отличаются степенью учёта различных факторов. С целью определения электродинамических параметров решается, так называемая «холодная задача», электродинамическая задача без учёта электронного пучка [53–55]. Такой подход позволяет для заданной конфигурации резонатора найти собственную частоту и добротность выбранной рабочей моды и определить «холодную» продольную структуру ВЧ-поля.

Рабочая мода выбирается, в том числе, с учётом проблемы конкуренции мод. Это особенно актуально в случае гиротронов, работающих на высоких циклотронных гармониках, из-за острой конкуренции со стороны мод, синхронных с более низкими циклотронными гармониками. Для первоначального анализа условий конкуренции мод строится спектр соседних мод, расположенных вблизи рабочей моды. При этом для каждой рассматриваемой моды определяется фактор связи поля с пучком (структурный фактор):

$$G_{m,p,n} = \frac{J_{m-n}^2 \left(\nu_{m,p} \cdot \frac{R_0}{R_r} \right)}{(\nu_{m,p}^2 - m^2) \cdot J_m^2(\nu_{m,p})}. \quad (1.5)$$

Далее для анализа условий самовозбуждения выбранной моды и оценки возможности возбуждения соседних паразитных мод рассчитываются их стартовые токи. Генерация какой-либо моды в «мягком» режиме возможна, когда ток пучка I_b превосходит стартовый ток этой моды I_{st} при заданном магнитном поле B_0 . Конкуренцию, как правило, выигрывает первоначально возбуждавшаяся мода с меньшим стартовым током.

Следующим шагом выполняется моделирование электронно-волнового взаимодействия [56–64, A4, A5]. Численные модели, используемые в работе при расчёте стартового тока и эффективности электронно-волнового взаимодействия, описаны в приложении А. Данные модели позволяют выполнить расчёт стартового тока и электронно-волнового взаимодействия с учётом свойств электронного пучка, влияния омических потерь и заданного распределения ведущего магнитного поля. Приведённые в приложении расчётные модели прошли неоднократную проверку как в сравнении с другими численными моделями, так и с экспериментальными данными.

1.2.2 Выбор мод для ступенчатой перестройки частоты

В условиях работы на пространственно-развитых модах определяющим фактором при выборе поперечных размеров электродинамической и электронно-оптической систем являются размеры проходного отверстия криомагнита. Для реализации ступенчатой перестройки частоты в интервале частот 0,2–0,27 ТГц выбраны моды цилиндрического волновода (в скобках указаны собственные частоты данных мод): $TE_{16,6}$ (203,3 ГГц), $TE_{17,6}$ (210 ГГц), $TE_{17,7}$ (228,3 ГГц), $TE_{18,7}$ (235 ГГц), $TE_{18,8}$ (253,2 ГГц), $TE_{19,8}$ (260 ГГц), $TE_{20,8}$ (266,8 ГГц). На рисунке 1.3 показан спектр вблизи моды $TE_{19,8}$. Оптимальные радиусы R_0 и критические частоты $f_c = \omega_c/2\pi$ указанных мод приведены на рисунке 1.4. При этом сплошной линией на рисунке отмечена линия, полученная из соотношения (1.3) и соответствующая сохранению среднего питч-фактора электронного пучка при фиксированных значениях потенциалов на электродах. Моды $TE_{16,6}$, $TE_{17,6}$, $TE_{17,7}$, $TE_{18,7}$, $TE_{18,8}$, $TE_{19,8}$ и $TE_{20,8}$ являются ближайшими модами к линии по (1.3), построенной при ускоряющем напряжении 10 кВ и анодном напряжении 8,4 кВ.

Выделенные на рисунке 1.4 моды вследствие высокой плотности спектра мод являются весьма привлекательными для осуществления ступенчатой перестройки частоты. Для подстройки радиуса электронного пучка R_0 в рабочем пространстве рассматривается катушка подмагничивания с максимальным полем 0,04 Тл в области катода. С целью сохранения питч-фактора 1,2 для каждой моды корректировалось анодное напряжение.

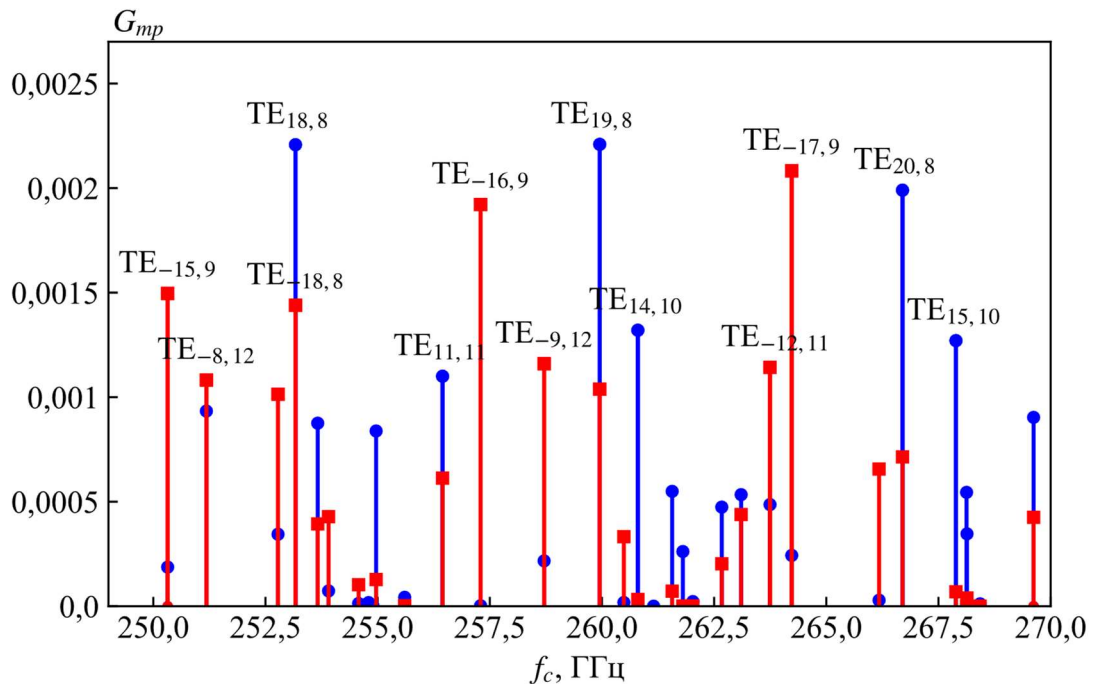


Рисунок 1.3 — Спектр вблизи моды $TE_{19,8}$ при $R_0 = 3,7$ мм

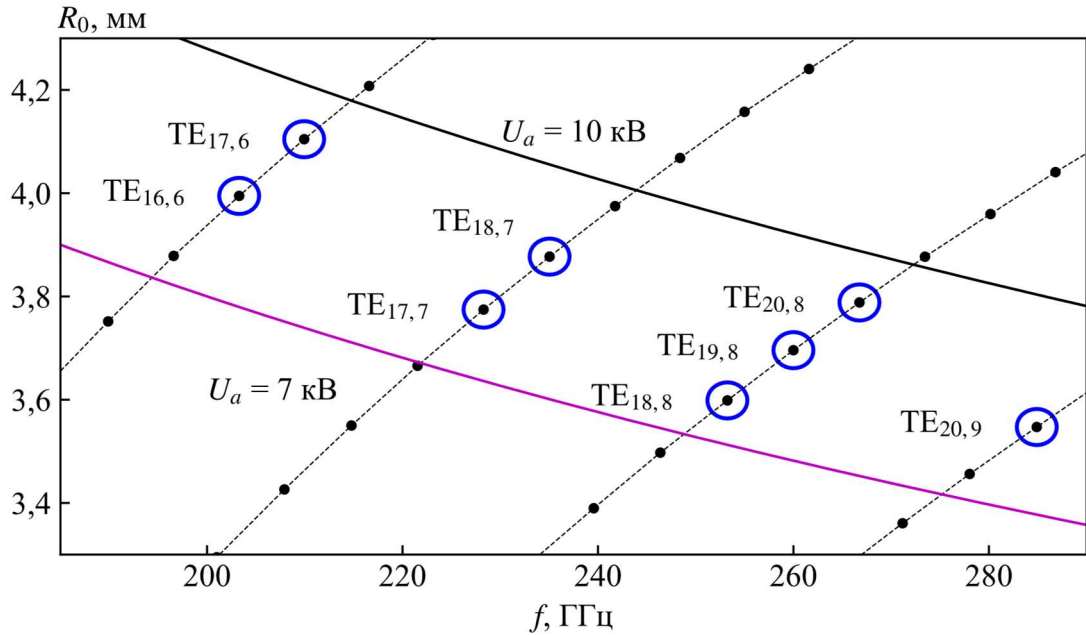


Рисунок 1.4 — Оптимальные радиусы пучка и собственные частоты выбранных мод при ступенчатой перестройке частоты. Пунктирными линиями отмечены моды с разными радиальными индексами, при этом каждой точке соответствует свой азимутальный индекс

1.2.3 Оптимизация параметров гиротрона

Рассмотрим возможности оптимизации гиротрона с перестройкой частоты выходной мощностью на уровне 200 Вт для работы в ранее описанном криомагните JASTEC. Мощность выходного излучения P_{out} и волновой КПД гиротрона η_{out} определяются известными формулами [9]

$$P_{out} = \eta_{out} I_b U_0, \quad (1.6a)$$

$$\eta_{out} = t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c \eta_w Q_{ohm} / (Q_{ohm} + Q_{dif}), \quad (1.6b)$$

где I_b — ток электронного пучка, η_{\perp} и η_c — поперечный КПД и коэффициент преобразования встроенного преобразователя, t_{\perp} — отношение осцилляторной энергии электронов к полной, η_w — коэффициент пропускания выходного окна, Q_{dif} — дифракционная добротность, Q_{ohm} — омическая добротность. Далее параметры η_c , η_w опускаются, в качестве η_{out} рассматривается КПД гиротрона без учёта потерь в системе преобразования и вывода излучения. Омическая добротность Q_{ohm} оценивается по формуле

$$Q_{ohm} = \frac{R_r}{k_{skin} \cdot \delta_{skin}} \left(1 - \frac{m^2}{v_{mp}^2} \right), \quad (1.7)$$

где δ_{skin} — толщина скин-слоя гладкого металла (без шероховатостей), k_{skin} — коэффициент потерь, учитывающий влияние микронеровностей на поверхности резонатора.

Предварительная оптимизация электронно-волнового взаимодействия проведена для одной из мод, принятой за основную, в приближении фиксированной продольной структуры высокочастотного поля [65]. В качестве основной выбрана мода $TE_{19,8}$ с рабочей частотой 260 ГГц. Выбрана одна из самых высокочастотных мод, т. к. для таких мод все проблемы проявляются наиболее заметно. Для устойчивой работы гиротрона выбран питч-фактор (отношение средней осцилляторной скорости к средней продольной скорости) $g = 1,2$. На рисунке 1.5 приведены зависимости КПД, рабочего тока и оптимальной длины резонатора гиротрона с указанной мощностью от ускоряющего напряжения при питч-факторах 1, 1,2 и 1,4. Оптимальным с точки зрения эффективности прибора является ускоряющее напряжение 5 кВ, но при этом осложняется конструирование системы формирования винтового электронного пучка с нужным уровнем тока. Увеличение напряжения до 10 кВ позволяет решить эту проблему при незначительном снижении КПД. Для дальнейших исследований выбрано ускоряющее напряжение 10 кВ. Сравнительно низкое ускоряющее напряжение выбрано для достижения максимальной частоты генерации при условии ограниченной величины магнитного поля (см. (1.1)) и с целью упростить и удешевить систему электропитания и защиту от рентгеновского излучения, что важно для широкой области применения приборов. Для каждой выбранной моды в заданном режиме работы оптимальные длины резонаторов слабо отличаются и находятся в интервале от 24 мм до 32 мм. С одной стороны, согласно расчётам, увеличение длины резонатора позволяет возбудить большее число продольных волн, что в итоге расширяет диапазон плавной перестройки частоты. С другой стороны, рост длины резонатора приводит к повышению доли омических потерь и падению КПД.

На следующем этапе выполнены электродинамические расчёты высокочастотного поля в резонаторе без учёта электронного пучка. Выбранный профиль резонатора, амплитуда и фаза поля моды $TE_{19,8}$ показаны на рисунке 1.6а. Радиус и длина регулярной части резонатора составили 8,97 мм и 30 мм соответственно. В таблице 1.1 приведены собственные частоты и добротности выбранных мод для этого резонатора. Фактор $Q_{ohm}/(Q_{ohm} + Q_{dif})$, определяющий снижение КПД вследствие омических потерь, и оптимальный средний радиус электронных орбит для выбранных мод приведены в таблице 1.1. Коэффициент трансформации выбранных мод в моды с другими поперечными индексами в процессе оптимизации профиля резонатора составил менее 0,1%. Расчёт коэффициентов трансформации мод выполнен методом поперечных сечений [53, 66] в модификации, изложенной в [67–69].

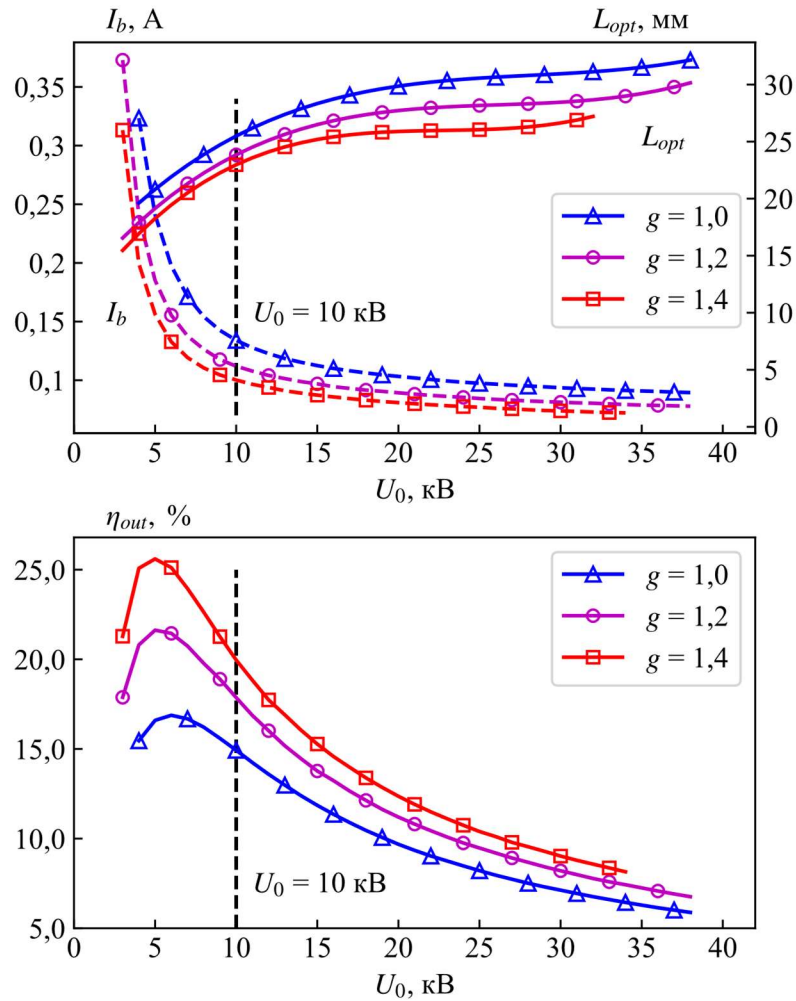


Рисунок 1.5 — Зависимость КПД, рабочего тока и оптимальной длины резонатора от ускоряющего напряжения при питч-факторах $g = 1; 1,2$ и $1,4$ для гиротрона с выходной мощностью 200 Вт при работе на моде $TE_{19,8}$

Дальнейшая оптимизация параметров гиротрона выполнена в рамках самосогласованной стационарной расчётной модели [A5], учитывающей нефиксированную продольную структуру высокочастотных колебаний в резонаторе (см. приложение А). Расчёт выполнен с учётом относительного разброса осцилляторных скоростей в электронном пучке, оцененного в 30%. На рисунке 1.7 изображена расчётная область работы (зона генерации) как зависимость соответствующего тока пучка (в амперах) от магнитного поля. Сплошной линией показаны зоны самовозбуждения мод (стартовый ток), вычисленные по линейной теории. Пунктирными линиями обозначены границы режимов с жёстким возбуждением. Звездой отмечен режим с наибольшим КПД для основной моды. Отметим, что рабочая точка с наибольшим КПД находится в режиме жёсткого возбуждения.

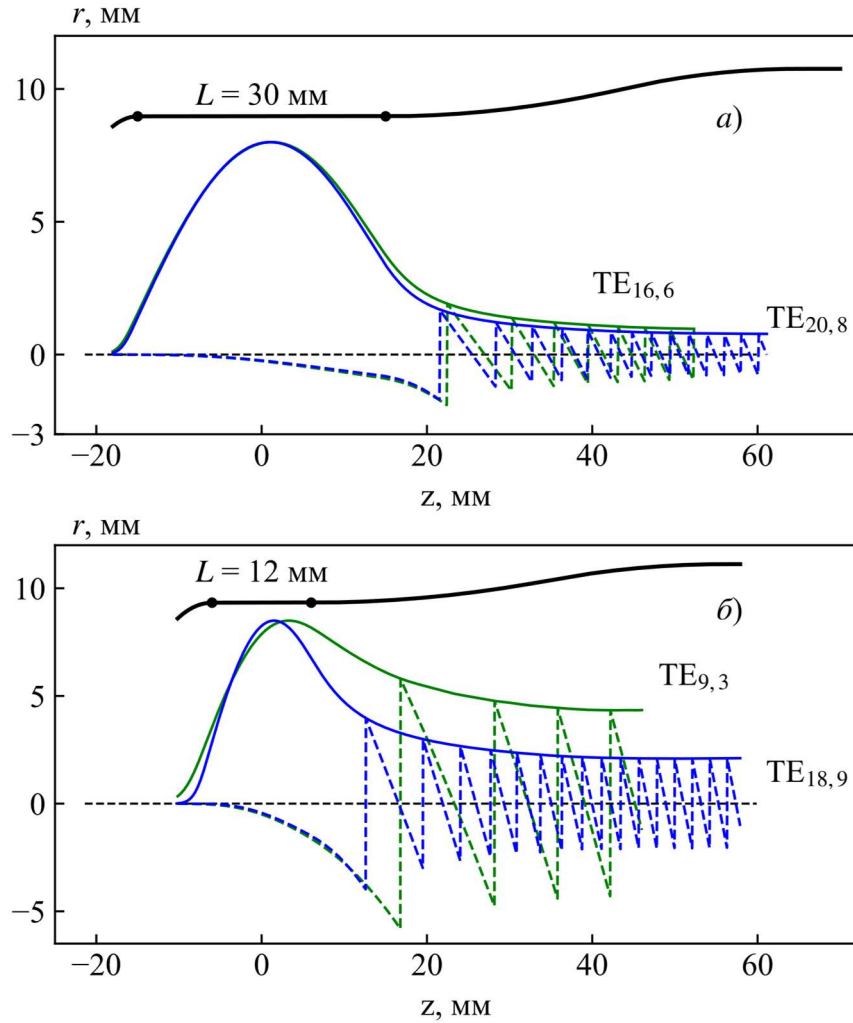


Рисунок 1.6 — Гиротрон для спектроскопии из п. 1.2. Профиль резонатора и продольное распределение амплитуды и фазы, выраженных в относительных единицах, рабочих колебаний на модах $TE_{16,6}$ и $TE_{20,8}$ (а). Гиротрон для диагностики плазмы из п. 1.3. Профиль резонатора и продольное распределение амплитуды и фазы рабочих колебаний на модах $TE_{9,3}$ и $TE_{18,9}$ (б)

Таблица 1.1 Электродинамические характеристики резонатора

| | f , ГГц | Q_{dif} | Q_{ohm} | $\frac{Q_{ohm}}{Q_{ohm} + Q_{dif}}$ | R_0 , мм |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------|------------|
| $TE_{16,6}$ | 203,3 | 11310 | 26140 | 0,70 | 4,00 |
| $TE_{17,6}$ | 210,0 | 12160 | 26240 | 0,68 | 4,11 |
| $TE_{17,7}$ | 228,3 | 14670 | 28320 | 0,66 | 3,78 |
| $TE_{18,7}$ | 235,0 | 15660 | 28430 | 0,65 | 3,88 |
| $TE_{18,8}$ | 253,2 | 18520 | 30320 | 0,62 | 3,60 |
| $TE_{19,8}$ | 260,0 | 19650 | 30430 | 0,61 | 3,70 |
| $TE_{20,8}$ | 266,8 | 20820 | 30540 | 0,60 | 3,79 |

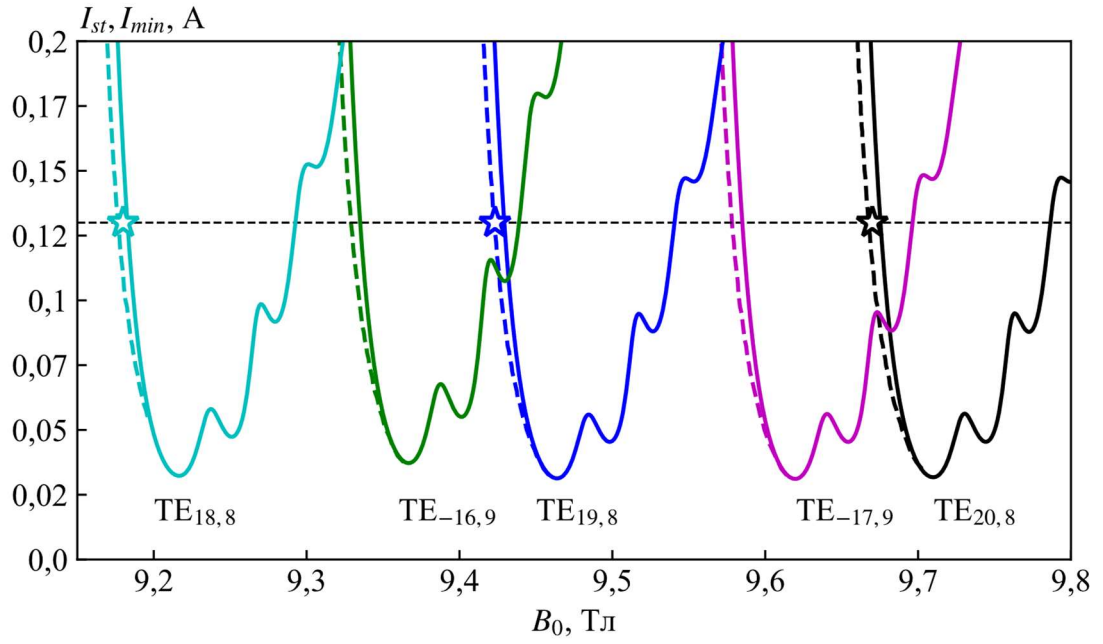


Рисунок 1.7 — Зависимость стартовых токов основной моды $TE_{19,8}$ и соседних мод от магнитного поля

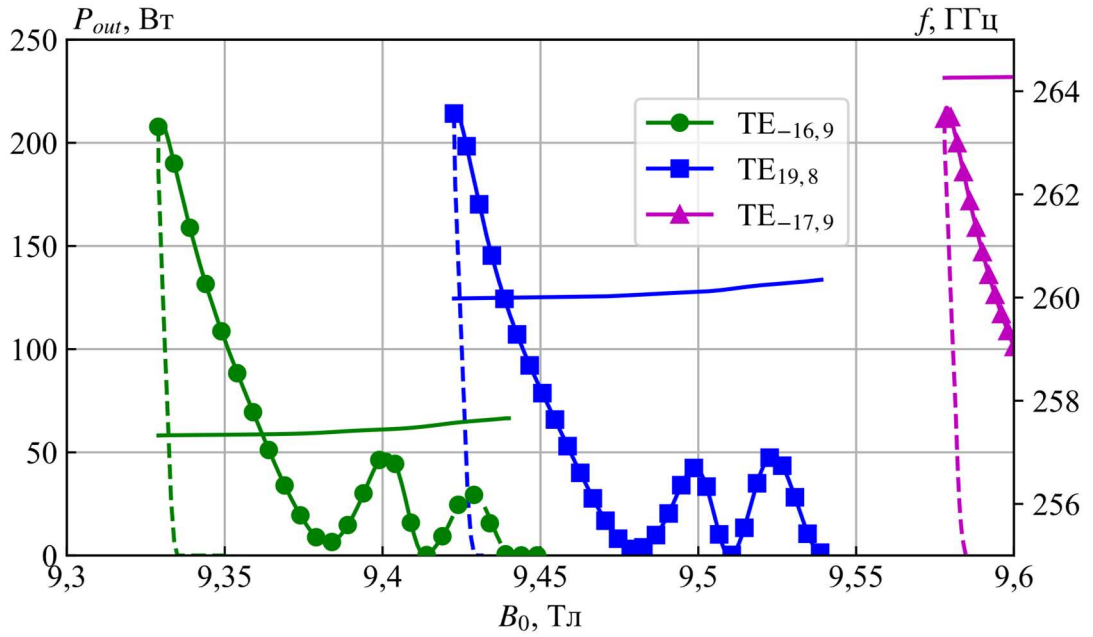


Рисунок 1.8 — Расчётная зависимость мощности и частоты от магнитного поля для основной моды $TE_{19,8}$ и двух соседних мод ($TE_{-16,9}$ и $TE_{-17,9}$)

Таблица 1.2 Основные параметры гиротрона

| | |
|---|--|
| Рабочие моды | TE _{16,6} –TE _{20,8} |
| Частота генерации f , ГГц | 203–267 |
| Мощность выходного излучения P_{out} , Вт | > 200 |
| Ускоряющее напряжение U_0 , кВ | 10 |
| Ток электронного пучка I_b , А | 0,13 |
| Средний питч-фактор электронного пучка g | 1,2 |
| Средний радиус электронного пучка в рабочем пространстве R_0 , мм | 3,6–4,1 |
| Радиус резонатора R_r , мм | 8,97 |
| Длина резонатора L , мм | 30 |
| Доля омических потерь в резонаторе | 30,2–40,5% |
| Рабочее магнитное поле B_0 , Тл | 7,3–10 |

Ширину полосы циклотронного резонанса в гиротроне можно оценить следующим образом:

$$\Delta\omega \approx 1/T_{pass} = v_{\parallel}/L, \quad (1.8)$$

где T_{pass} — время пролёта электронов через резонатор. Вследствие большой длины резонатора в полосу циклотронного резонанса попадает незначительное число мод, что упрощает решение проблемы конкуренции мод в этом гиротроне.

Проведена оценка требований электродинамической системы к погрешностям в процессе изготовления. Допуск на относительное изменение радиуса регулярной части резонатора определялся отклонением дифракционной добротности от проектного значения не более чем на 20%, что определяется условием [70]:

$$\Delta R_r \leq 0,025 \cdot R_r \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2, \quad (1.9)$$

где R_r , L — радиус и длина регулярной части резонатора. Условие слабого изменения стартового тока [71] при изготовлении регулярной части резонатора имеет вид:

$$\Delta R_r \leq \frac{2\pi}{16} 10^{-3} R_r \left(\frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\parallel 0}}\right)^3 \frac{L}{\lambda}. \quad (1.10)$$

Обе оценки дают близкий результат: при изготовлении относительное изменение радиуса резонатора не должно превышать 0,3 мкм. Точность изготовления подобных резонаторов, доступная в настоящее время, составляет 2,5 мкм, при этом относительное изменение радиуса резонатора не превышает 0,2 мкм [31], что делает данное требование выполнимым.

1.2.4 Система формирования электронного пучка

Одной из ключевых задач в разработке гиротронов является проектирование электронно-оптической системы (ЭОС), формирующей винтовой электронный пучок с заданными параметрами. Предварительные оценки ЭОС проводились с помощью адиабатической теории [10]. После предварительных оценок выполнялось уточнение и оптимизация ЭОС при помощи проведения траекторного анализа с целью повышения качества электронного пучка и уменьшения скоростного разброса.

Проектирование ЭОС — многопараметрическая итерационная процедура, которую можно упростить, зафиксировав на начальном этапе один или несколько параметров, например радиус катода. Радиус катода ограничен снизу максимальной допустимой плотностью тока при заданном токе электронного пучка, а сверху — диаметром теплого отверстия криомагнита, поскольку обычно требуется возможность прохода катод-анодного узла через отверстие криомагнита. При этом, максимальная плотность эмиссионного тока с поверхности катода из LaB_6 (обычно используется в гиротронах) не должна превышать 5 А/см^2 . Далее выбирается рабочая напряженность электрического поля на катоде E_c , ограниченная сверху вероятностью электрического пробоя, исходя из требований к питч-фактору пучка, который пропорционален отношению E_c/B_c . При техническом вакууме 10^{-6} – 10^{-7} атм допустимая напряженность поля не превышает 7 кВ/мм . С другой стороны, в случае малой напряжённости электрического поля (менее 2 кВ/мм) бóльшую роль играет пространственный заряд, влияющий на качество электронного пучка поля и ограничивающий максимально достижимый рабочий ток. На следующем шаге при известном распределении поля магнитной системы по заданным радиусу катода и радиусу встрела определяются магнитное поле на катоде B_c и расстояние между катодом и центром криомагнита. В случае, если расчётные параметры электронной пушки или винтового пучка не соответствуют требуемым, вся процедура повторяется с изменённым радиусом катода, напряжённостью электрического поля, питч-фактором или рабочим током с целью оптимизации и поиска компромисса.

Уточнённый траекторный расчёт выполнен при помощи пакета программ ANGEL [72, 73]. Реализованный в нём алгоритм заключается в итерационном решении уравнения Пуассона методом дискретных источников совместно с методом трубок тока [74]. Используемый алгоритм численного траекторного анализа электронных потоков подробно описан, например, в [75–77]; алгоритм по учёту начального разброса приведен в [78, 79]. В качестве ЭОС выбрана МИП триодного типа, позволяющая реализовать гибкое управление параметрами электронного пучка благодаря возможности подстройки напряжения между анодом и катодом. Эскиз триодной электронной пушки, включающий форму электродов, магнитную систему и

траектории электронов, представлен на рисунке 1.9. Основные расчетные параметры ЭОС и электронного пучка приведены в таблице 1.3. После предварительных оценок выбран катод с диаметром 40 мм с относительно узким эмиттером с шириной 1 мм. Эмиттерный сегмент пушки крупным планом показан на рисунке 1.13а.

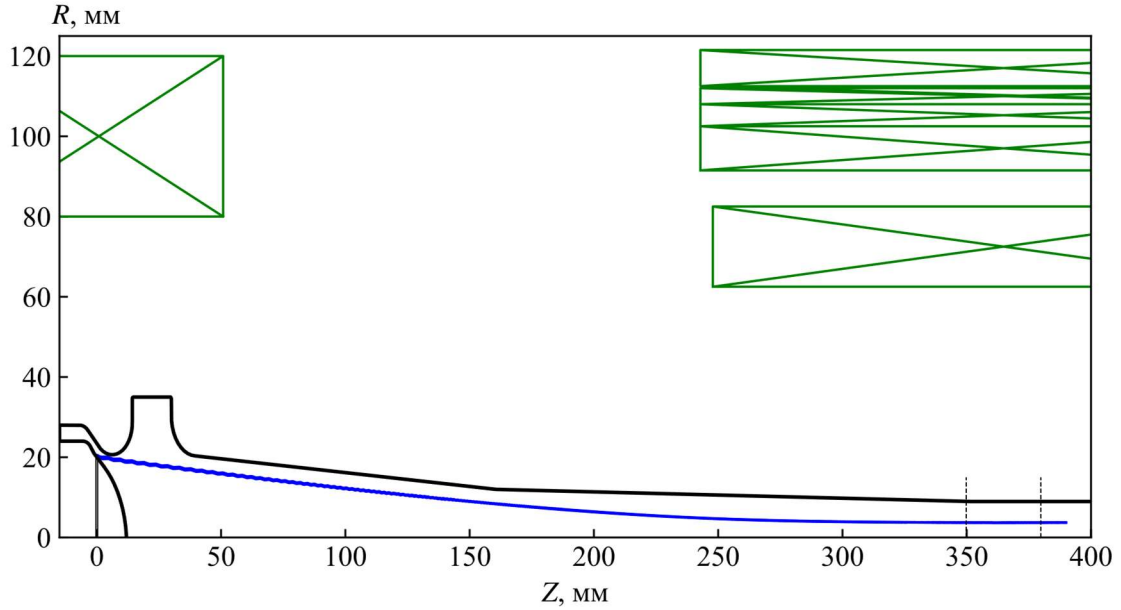


Рисунок 1.9 — Эскиз оптимизированной МИП триодного типа

Таблица 1.3 Основные параметры электронно-оптической системы

| | |
|---|---------------|
| Радиус катода R_c , мм | 20 |
| Расстояние от центра эмиттера до центра магнита, мм | 364,8 |
| Рабочее магнитное поле B_0 , Тл | 7,3–10 |
| Магнитное поле на катоде B_c , Тл | 0,242–0,358 |
| Магнитное поле корректирующей катодной катушки, Тл | до $\pm 0,05$ |
| Ускоряющее напряжение U_0 , кВ | 10 |
| Анодное напряжение U_a , кВ | 7,47–9,4 |
| Электрическое поле на эмиттере, кВ/мм | 2,82–3,56 |
| Ширина эмитирующего пояска l , мм | 1 |
| Плотность тока на эмиттере j , А/см ² | 0,1 |
| Ток электронного пучка I_b , А | 0,13 |
| Коэффициент перемагничивания $\alpha = B_0/B_c$ | 22,56–35,83 |
| Питч-фактор электронного пучка g | 1,2 |

1.2.5 Перестройка частоты генерации

Последовательное возбуждение соседних мод в процессе ступенчатой перестройки частоты выходного сигнала осуществляется при помощи изменения внешнего магнитного поля. В таблице 1.4 указаны рабочие параметры этих мод.

Кроме рассмотренных выше мод, есть возможность возбуждения мод с противоположным относительно электронного пучка вращением поля: TE_{-14,7}, TE_{-15,7}, TE_{-15,8}, TE_{-16,8}, TE_{-17,9}, TE_{-18,9}, и мод, взаимодействующих с электронным пучком на втором максимуме структурного фактора с прямым и обратным вращением: TE_{12,8}, TE_{-10,9}, TE_{13,8}, TE_{-11,9}, TE_{13,9}, TE_{-11,10}, TE_{14,9}, TE_{-12,10}, TE_{14,10}, TE_{-12,11}, TE_{15,10}, TE_{-13,11}. Собственные частоты и оптимальные радиусы пучка в пространстве взаимодействия этих мод указаны в таблице 1.5. Для работы на частотах свыше 270 ГГц требуется криомагнит с магнитной индукцией большей, чем 10 Тл. Так, для оптимального режима работы гиротрона на моде TE_{20,9} требуется поле 10,3 Тл. Замена криомагнита на его промышленно-выпускаемые аналоги с максимальными полями 12 Тл и 13 Тл позволит пропорционально повысить максимально достижимую частоту генерации. Без изменений конструкции гиротрона для повышения рабочей частоты может быть использован криомагнит JASTEC-12T100, имеющий аналогичное продольное распределение магнитного поля.

Таблица 1.4 Параметры гиротрона со ступенчатой перестройкой частоты при токе пучка $I_b = 0,13$ А и ускоряющем напряжении $U_0 = 10$ кВ

| | f , ГГц | P_{out} , Вт | η_{out} , % | U_a , кВ | B_0 , Тл | Δf по уровню 10 Вт в ГГц |
|--------------------|-----------|----------------|------------------|------------|------------|-------------------------------------|
| TE _{16,6} | 203,3 | 237 | 18,2 | 8,2 | 7,37 | 0,17 |
| TE _{17,6} | 210,0 | 232 | 17,9 | 9,2 | 7,61 | 0,16 |
| TE _{17,7} | 228,3 | 229 | 17,6 | 7,8 | 8,27 | 0,34 |
| TE _{18,7} | 235,0 | 222 | 17,1 | 8,8 | 8,52 | 0,33 |
| TE _{18,8} | 253,2 | 211 | 16,2 | 7,5 | 9,18 | 0,34 |
| TE _{19,8} | 260,0 | 208 | 16,0 | 8,4 | 9,42 | 0,33 |
| TE _{20,8} | 266,8 | 199 | 15,3 | 9,4 | 9,70 | 0,33 |
| TE _{20,9} | 285,0 | 170 | 14,1 | 8,2 | 10,3 | 0,47 |

Таблица 1.5 Параметры мод, подходящих для широкополосной перестройки частоты

| | f , ГГц | R_0 , мм | | f , ГГц | R_0 , мм | | f , ГГц | R_0 , мм |
|---------|-----------|------------|---------------------|-----------|------------|----------|-----------|------------|
| TE-14,7 | 207,9 | 3,91 | TE _{12,8} | 211,7 | 3,97 | TE-10,9 | 214,8 | 3,91 |
| TE-15,7 | 214,7 | 4,01 | TE _{13,8} | 218,7 | 4,10 | TE-11,9 | 222,0 | 4,03 |
| TE-15,8 | 232,6 | 3,71 | TE _{13,9} | 236,2 | 3,79 | TE-11,10 | 239,3 | 3,74 |
| TE-16,8 | 239,5 | 3,81 | TE _{14,9} | 243,3 | 3,90 | TE-12,10 | 246,5 | 3,85 |
| TE-17,9 | 264,2 | 3,64 | TE _{14,10} | 260,8 | 3,64 | TE-12,11 | 263,8 | 3,60 |
| TE-18,9 | 271,1 | 3,73 | TE _{15,10} | 267,9 | 3,74 | TE-13,11 | 271,0 | 3,70 |

В случае возбуждения мод с несколькими продольными вариациями амплитуды ВЧ-поля отрицательное поглощение наблюдается в двух зонах углов пролётов электронов, соответствующих взаимодействию электронного пучка с попутной или встречной волной, частоты которых немного отличаются от критической частоты рабочей моды [80]. Диапазон перестройки частоты $\delta\omega$ в этом случае можно оценить по формуле

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 (q^2 - 1), \quad (1.11)$$

где q – продольный индекс рабочей моды в резонаторе. При анализе плавной перестройки частоты, как правило, рассматривается взаимодействие электронного пучка со встречными волнами. Количество продольных мод, возбуждаемых за счёт плавного изменения магнитного поля, главным образом зависит от рабочего тока, от величины разброса осцилляторных скоростей эл. пучка и от протяжённости области электронно-волнового взаимодействия. Так, в выбранном режиме работы гиротрона моды TE_{16,6} и TE_{17,6} по расчётам возбуждаются лишь с одной и двумя продольными вариациями. В случае этих мод выбранная длина резонатора лишь незначительно превосходит минимальную длину, при которой возможна генерация. В случае работы на модах TE_{17,7}, TE_{18,7}, TE_{18,8}, TE_{19,8} и TE_{20,8} возможна генерация мод с тремя продольными вариациями. Диапазон плавной перестройки Δf для данных мод по уровню 10 Вт указан в таблице 1.4. Коэффициент заполненности по уровню 10 Вт, равный отношению суммарного интервала перестройки ко всему рабочему диапазону, для указанных мод с учётом возбуждения мод с несколькими продольными вариациями составил 3,1%. Оценка частотной перестройки по (1.11) слегка превышает результаты, полученные в рамках самосогласованной модели. Диапазон плавной перестройки частоты в данном гиротроне ограничен низким рабочим током, при котором затруднено возбуждение мод с несколькими продольными вариациями.

В гиротронах малой мощности может быть выполнена дополнительная подстройка частоты при помощи управления температурой резонатора (порядка 3–4 МГц/°С). При изменении температуры охлаждающей жидкости на 50 градусов можно осуществить частотную перестройку излучения порядка 200 МГц. Данный способ частотной подстройки позволяет увеличить диапазон плавной перестройки до 0,27 ГГц для мод TE_{16,6} и TE_{17,6} и до 0,44 ГГц для мод TE_{17,7}, TE_{18,7}, TE_{18,8}, TE_{19,8} и TE_{20,8}, при этом коэффициент заполненности увеличится до 4,3%. Такой метод успешно применялся ранее в маломощных гиротронах, разработанных для задач спектроскопии [81, 82]. Необходимым условием практической реализации указанного метода является наличие в конструкции гиротрона возможности свободного расширения резонатора и отдельного контура охлаждения резонатора с возможностью контроля температуры подаваемой жидкости.

1.2.6 Коллектор электронного пучка

Создание коллекторной системы электронного пучка на проектных уровнях мощности гиротрона не представляет серьезных проблем. Для рассматриваемого гиротрона предложен цилиндрический коллектор с диаметром 70 мм, средняя тепловая нагрузка на который составляет 28 Вт/см² (пиковая — 57 Вт/см²), что позволяет обойтись без интенсивного водяного охлаждения.

Дополнительным способом повышения эффективности гиротронов является рекуперация остаточной энергии отработанного электронного пучка после электронно-волнового взаимодействия в изолированном коллекторе с тормозящим напряжением (CPD-коллектор) [83–86]. В этом случае итоговый КПД определяется известным соотношением (см., например, [86]):

$$\eta_{\text{CPD}} = \frac{U_0}{U_0 - U_{\text{ret}}} \eta_{\text{out}}, \quad (1.12)$$

где η_{CPD} — КПД гиротрона с учётом рекуперации, U_{ret} — тормозящее напряжение. Значение тормозящего напряжения ограничено минимальной энергией частиц в отработанном пучке $eU_{\text{ret}} \leq W_{\text{min}}$.

В случае мод с одной продольной вариацией минимальная, согласно расчётам, энергия отработанного электронного пучка, составляет 32% начальной энергии электронов (см. рисунок 1.10). При тормозящем напряжении 3 кВ полный КПД прибора увеличивается с 15,2–18,2% до 21,7–26% (на 40%) соответственно. В случае работы на модах с двумя продольными вариациями, рекуперация энергии отработанного электронного пучка позволяет поднять полный КПД от 2,2–3,7% до 5,5–9,35% (в 2,5 раз) для мод TE_{20,8}–TE_{16,6} соответственно. Кроме повышения КПД и возможности использовать источники питания меньшей мощности, в

гиротроне с рекуперацией снижается уровень потребления охлаждающей жидкости и уменьшается интенсивность рентгеновского излучения от коллектора.

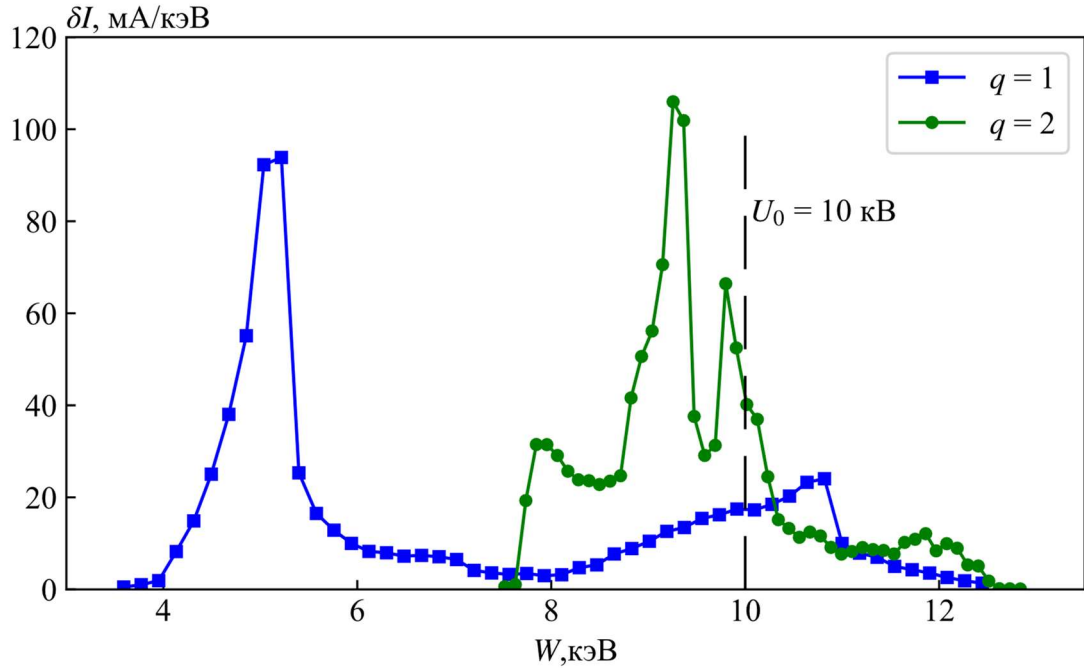


Рисунок 1.10 — Энергетический спектр отработанного электронного пучка для моды $TE_{20,8}$ с одной продольной вариацией (квадраты) и для моды с двумя продольными вариациями (круги).

Начальная энергия электронного пучка $E_0 = 10$ кэВ

1.2.7 Оптимизация выходного окна

Коэффициент отражения от однодискового выходного окна при толщине d с диэлектрической проницаемостью ε определяется выражением [87]

$$|R|^2 = \frac{(1 - \gamma)^2 \cdot \sin^2 \chi}{4\gamma \cdot \cos^2 \chi + (1 + \gamma)^2 \cdot \sin^2 \chi} \quad (1.13)$$

Здесь $\chi = (\omega/c)d\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta}$, $\gamma = (\varepsilon - \sin^2 \Theta)/\cos^2 \Theta$, Θ — угол к нормали падающей на окно волны.

Для гиротронов малой и средней мощности в качестве материала для выходного окна часто используют нитрид бора, так как этот материал существенно дешевле, чем другие материалы, и хорошо освоен [88, 89]. Требуемый уровень пропускания для некоторых частот доступен при использовании однодискового окна из нитрида бора, но для полного перекрытия всего диапазона 0,2–0,27 ТГц полос пропускания такого окна недостаточно. Оптимизированная для семи мод (таблица 1.4) толщина однодискового выходного окна при нормальном падении поперечной электрической волны составила 2,38 мм (см. рисунок 1.11) с наибольшим коэффициентом отражения 27% для моды $TE_{18,8}$. Существенно увеличить коэффициенты пропускания можно при использовании окон с большей толщиной, но подобные окна из

нитрида бора промышленностью не выпускаются. С этой целью может быть использовано выходное окно из лейкосапфира с толщиной 7,7 мм, при котором наибольший коэффициент отражения по мощности среди семи выбранных мод составит 11%. Кроме этого, снизить коэффициенты отражения можно путем добавления просветляющей пластинки. В этом случае приемлемая тепловая нагрузка на выходном окне позволяет в процессе эксплуатации менять просветляющую пластинку при переходе на соседнюю рабочую моду, и, таким образом, значительно снизить коэффициент отражения для каждой моды.

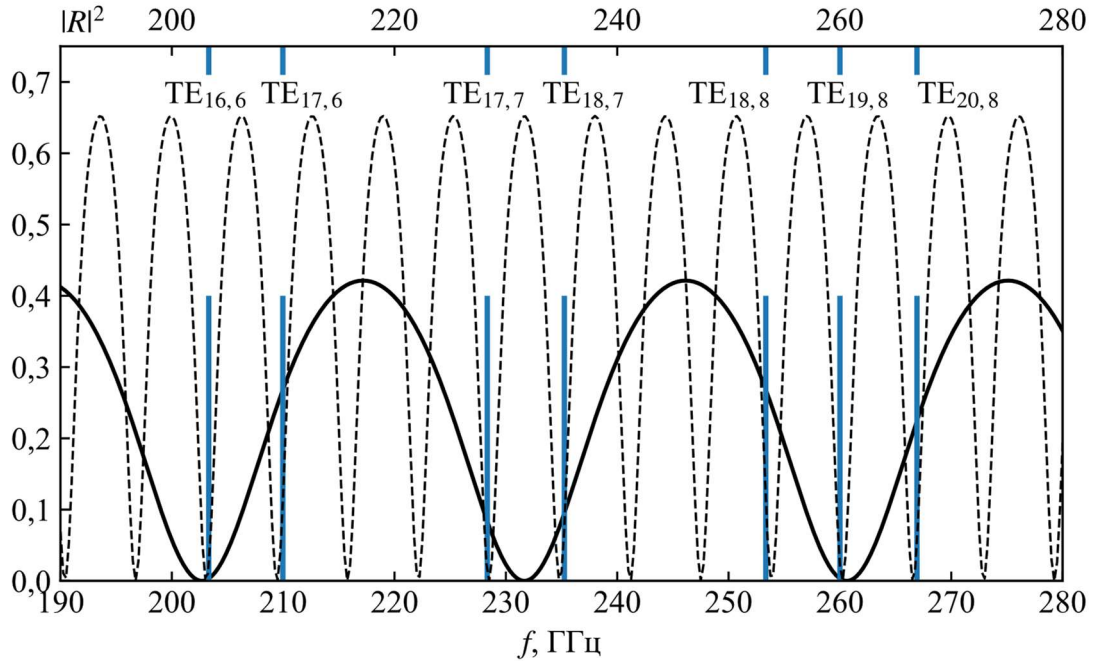


Рисунок 1.11 — Зависимость коэффициентов отражения от частоты излучения для однодискового окна из нитрида бора с толщиной 2,38 мм (сплошная линия) и окна из лейкосапфира с толщиной 7,7 мм (пунктир). Толщина выходного окна оптимизирована для семи мод

1.3 Частотно-перестраиваемый гиротрон высокой мощности, ограниченный свойствами магнитной системы

1.3.1 Возможности по расширению диапазона перестройки частоты в гиротронах высокой мощности

Рассмотренный в параграфе 1.2 подход реализации ступенчатой широкополосной перестройки частоты может быть применен и в гиротронах высокой мощности. Для примера рассмотрим гиротрон, работающий на первой гармонике циклотронной частоты в интервале частот 0,1–0,26 ТГц с мощностью выходного излучения до 260 кВт [A2]. В работе исследовалась возможность расширения диапазона перестройки частоты путём комплексной оптимизации параметров электронно-оптической системы и электродинамической систем. Данное исследование выполнено параллельно разработке гиротрона [90], имеющего похожие рабочие параметры.

При оптимизации гиротрона с учётом приемлемой удельной тепловой нагрузки (до 2,5 кВт/см²) и ограничений, налагаемых криомагнитом JASTEC-10T100, определены рабочие параметры: ускоряющее напряжение до 50 кВ, ток электронного пучка до 12 А. Для эффективного перекрытия частотного диапазона 0,1–0,26 ТГц выбрана последовательность мод от TE_{9,3} до TE_{18,9}. Данные моды выделены кружочками на рисунке 1.12, на котором указаны оптимальные радиусы электронных пучков и собственные частоты мод гиротрона. Для изменения среднего радиуса ведущих орбит электронного пучка в рабочем пространстве рассматривается корректирующую катушка с максимальным магнитным полем в области катода до ±0,06 Тл. Причем, рассматривается триодная схема магнетронно-инжекторной пушки, позволяющая управлять параметрами ВЭП изменением анодного напряжения. Сплошные линии на рисунке 1.12, полученные из (1.2) при анодном напряжении 20 кВ и 50 кВ, ограничивают область работы гиротрона. При понижении анодного напряжения заметную роль начинает играть пространственный заряд. Пересечение области, ограниченной возможностями корректирующей катушки, и области, где требуемое анодное напряжение находится в диапазоне от 20 кВ до 50 кВ при оптимальной закрутке электронного пучка, определяет перечень мод для анализа дискретной перестройки.

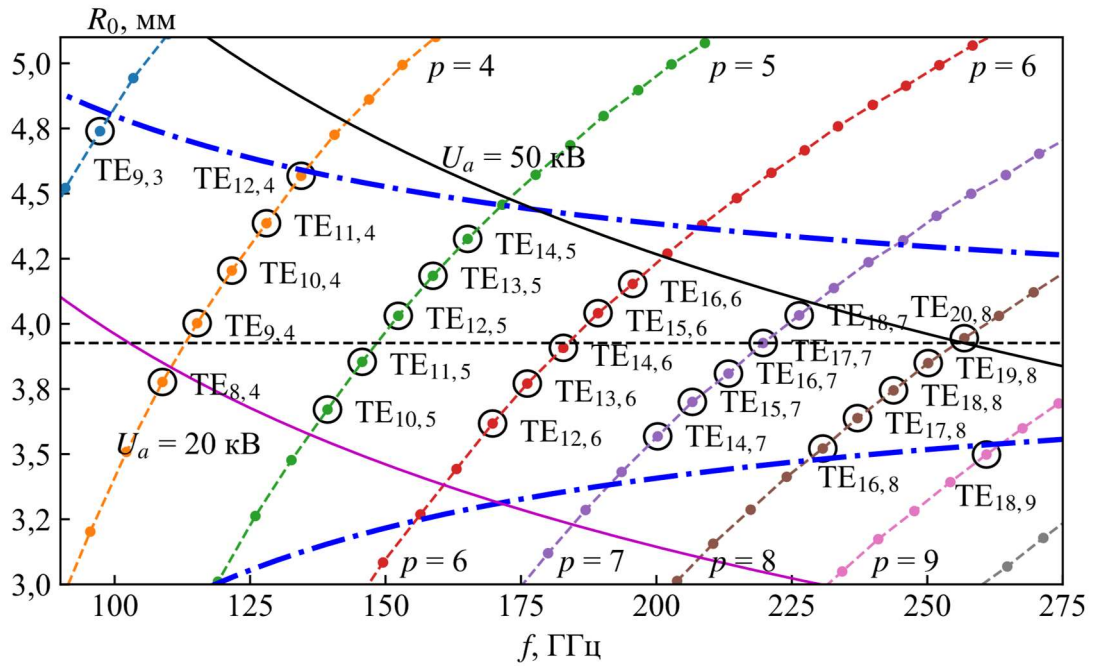


Рисунок 1.12 — Оптимальные радиусы пучка и частоты рабочих мод. Штрихпунктирные линии ограничивают область работы корректирующей катушки с максимальным полем до 0,06 Тл.

Сплошные линии ограничивают область работы триодной МИП

1.3.2 Моделирование магнетронно-инжекторной пушки

Серьезной проблемой при разработке МИП для мощного частотно-перестраиваемого гиротрона с высокими рабочими токами является разброс осцилляторных скоростей электронов, приводящий к появлению отражённого тока. Как правило, значительный вклад в скоростной разброс вносит поле пространственного заряда, особенно при формировании интенсивных электронных пучков. Таким образом, важным фактором при моделировании МИП в гиротронах с высокой мощностью выходного сигнала является влияние поля пространственного заряда на параметры и качество электронного пучка. Для описания роли пространственного заряда введем параметр t_j , равный отношению тока пучка к току Чайльда-Ленгмюра в квазипланарном немагнитном диоде (см., напр., [10]):

$$t_j = \frac{I}{2,33 \cdot 10^{-6}} \frac{d^2}{2\pi R_c l U_a^{3/2}}. \quad (1.14)$$

Здесь d — расстояние между катодом и анодом, l — ширина эмитирующего пояса. Данный параметр характеризует степень влияния поля пространственного заряда на качество электронного пучка. Как правило, электронные пушки гиротронов работают в Т-режиме (с током, ограниченным температурой катода) при $t_j \leq 0,2$. Диапазон широкополосной перестройки частоты главным образом лимитирован ростом параметра t_j при уменьшении анодного напряжения. В рамках адиабатической теории из (1.14) легко получить

$$t_j \sim I \frac{\sqrt{t_\perp} \sqrt{U_0}}{R_0 l} \frac{1}{E_c^2}, \quad (1.15)$$

где E_c — напряженность электрического поля вблизи эмиттера катода. Таким образом, одним из очевидных способов уменьшения влияния пространственного заряда в области формирования электронного пучка является увеличение напряжённости электрического поля E_c . При этом для достижения выбранного питч-фактора $g \sim E_c/B_c$ необходимо увеличить магнитное поле на катоде, что можно сделать при помощи смещения катода в сторону магнитной системы и уменьшения его диаметра. В этом случае, основным ограничением на рост электрического поля на катоде и, соответственно, на диаметр катода становится возможность электрического пробоя, вероятность которого значительна при $E_c > 7$ кВ/мм. Кроме того, с уменьшением размеров катода растёт плотность тока с эмиттера. Другой способ уменьшить параметр t_j — увеличение ширины эмитирующего пояска, и тем самым снижение плотности тока эмиссии, но при этом электронный пучок в пространстве взаимодействия должен быть достаточно тонким для обеспечения приемлемой эффективности взаимодействия и селекции рабочей моды.

В ходе численного моделирования рассматривался вариант электронной пушки с длинным носиком катода и относительно длинным анодом. Такой профиль электродов позволяет получить плавно меняющееся электрическое поле в области катода и, таким образом, уменьшить влияние неадиабатических эффектов при формировании электронного пучка для мод с низкими рабочими частотами. Такая пушка способна создавать пучки с заданными характеристиками в широком диапазоне магнитных полей.

Радиус катода R_c по адиабатической теории [10] может быть оценен по формуле

$$R_c = 1,23 R_0 t_\perp^{1/6} B_0^{1/3} E_c^{-1/3} U_0^{1/6}. \quad (1.16)$$

В (1.16) используются единицы измерения мм, кГц, кВ, кВ/мм. По (1.16) радиус катода из-за увеличения ускоряющего напряжения следует увеличить в сравнении с ЭОС гиротрона для спектроскопии из п. 1.2. В ходе оптимизации ЭОС выбран катод диаметром 44 мм с шириной эмитирующего пояска 5 мм, при этом плотность тока сравнительно невелика и составляет $j \approx 1,7$ А/см², а электрическое поле на катоде находится в пределах от 2,14 кВ/мм для моды TE_{8,4} до 6,31 кВ/мм в случае моды TE_{20,8}. Угол наклона эмитирующего пояска катода к силовым линиям магнитного поля зависит от рабочей моды и находится в интервале 27,4–30,4 градусов, что соответствует формированию ламинарных пучков. В [91] уже отмечалось, что МИП с ламинарным электронным пучком благоприятны для реализации широкополосной дискретной перестройки частоты в гиротронах. Эскиз триодной электронной пушки, включая форму электродов и траектории электронов для крайних по рабочей частоте мод TE_{9,3} и TE_{18,9},

представлен на рисунке 1.13б. Основные расчетные параметры МИП и формируемого электронного пучка приведены в таблице 1.6. Дополнительно в таблице 1.6 и на рисунке 1.13 приведены параметры и показан эскиз МИП для маломощного субтерагерцового частотно-перестраиваемого гиротрона из параграфа 1.2. Из таблицы следует, что параметры ЭОС гиротронов с разным уровнем мощности существенно отличаются, даже при работе в одном и том же частотном диапазоне, одинаковых рабочих мод и при использовании одинаковых криомагнитов. В ходе расчётов учитывался разброс начальных скоростей, вызванный наличием шероховатости эмиссионной поверхности.

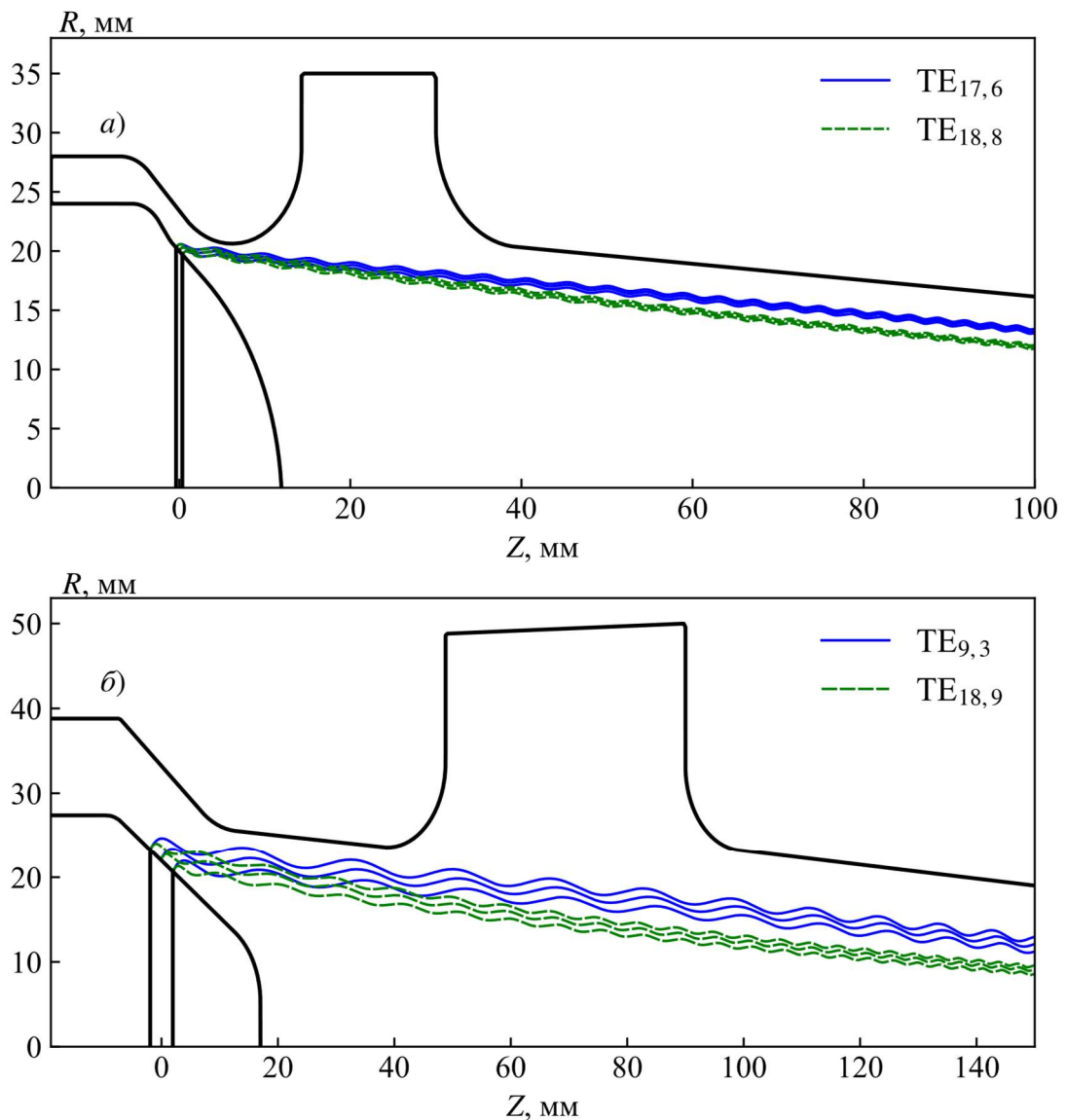


Рисунок 1.13 — Гиротрон для спектроскопии из п. 1.2. Эскиз электронной пушки и электронные траектории для эффективного взаимодействия с модами $TE_{17,6}$ и $TE_{18,8}$ (а)
Гиротрон для диагностики плазмы из п. 1.3. Эскиз электронной пушки и электронные траектории для эффективного взаимодействия с модами $TE_{9,3}$ и $TE_{18,9}$ (б)

Таблица 1.6 Основные параметры электронной пушки

| | Частотно- перестраиваемый гиротрон с мощностью до 200 Вт | Частотно- перестраиваемый гиротрон с мощностью до 260 кВт |
|--|---|--|
| Радиус катода R_c , мм | 20 | 22 |
| Рабочее магнитное поле, Тл | 7,3–10 | 3,71–10 |
| Анодное напряжение U_a , кВ | 7,47–9,4 | 19,2–50 |
| Электрическое поле на эмиттере E_c , кВ/мм | 2,82–3,56 | 2,22–6,31 |
| Ширина эмитирующего пояса, мм | 1 | 5 |
| Плотность тока на эмиттере j , А/см ² | 0,1 | 1,7 |
| Коэффициент перемагничивания α | 22,56–35,83 | 21,6–39,7 |
| Питч-фактор электронного пучка g | 1,2 | 1,15–1,25 |
| Отн. разброс осц. скоростей δV_{\perp} | до 20% | 20–25% |

1.3.3 Результаты численного моделирования электронно-волнового взаимодействия

Профиль резонатора и продольная структура крайних по частоте рабочих мод $TE_{9,3}$ и $TE_{18,9}$ после оптимизации показаны на рисунке 1.6б. На рисунке 1.14 показана зависимость стартовых токов моды $TE_{19,8}$ и соседних мод от магнитного поля (сплошные линии). Штриховыми линиями показаны границы режима жёсткого возбуждения. Как видно из рисунка 1.14 зоны генерации соседних мод сильно перекрываются, что приводит к существенному обострению проблемы конкуренции мод по сравнению с частотно-перестраиваемым гиротроном малой мощности из п. 1.2. Результаты расчетов электронно-волнового взаимодействия гиротрона приведены на рисунках 1.15, 1.16 и в таблице 1.7. Эффективность работы гиротрона составила 20–44% в зависимости от рабочей моды, при этом мощность выходного излучения для большей части мод превысила 200 кВт (см. рисунок 1.16а). На рисунке 1.15, как пример, показаны расчётные зависимости мощности выходного излучения от частоты генерации для основной моды $TE_{19,8}$ и двух соседних мод ($TE_{-16,9}$ и $TE_{-17,9}$). Диапазон плавной перестройки Δf для рабочих мод по уровню 100 кВт указан в таблице 1.7. Для всех рабочих мод омическая добротность оказалась значительно больше дифракционной, из чего следует, что омические потери не существенно влияют на уменьшение выходного КПД.

В случае мод $TE_{19,8}$, $TE_{20,8}$, $TE_{18,9}$ основным ограничением на уровень выходной мощности является высокая тепловая нагрузка на стенку резонатора (см. рисунок 1.16б), которая снижалась до приемлемого уровня 2,5 кВт/см² путём корректировки анодного

напряжения, при этом расчётный питч-фактор пучка уменьшался с 1,25 до 1,15, а расчётная выходная мощность снижалась не более чем на 10%. При работе на модах $TE_{9,3}$, $TE_{8,4}$, $TE_{9,4}$ из-за недостаточной длины пространства взаимодействия мощность выходного излучения при оптимальном магнитном поле снижается до 120 кВт с волновым КПД около 20%. В случае мод, работающих на меньших частотах, растёт влияние пространственного заряда. Так, при работе моды $TE_{8,4}$ параметр t_j согласно (1.12) достигает значения 0,225.

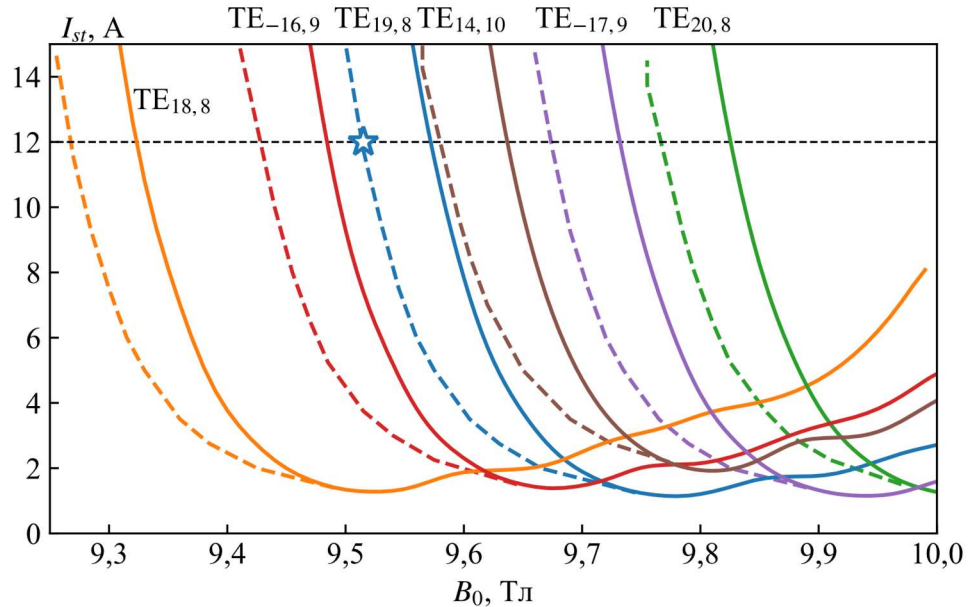


Рисунок 1.14 — Зоны генерации моды $TE_{19,8}$ и соседних мод. Сплошные линии показаны стартовые токи в зависимости от магнитного поля, пунктир — границы режима жёсткого возбуждения

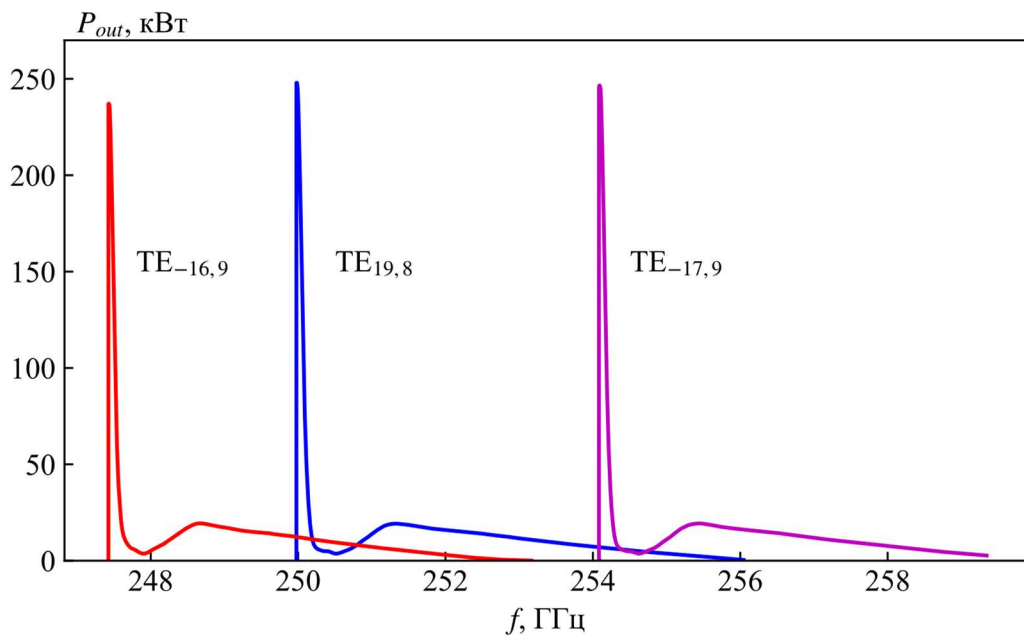


Рисунок 1.15 — Расчётная зависимость мощности от частоты генерации для основной моды $TE_{19,8}$ и двух соседних мод ($TE_{16,9}$ и $TE_{17,9}$)

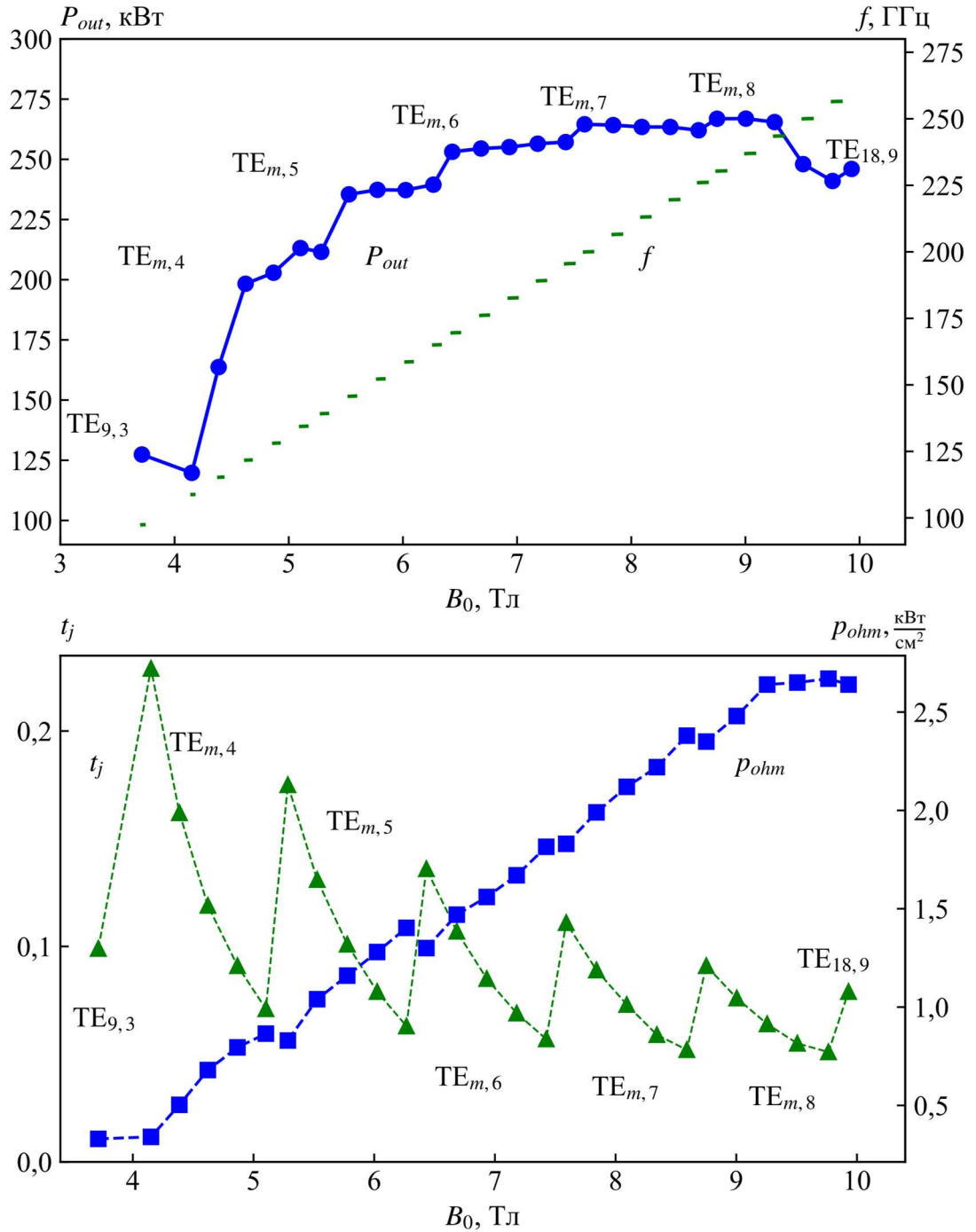


Рисунок 1.16 — Зависимость мощности выходного излучения (круги) и рабочей частоты от магнитного поля. (а); параметр t_j (треугольники) и удельная тепловая нагрузка (квадраты) в зависимости от магнитного поля (б). $TE_{m,i}$ — моды с радиальным индексом i из таблицы 1.7

Таблица 1.7 Параметры гиротрона для выбранных рабочих мод при токе пучка $I_b=12$ А и ускоряющем напряжении $U_0=50$ кВ

| | R_0 , мм | f , ГГц | η_{out} , % | P_{out} , кВт | B_0 , Тл | Δf по уровню 100кВт в МГц | U_a , кВ | E_c , кВ/мм |
|--------------------|---------------|-----------|------------------|--------------------|------------|--------------------------------------|---------------|------------------|
| TE _{18,9} | 3,5 | 260,9 | 41,0 | 246 | 9,93 | 90 | 37,7 | 4,69 |
| TE _{20,8} | 3,94 | 256,7 | 40,2 | 241 | 9,77 | 94 | 50,0 | 6,31 |
| TE _{19,8} | 3,84 | 250,2 | 41,3 | 248 | 9,52 | 106 | 48,3 | 6,09 |
| TE _{18,8} | 3,74 | 243,6 | 44,2 | 265 | 9,27 | 106 | 43,3 | 5,43 |
| TE _{17,8} | 3,64 | 237,1 | 44,4 | 266 | 9,02 | 108 | 38,6 | 4,81 |
| TE _{16,8} | 3,53 | 230,5 | 44,7 | 268 | 8,77 | 108 | 34,3 | 4,24 |
| TE _{18,7} | 4,03 | 226,2 | 43,7 | 261 | 8,61 | 106 | 50,0 | 6,31 |
| TE _{17,7} | 3,93 | 219,7 | 43,9 | 263 | 8,36 | 107 | 45,4 | 5,71 |
| TE _{16,7} | 3,81 | 213,2 | 43,5 | 260 | 8,11 | 109 | 39,9 | 4,98 |
| TE _{15,7} | 3,69 | 206,6 | 43,9 | 263 | 7,86 | 116 | 34,8 | 4,31 |
| TE _{14,7} | 3,56 | 200,1 | 44,1 | 265 | 7,605 | 110 | 30,2 | 3,69 |
| TE _{16,6} | 4,15 | 195,6 | 42,0 | 252 | 7,44 | 116 | 47,2 | 5,95 |
| TE _{15,6} | 4,03 | 189,2 | 42,8 | 257 | 7,19 | 112 | 41,3 | 5,17 |
| TE _{14,6} | 3,90 | 182,7 | 42,5 | 255 | 6,95 | 115 | 36,0 | 4,47 |
| TE _{13,6} | 3,76 | 176,2 | 42,4 | 255 | 6,7 | 112 | 30,9 | 3,79 |
| TE _{12,6} | 3,61 | 169,6 | 42,2 | 253 | 6,45 | 111 | 26,3 | 3,18 |
| TE _{14,5} | 4,32 | 165,0 | 40,6 | 243 | 6,28 | 89 | 44,0 | 5,53 |
| TE _{13,5} | 4,18 | 158,6 | 40,0 | 240 | 6,03 | 86 | 37,8 | 4,71 |
| TE _{12,5} | 4,02 | 152,2 | 39,8 | 289 | 5,79 | 94 | 32,0 | 3,94 |
| TE _{11,5} | 3,86 | 145,7 | 39,2 | 235 | 5,54 | 104 | 27,0 | 3,27 |
| TE _{10,5} | 3,68 | 139,2 | 35,3 | 212 | 5,29 | 97 | 22,5 | 2,67 |
| TE _{12,4} | 4,56 | 134,4 | 35,5 | 213 | 5,11 | 105 | 40,7 | 5,10 |
| TE _{11,4} | 4,39 | 128,0 | 34,3 | 206 | 4,87 | 86 | 34,5 | 4,28 |
| TE _{10,4} | 4,20 | 121,6 | 33,1 | 198 | 4,63 | 98 | 28,7 | 3,51 |
| TE _{9,4} | 4,00 | 115,2 | 27,3 | 164 | 4,38 | 76 | 23,7 | 2,83 |
| TE _{8,4} | 3,77 | 108,7 | 20,0 | 120 | 4,13 | 43 | 19,2 | 2,22 |
| TE _{9,3} | 4,73 | 97,3 | 21,1 | 127 | 3,70 | 59 | 32,6 | 4,03 |

1.3.4 Выбор стартового сценария

В условиях сильной конкуренции мод в резонаторе важным является процесс выхода параметров пучка в стационарный режим работы гиротрона (так называемый сценарий включения) [92]. Условие самовозбуждения автоколебаний в гиротроне в пространстве параметров I_b, B_0, U_0, U_a , определяется неравенством

$$I_b < I_{st}(B_0, U_0, U_a). \quad (1.17)$$

Далее рассмотрим режимы включения моды $TE_{19,8}$ при магнитном поле $B_0 = 9,52$ Тл. Как правило, при конкуренции мод, в процессе подачи напряжений в гиротроне устанавливаются одномодовые автоколебания той моды, которая ранее других попадает в область самовозбуждения [92]. Расчёты показали, что включение системы в режиме (I), при котором анодное напряжение в процессе включения пропорционально ускоряющему напряжению, (см. рисунок 1.17) может привести к возбуждению паразитной моды. В случае подачи анодного напряжения при постоянном ускоряющем напряжении возбуждается соседняя мода с противоположным вращением (III). Для эффективного возбуждения нужной моды требуется промежуточный сценарий включения, например, режим включения с постоянной разностью потенциалов между анодом и резонатором (II). При рассмотрении различных способов включения предполагалось, что в процессе включения меняются только анодное и ускоряющее напряжения при оптимальном магнитном поле. При этом питч-фактор менялся по формуле [93]

$$g = \sqrt{\frac{g_0^2 \cdot U_a^2 U_{00}}{U_{a0}^2 U_0 + g_0^2 (U_{a0}^2 U_0 - U_a^2 U_{00})}}, \quad (1.18)$$

где g_0, U_{00}, U_{a0} — питч-фактор, ускоряющее и анодное напряжение в стационарном рабочем режиме.

Области самовозбуждения соседних мод чувствительны к слабому изменению радиуса электронного пучка в резонатор. Так, при увеличении радиуса встрела на 0,15 мм ($\lambda/8$) области самовозбуждения мод $TE_{14,10}$ и $TE_{-16,9}$ значительно уменьшаются. Области самовозбуждения при увеличении радиуса электронного пучка на 0,15 мм выделены на рисунке 1.17 пунктирными линиями. На рисунке 1.18 показаны стартовые сценарии при радиусе встрела 3,85 мм (оптимальный для моды $TE_{19,8}$ радиус пучка) и 4 мм. В первом случае конкуренцию выигрывает соседняя мода $TE_{-16,9}$ с электронным КПД около 25%. В случае небольшого увеличения радиуса влета электронного пучка в рабочем пространстве расчёт показывает стабильную генерацию рабочей моды $TE_{19,8}$ с электронным КПД более 40%.

Таким образом, устойчивая генерация на выбранной моде может быть получена при включении гиротрона и в режиме I, при этом выбор неоптимального радиуса пучка 4 мм практически не влияет на эффективность электронно-волнового взаимодействия.

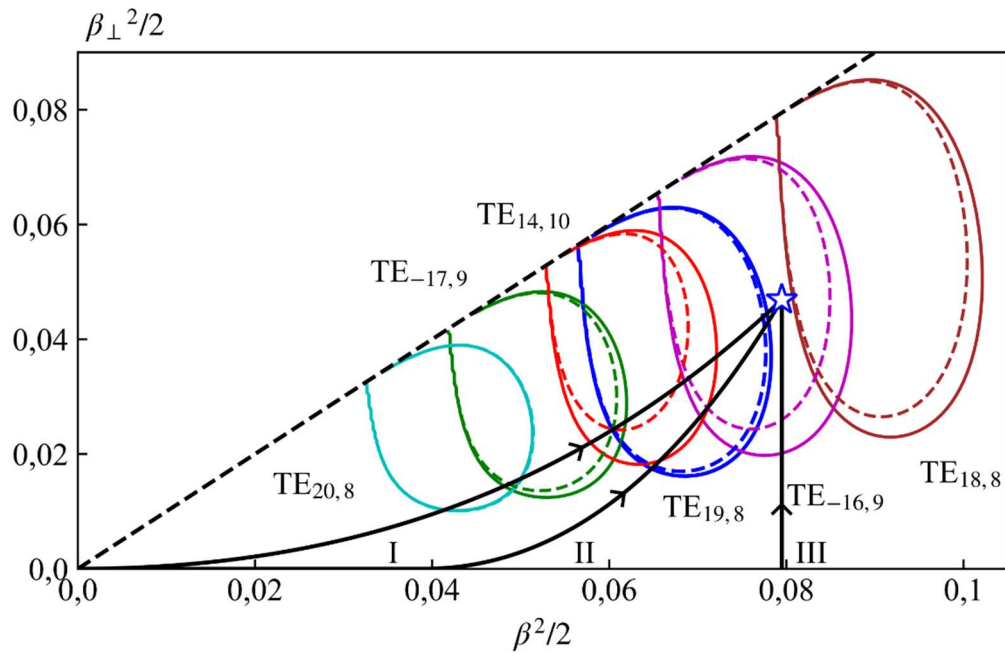


Рисунок 1.17 — Области самовозбуждения рабочей моды $TE_{19,8}$ и соседних мод при $B_0 = 9,52$ Тл. На оси ординат отложено $\beta_{\perp}^2/2 \sim U_a^2$, на оси абсцисс — $\beta^2/2 \sim U_0$

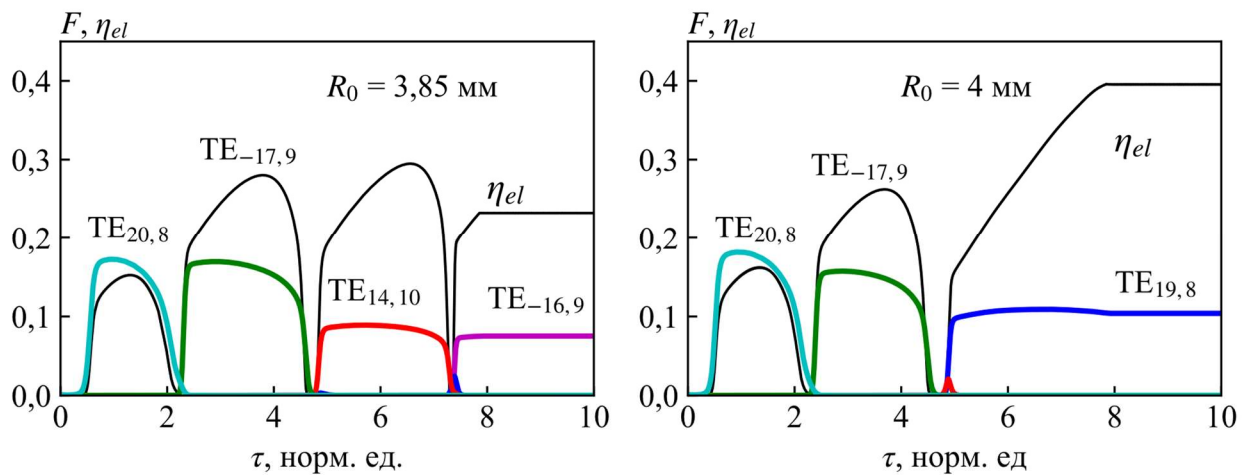


Рисунок 1.18 — Стартовый сценарий гиротрона при радиусе встречи 3,85 мм (слева) и 4 мм (справа). Диодный режим, $B_0 = 9,52$ Тл

1.3.5 Коллекторная система

Далее рассматривалась возможность повышения эффективности гиротрона путём одноступенчатой рекуперации остаточной энергии отработанного электронного пучка. На рисунке 1.19 показан расчётный энергетический спектр электронного пучка после выхода из

пространства взаимодействия при работе на модах $TE_{11,5}$ и $TE_{8,4}$, соответствующих случаям с наибольшей и наименьшей величиной W_{min} (W_{min} — минимальная энергия частиц в отработанном пучке). Для исключения отражения электронов от коллектора при работе на всех выбранных модах выбрано тормозящее напряжение 15 кВ. Таким образом, при одноступенчатой рекуперации можно повысить эффективность гиротрона с 20–44% до 29–64% соответственно.

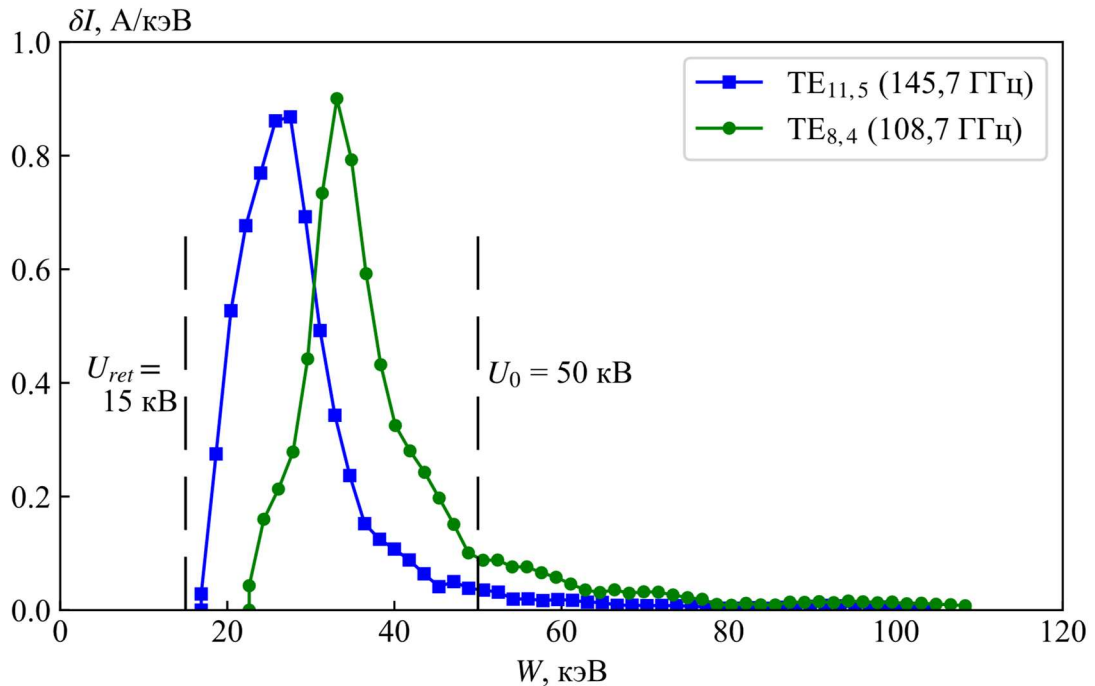


Рисунок 1.19 — Энергетический спектр отработанного электронного пучка для мод $TE_{11,5}$ и $TE_{8,4}$

Для работы в квазинепрерывном и непрерывном режимах средняя плотность мощности, рассеиваемая на коллекторе, не должна превышать 0,5–0,8 кВт/см². Оценки проведены для режима с наибольшей тепловой нагрузкой на коллектор, то есть при отсутствии генерации. Рассмотрены два варианта коллектора с диаметрами 250 мм и 150 мм. В цилиндрическом коллекторе с диаметром 250 мм площадь оседания пучка составляет около 1000 см². Этот коллектор сравнительно прост в изготовлении, устойчив к искажениям магнитных полей, но имеет слишком большие размеры, ограниченные снизу высокой плотностью мощности потока электронов. Для уменьшения размеров коллектора при сохранении приемлемой удельной тепловой нагрузки одним из применяемых способов является формирование дополнительного статического магнитного поля при помощи аксиально-симметричных намотанных на коллектор катушек, увеличивающих эффективную область осаждения электронного пучка [94, 95]. Дополнительная возможность уменьшения удельной тепловой нагрузки связана с использованием коллектора конического профиля. Использование комбинации этих подходов

позволяет уменьшить максимальный внутренний диаметр коллектора до 150 мм. На рисунке 1.20 изображено распределение силовых линий вблизи коллектора с дополнительными катушками (штрихпунктирные линии) и без них (штриховые линии). При этом используются две катушки с одним источником питания, создающие магнитное поле до 0,02 Тл. Площадь осаждения пучка в этой системе составляет около 2600 см², а пиковая тепловая нагрузка составляет около 0,53 кВт/см² без рекуперации и 0,32 кВт/см² с рекуперацией при выборе для каждой рабочей моды оптимального магнитного поля дополнительных катушек, соответствующего эффективному осаждению электронного пучка на коллектор. Распределение тепловой мощности на стенках коллекторов 250 мм и 150 мм показано на рисунке 1.21.

Таблица 1.8 Параметры коллекторных систем

| | Коллектор маломощного гиротрона из параграфа 1.2 | Цилиндрический коллектор гиротрона с мощностью до 260 кВт | Конический коллектор гиротрона с мощностью до 260 кВт |
|--|---|---|---|
| Диаметр коллектора, мм | 70 | 250 | 150 |
| Пиковая тепловая нагрузка, кВт/см ² | 0,057 | 1 | 0,53 |
| Средняя тепловая нагрузка, кВт/см ² | 0,028 | 0,6 | 0,23 |
| Площадь оседания пучка, см ² | 46 | 1000 | 2600 |

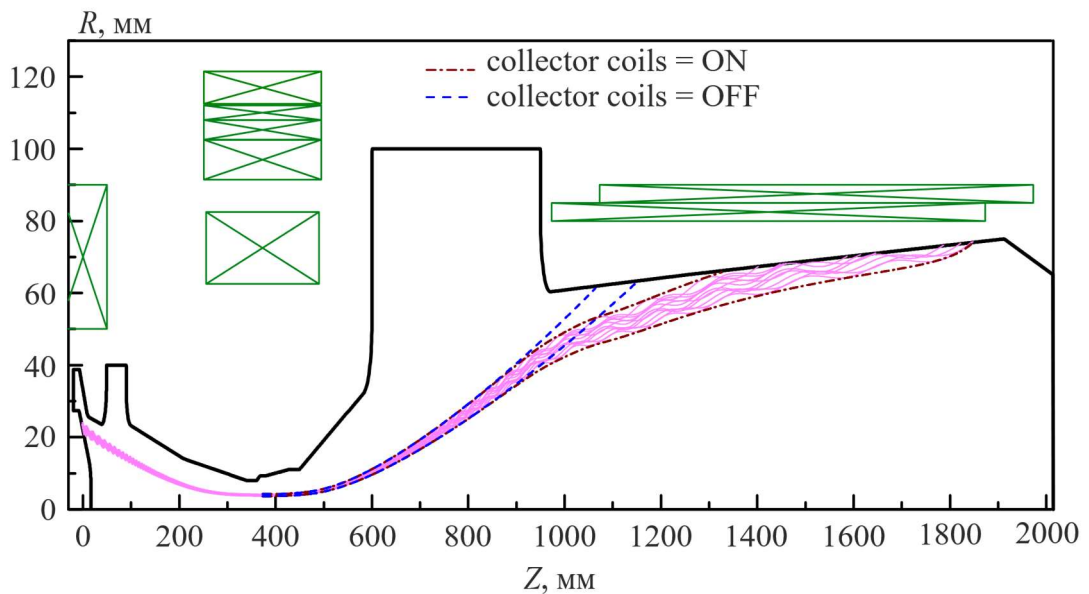


Рисунок 1.20 — Эскиз электронно-оптической системы гиротрона

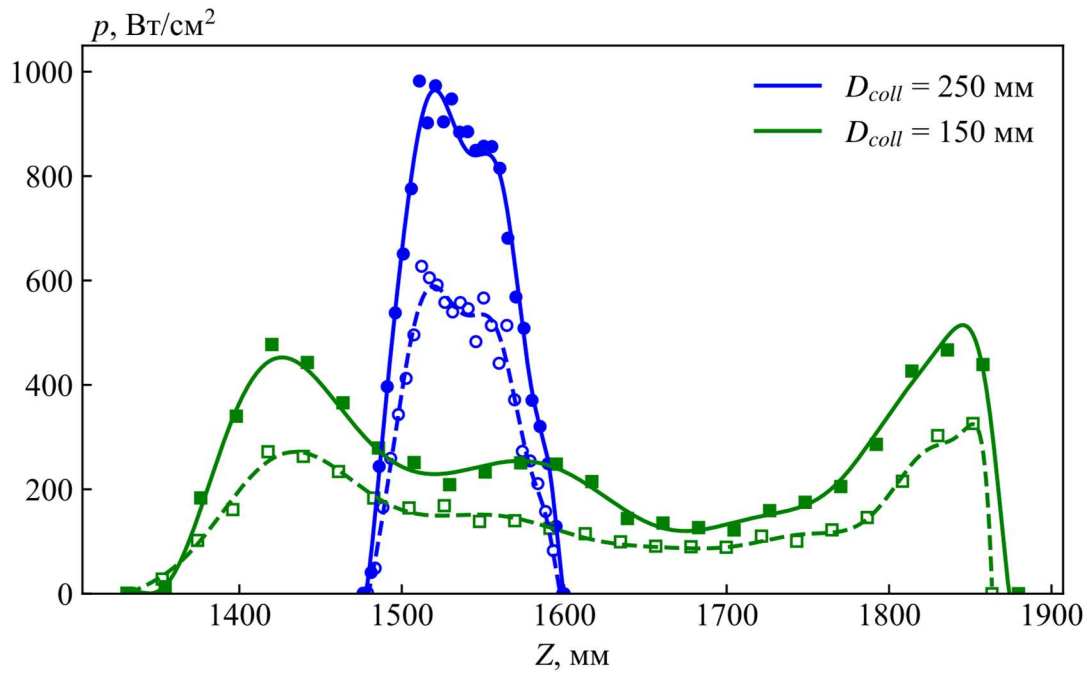


Рисунок 1.21 — Распределения плотности мощности на стенках коллектора для двух вариантов коллекторов с диаметрами 250 мм (круги) и 150 мм (квадраты) без учёта (сплошная линия) и с учётом (пунктир) рекуперации при работе на моде $TE_{17,7}$

1.4 Экспериментальное исследование широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне

1.4.1 Постановка задачи и выбор мод для экспериментов

С целью анализа возможности реализации широкополосной дискретной перестройки выполнен эксперимент [А3] на базе имеющегося в ИПФ РАН гиротронного комплекса с частотой 250 ГГц и мощностью до 330 кВт [90], предназначенного для нагрева плазмы и исследования томсоновского рассеяния в установках управляемого термоядерного синтеза. Рассматриваемый гиротрон работает на моде $TE_{19,8}$ с ускоряющим напряжением 55 кВ и рабочим током электронного пучка до 12,5 А. В ходе исследования рассматривались моды как с попутным вращением (направление азимутального вращения моды круглого волновода совпадает с направлением вращения электронов в магнитном поле), так и с обратным вращением. Управление положением электронного пучка в пространстве взаимодействия с целью эффективного возбуждения соседних мод осуществлялось при помощи дополнительной корректирующей катушки, расположенной вблизи катода. В качестве примера, рассматривается целесообразность использования катодных катушек с максимальным полем 0,03 Тл и 0,06 Тл.

Магнетронно-инжекторная электронная пушка данного гиротрона выполнена по диодной схеме. Такая схема позволяет дополнительно управлять средним пич-фактором электронного

пучка лишь при помощи изменения ускоряющего напряжения. Такой подход для отдельных мод приводит к существенному уменьшению мощности выходного излучения. Собственные частоты f и оптимальные радиусы ведущих центров электронных орбит R_0 для базовой моды $TE_{19,8}$ и для соседних мод приведены на рисунке 1.22. Звездой указан номинальный режим моды $TE_{19,8}$ без корректирующей катушки. Штрихпунктирные линии показывают возможности катушек подмагничивания с полем до 0,03 Тл и 0,06 Тл. Сплошные линии на рисунке 1.22 ограничивают область работы гиротрона [90] в диодном режиме с ускоряющим напряжением от 27 кВ до 55 кВ при постоянном значении питч-фактора $g = 1,1$. Согласно оценкам, при напряжении 27 кВ параметр t_j приближается к значению 0,2, которое было выбрано как максимально допустимое. При увеличении напряжения (выше 55 кВ) растет тепловая нагрузка на стенку резонатора. Поэтому для работы на модах, расположенных на рисунке выше линии с напряжением 55 кВ, ускоряющее напряжение задавалось равным 55 кВ, при этом питч-фактор определялся адиабатической теорией и был ниже оптимального.

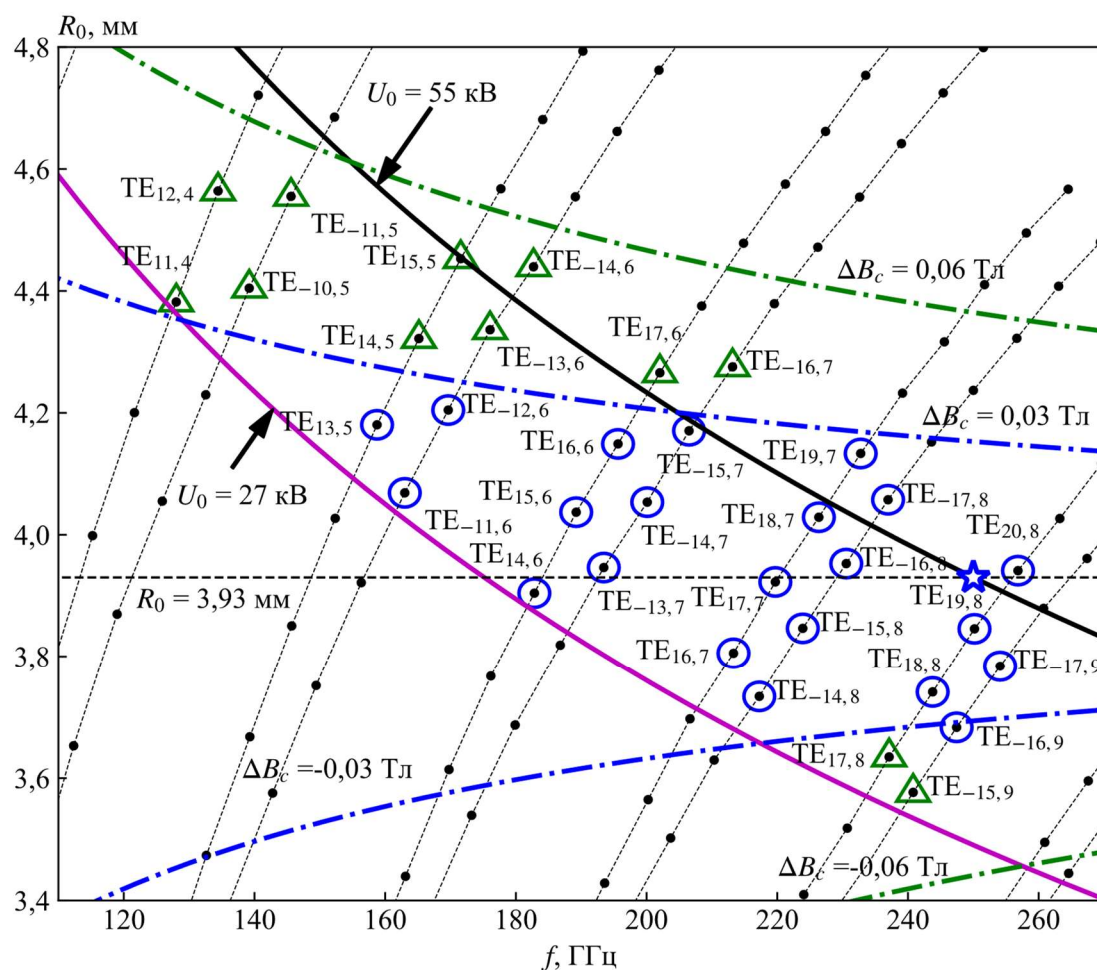


Рисунок 1.22 — Собственные частоты и оптимальные радиусы ведущих центров электронных орбит рабочих мод

Для исследования перспектив использования корректирующей катушки с максимальным полем 0,03 Тл выбрано 22 моды. В случае катушки с максимальным полем 0,06 Тл дополнительно рассматривалось ещё 12 мод. Кругами на рисунке обозначены моды, выбранные для анализа дискретной перестройки частоты при использовании катодной катушки с 0,03 Тл, треугольниками — моды, которые дополнительно учтены в случае использования корректирующей катушки с максимальным полем 0,06 Тл.

1.4.2 Результаты численного моделирования экспериментальной системы

Далее было выполнено численное моделирование электронно-волнового взаимодействия электронного пучка с последовательностью мод резонатора гиротрона. Расчётная зависимость максимальной мощности выходного излучения от частоты генерации для двух вариантов гиротрона с разными корректирующими катушками представлена на рисунке 1.23. Расчётный КПД гиротрона составил 23–43% в зависимости от рабочей моды. Мощность выходного излучения в численном моделировании для большей части мод превысила 100 кВт. Параметры электронного пучка определялись по адиабатической теории на основе геометрии существующей электронно-оптической системы. Расчётный диапазон перестройки частоты составил 158,5–256,5 ГГц и 128–256,5 ГГц при использовании корректирующей катодной катушки с максимальным полем $\pm 0,03$ Тл и $\pm 0,06$ Тл соответственно. При этом «коэффициент заполненности» полосы перестройки по уровню 20 кВт, равный отношению суммарного интервала перестройки ко всему рабочему диапазону, составил 5,2% и 5,5%. Рисунок 1.23 показывает максимально достижимые мощности излучения с учетом возможностей электронно-оптической и магнитной систем гиротронного комплекса [90], но без учёта системы вывода излучения.

В работе рассматривался лишь случай оптимального положения электронного пучка в пространстве взаимодействия, при этом не учитывались моды, для которых оптимальный радиус электронного пучка орбит не достижим. За счёт возбуждения мод, взаимодействующих с электронным пучком с неоптимальным для них радиусом встречи, «коэффициент заполненности» может быть дополнительно увеличен.

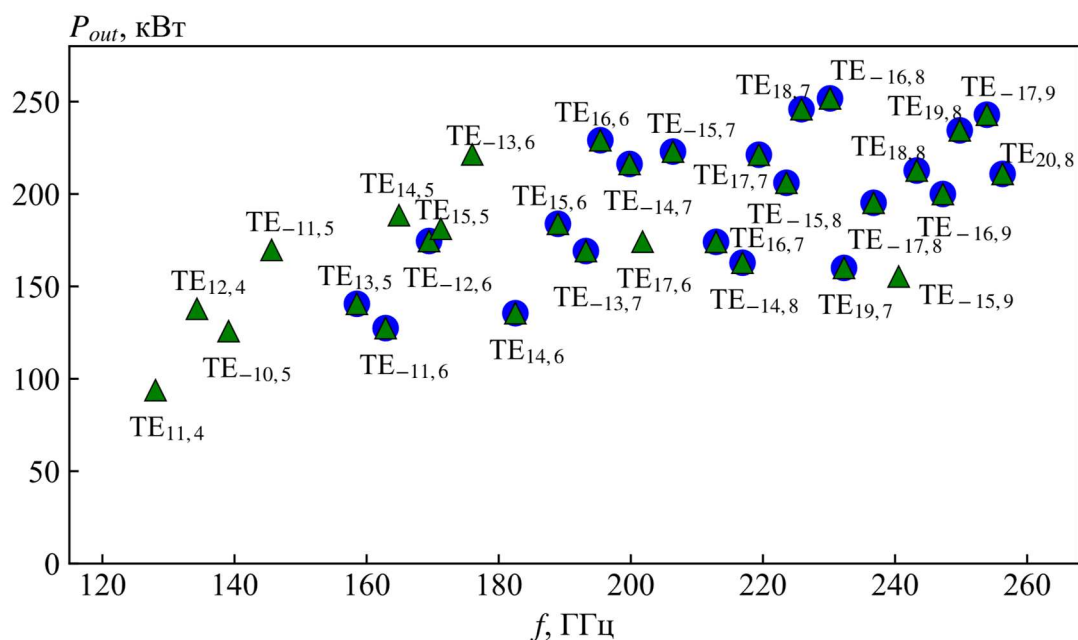


Рисунок 1.23 — Расчётные зависимости максимальной мощности выбранных мод от частоты генерации для двух вариантов гиротрона с разными корректирующими катушками с максимальным полем 0,03 и 0,06 Тл

1.4.3 Результаты экспериментов и их обсуждение

Следующим этапом стала экспериментальная верификация выполненного моделирования. Общий вид исследуемого гиротрона показан на фото на рисунке 1.24. В ходе эксперимента на катод гиротрона подавалось полное ускоряющее напряжение от импульсного модулятора с длительностью импульсов 40 мкс и частотой повторения 10 Гц.

Для коррекции распределения магнитного поля разработана и изготовлена дополнительная катушка, размещенная в области катода. Катушка намотана медным проводом диаметром 1,7 мм, имеет 22x18 витков с внутренним проходным диаметром 110 мм для возможности технического обеспечения высоковольтной изоляции. Максимальное поле в центре катушки составляет 0,03 Тл при токе $I_{cc} = 10$ А и потребляемой мощности 170 Вт. Положительный ток, поданный на катушку, приводил к увеличению магнитного поля вблизи катода при работе на модах с со-направленным пучку азимутальным вращением (например, мода TE_{19,8}) и, следовательно, к росту среднего радиуса пучка в резонаторе. Для корректного вывода излучения мод с различным направлением азимутального вращения полярности полей криомагнита и катодной катушки менялись на противоположные. Относительно малая мощность магнита позволила обеспечить достаточное его охлаждение при помощи обдува катушки потоком воздуха из вентилятора.

Система вывода излучения гиротрона состоит из профилированного квазиоптического

преобразователя и однодискового выходного окна из нитрида бора с толщиной 3,13 мм. Профиль и положение зеркал квазиоптического преобразователя были оптимизированы для рабочей моды $TE_{19,8}$ и в процессе эксперимента не менялись. Отличие каустик различных мод, выбранных для экспериментального исследования, от каустики рабочей моды $TE_{19,8}$ приводило к ухудшению их прохождения через преобразователь и отличию профиля пучка на окне от гауссова распределения. Используемое в гиротроне выходное окно обеспечивает минимальные коэффициенты отражения на частоте 250 ГГц. При этом в остальных случаях является не согласованным (рисунок 1.25), при этом наличие отражений от выходного окна может приводить к различным нежелательным эффектам. Среди таких эффектов следует отметить снижение мощного выходного излучения, обострение конкуренции мод, появление нестационарного режима генерации [96]. Для экспериментальной проверки были выбраны 10 мод с коэффициентами отражения по мощности менее 10% с целью избежать неустойчивых режимов генерации и исключить возможность повреждения прибора.



Рисунок 1.24 — Общий вид гиротрона с рабочей частотой 250 ГГц, установленного в криомагните [90]

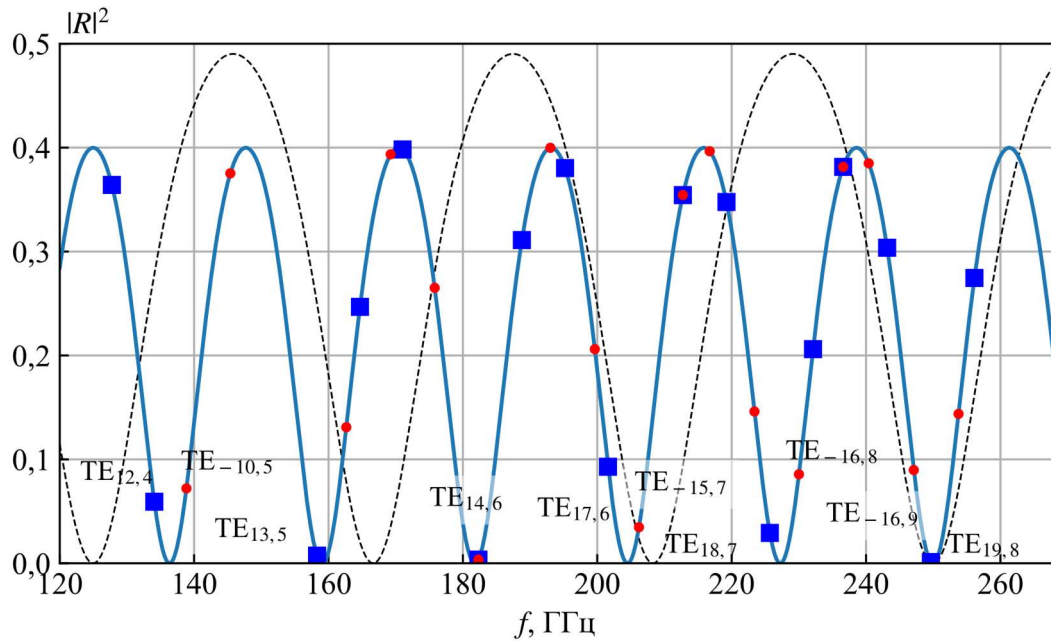


Рисунок 1.25 — Зависимость коэффициента отражения по мощности однодискового окна из нитрида бора (сплошная линия) и из CVD-алмаза (пунктир) от частоты выходящего излучения. Синими квадратами указаны моды с попутным вращением, красными точками — с обратным вращением относительно эл. пучка

Для достижения максимальной мощности для каждой моды измерения выполнялись при разных напряжениях U_0 и токе катушки подмагничивания I_{cc} . Ток катушки менялся в интервале от -10 А до $+10$ А с шагом в 1 А. В каждом из режимов проводилось сканирование по ведущему магнитному полю B_0 со скоростью 0,024 Тл/мин, и определялась максимальная мощность для данной конфигурации. Измерения выполнялись при постоянном токе пучка $I_b = 12,5$ А без нарушения его качества. После определения оптимального тока катушки подмагничивания и поля криомагнита, соответствующего максимальной выходной мощности, были сняты осциллограммы ускоряющего напряжения и рабочего тока. Измерение тока электронного пучка производилось при помощи пояса Роговского с чувствительностью 50 мВ/А, измерение ускоряющего напряжения — высоковольтным делителем NorthStar PVM-5. Измерение мощности выходного излучения выполнялось водяным калориметром, частоты излучения — анализатором спектра Agilent N9010A и гармоническим смесителем производства НИИПП, г. Томск. Анализатор спектра работал в режиме «zero span», при этом его центральная частота менялась с целью обнаружения высокочастотного импульса. На рисунке 1.26 представлены типичные кривые высокого напряжения и тока вместе с сигналом, зарегистрированным анализатором спектра на центральной частоте 246,9 ГГц для моды $TE_{16,9}$, возбуждаемой при $U_0 = 45$ кВ, $I_b = 12,5$ А, $B_0 = 9,366$ Тл и токе катушки подмагничивания — 6 А.

В проведенных экспериментах были продемонстрированы возбуждение и устойчивая генерация всех выбранных мод. После оптимизации достигнутая максимальная мощность выходного излучения для выбранных мод составила от 38 до 190 кВт в широком (почти на октаву) диапазоне частот 133–250 ГГц. Полученные результаты представлены в таблице 1.9. На рисунке 1.27 показаны измеренные зависимости мощности выходного излучения от основного магнитного поля. Уровень мощности выходного излучения и измеренная частота излучения согласуется с расчётными данными. Следует отметить, что даже при использовании катодной катушки с максимальным полем 0,03 Тл, было продемонстрировано возбуждение мод, для которых оптимальное положение электронного пучка достижимо лишь при использовании катушки с полем 0,06 Тл. Это позволяет в дальнейшем учитывать не только моды с оптимальной связью электронного пучка, но и моды с меньшей связью, что позволит увеличить «коэффициент заполненности» в полосе перестройки частоты.

Для анализа возможности увеличения коэффициента заполненности по частоте при помощи оптимизации системы вывода излучения (с использованием двустороннего квазиоптического преобразователя и широкополосного окна) были сняты серии кривых выходной мощности в широком диапазоне магнитного поля. На рисунке 1.28 показан пример показаний калориметра при плавном изменении магнитного поля без регулировки ускоряющего напряжения или положения электронного пучка. На рисунке наблюдается последовательное возбуждение мод с разным направлением азимутального вращения.

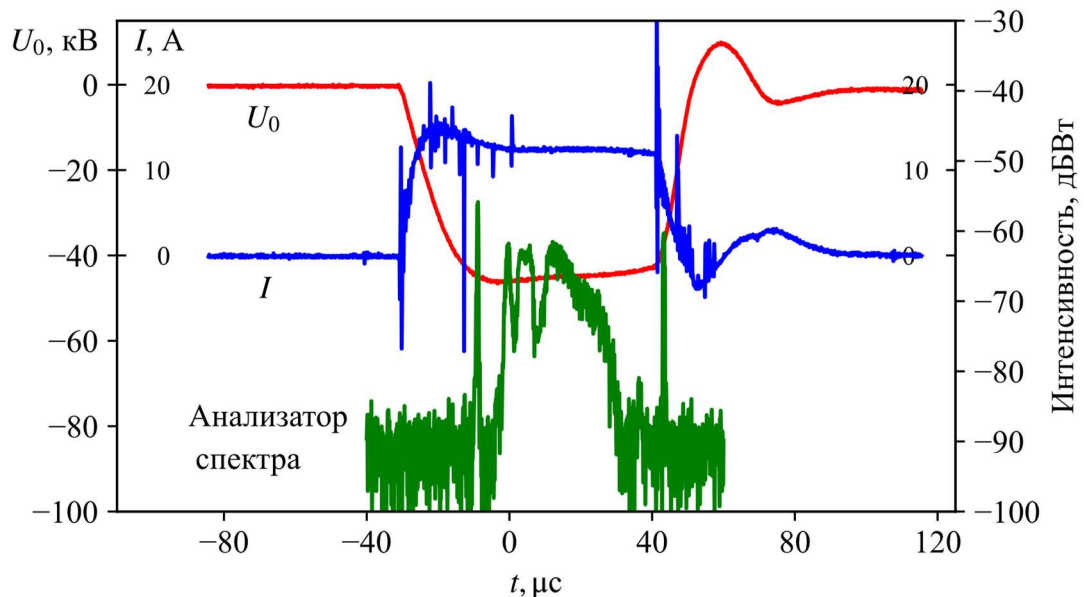


Рисунок 1.26 — Характерная осциллограмма ускоряющего напряжения и тока пучка при возбуждении моды $TE_{16,9}$. Пример сигнала, зарегистрированного анализатором спектра на частоте 246,9 ГГц представлен зелёной кривой

Таблица 1.9 Результаты измерений

| Рабочие моды | B_0 , Тл | U_0 , кВ | Ток катодной катушки I_{cc} , А | Выходная мощность, кВт | f , ГГц |
|---------------------|------------|------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|
| TE _{19,8} | 9,63 | 55 | -3 | 182,5 | 249,45 |
| TE _{-16,9} | 9,37 | 45 | -6 | 105 | 246,9 |
| TE _{-16,8} | 8,86 | 55 | 2 | 150 | 229,8 |
| TE _{18,7} | 8,7 | 55 | 1 | 190 | 225,56 |
| TE _{-15,7} | 7,93 | 55 | 5 | 172,5 | 205,98 |
| TE _{17,6} | 7,76 | 55 | 6 | 167,5 | 201,35 |
| TE _{14,6} | 6,8 | 35 | 3 | 82,5 | 182,23 |
| TE _{13,5} | 5,93 | 40 | 7 | 140 | 158,1 |
| TE _{-10,5} | 5,13 | 30 | 6 | 45 | 138,5 |
| TE _{12,4} | 4,97 | 30 | 6 | 37,5 | 133,9 |

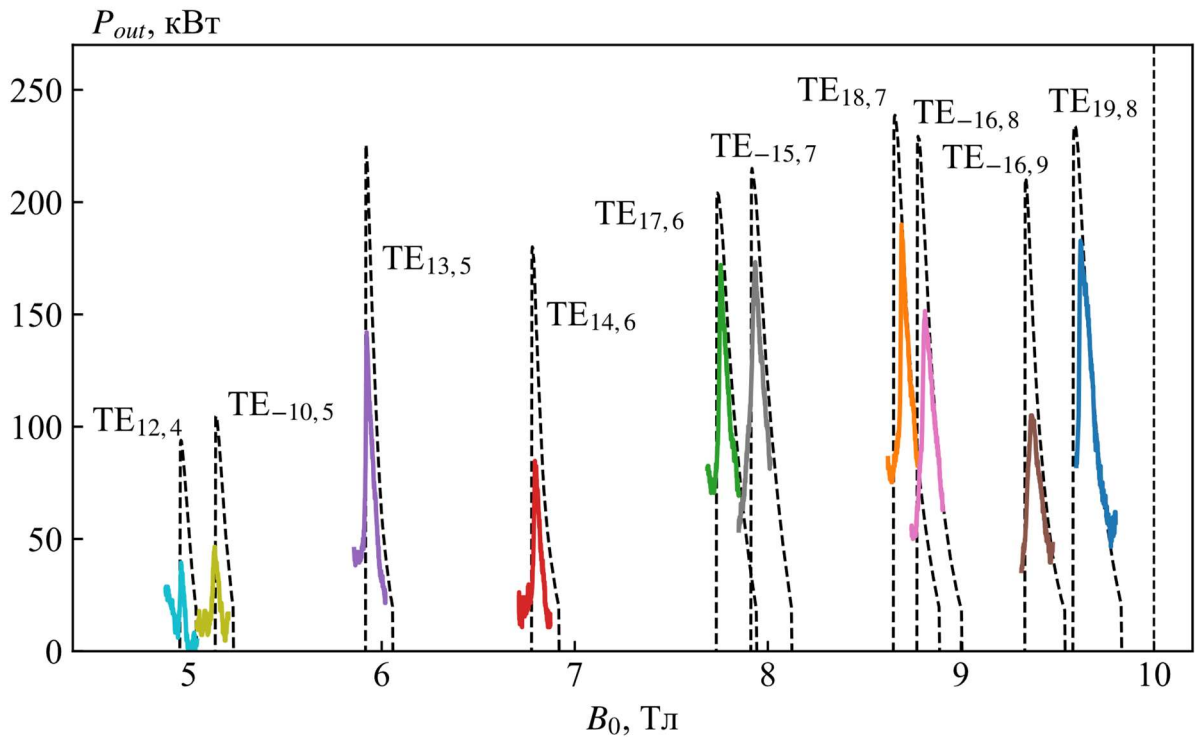


Рисунок 1.27 — Измеренная мощность выходного излучения в зависимости от магнитного поля при работе на выбранных модах (сплошные линии) и результаты численного моделирования выходной мощности (пунктирные линии)

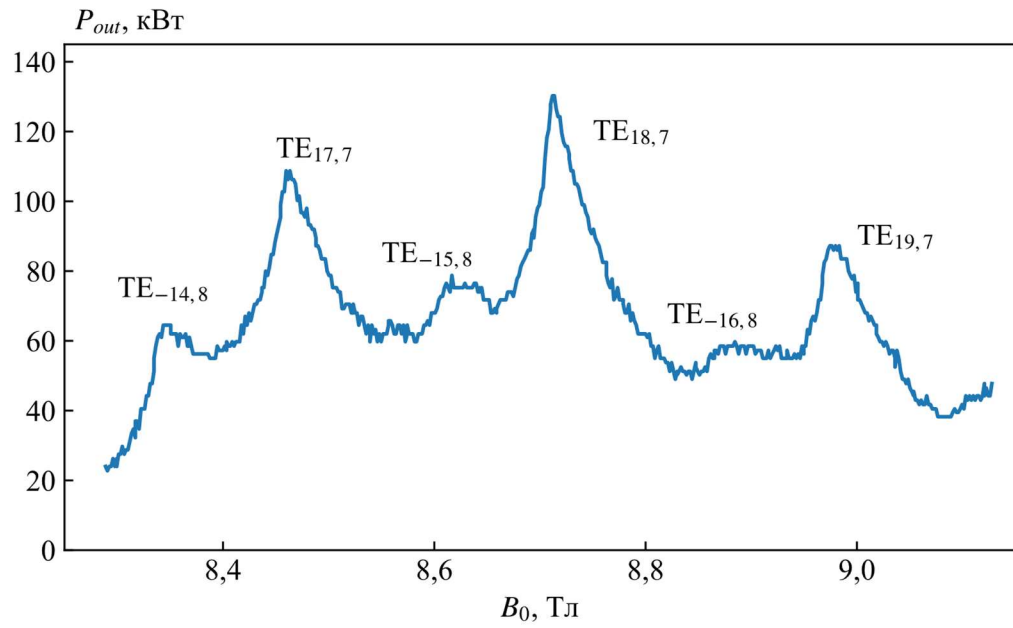


Рисунок 1.28 — Измеренная зависимости выходной мощности от поля при $U_0 = 55$ кВ, $I_{cc} = 0$ А, полученная путем сканирования магнитного поля со скоростью 0,1 Тл/мин

1.5 Основные выводы по главе 1

В главе 1 рассмотрены два варианта частотно-перестраиваемых субтерагерцовых гиротронов с триодной МИП, отличающихся уровнем мощности выходного излучения. Основные параметры гиротронов приведены в таблице 1.10. После оптимизации расчётные значения КПД в случае маломощного и мощного гиротронов составили до 18% и 44%, соответственно (отличается более чем вдвое). При помощи одноступенчатой рекуперации есть возможность повысить КПД прибора в 1,4 раз в обоих случаях.

Для достижения высокого КПД в маломощном гиротроне требуется сравнительно протяжённая область взаимодействия, то есть использование резонатора с большой длиной регулярного участка (около 20λ). Этому соответствует высокая дифракционная добротность выбранных мод и, таким образом, высокая доля омических потерь, приводящая к значительному уменьшению КПД гиротрона в сравнении с мощным гиротроном, работающим в том же частотном диапазоне. В свою очередь, в мощном гиротроне рассматривался резонатор с более чем вдвое меньшей длиной регулярного участка, но несмотря на это, дополнительным ограничивающим фактором были высокие тепловые потери, характерные для субтерагерцовых мощных гиротронов. Наряду с этим маломощный частотно-перестраиваемый гиротрон не имеет особых ограничений, вызванных тепловой нагрузкой в резонаторе гиротрона.

Работа с высоким ускоряющим напряжением приводит к усложнению конструкции гиротронной установки и к росту тепловой нагрузки в различных частях электродинамической системы. С другой стороны, работа с большим напряжением по сравнению с маломощным гиротроном позволяет значительно снизить влияние поля пространственного заряда (ППЗ) на качество электронного пучка. Это открывает новые возможности по управлению параметрами электронного пучка, особенно в случае триодной схемы ЭОС, и в конечном итоге позволяет расширить диапазон ступенчатой перестройки частоты.

Экспериментально исследована возможность широкополосной ступенчатой перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне. Продемонстрирован уровень мощности выходного излучения от 38 кВт до 190 кВт в широкой полосе частот 133–250 ГГц. Мощность выходного излучения в некоторых режимах может быть значительно увеличена путем оптимизации квазиоптического преобразователя мод и использования широкополосного выходного окна. Необходимо отметить, что уже и в существующем состоянии исследуемый гиротрон работает с длительностью импульса до сотен миллисекунд, что является вполне достаточным для многих приложений. При этом конструктивные особенности гиротрона позволяют ему работать и в непрерывном режиме после замены выходного окна из нитрида бора на окно из синтетического алмаза.

Проведённые исследования развивают теорию и методику разработки гиротронов с широкополосной перестройкой частоты, которая позволяет определить рабочие моды и с хорошей точностью прогнозировать характеристики выходного сигнала практически для любой современной гиротронной установки. На основе развитой методики в перспективе может быть спроектирован и реализован гиротрон требуемого уровня мощности и частоты на основном циклотронном резонансе с широкополосной, более чем на октаву, ступенчатой перестройкой частоты.

Таблица 1.10 Параметры рассмотренных гиротронов

| | Частотно-перестраиваемый гиротрон для спектроскопии | Частотно-перестраиваемый гиротрон для диагностики плазмы | Экспериментальный частотно-перестраиваемый гиротрон [90] |
|---|---|--|--|
| Схема МИП | триодная | триодная | диодная |
| Выходная мощность P_{out} , кВт | 0,2–0,24 | 120–270 | < 190 |
| Рабочие моды | TE _{16,6} –TE _{20,8} | TE _{9,3} –TE _{18,9} | TE _{12,4} –TE _{19,8} |
| Частота генерации f , ГГц | 200–270 | 100–261 | 133,89–249,45 |
| Ускоряющее напряжение U_0 , кВ | 10 | 50 | 55 |
| Ток электронного пучка I_b , А | 0,13 | 12 | 12,5 |
| Средний питч-фактор эл. пучка g | 1,2 | 1,15–1,25 | - |
| Средний радиус электронного пучка в рабочем пространстве R_0 , мм | 3,6–4,1 | 3,5–4,56 | 3,79–4,19 |
| Радиус резонатора R_r , мм | 8,97 | 9,332 | 9,34 |
| Длина резонатора L , мм | 30 | 12 | 10,8 |
| Доля омических потерь в резонаторе | 30,2–40,5% | < 7% | < 7% |
| Уд. тепловая нагрузка p_{ohm} , кВт/см ² | < 0,1 | < 2,5 | < 2,5 |
| Рабочее магнитное поле B_0 , Тл | 7,3–10 | 3,7–10 | 4,97–9,63 |

ГЛАВА 2. Управление добротностью резонаторов гиротронов на высоких циклотронных гармониках

В настоящее время доминирующим направлением развития гиротронов является продвижение в терагерцовый диапазон вплоть до 1 ТГц и далее [17, 18]. Для обеспечения условия циклотронного резонанса (В1) в терагерцовом диапазоне требуются высокие напряженности магнитного поля в рабочем пространстве. В настоящее время существуют магнитные системы, работающие в стационарном режиме с магнитной индукцией до 20 Тл [97], что позволяет реализовать гиротроны на основном циклотронном резонансе с частотой генерации до 560 ГГц. Для дальнейшего увеличения частоты излучения могут быть использованы импульсные системы, магнитные поля которых достигают 50 Тл. Гиротронные комплексы с импульсными магнитными системами демонстрируют рекордные значения частоты и мощности выходного излучения [98–100]. Тем не менее для ряда приложений требуются именно длинно-импульсные и непрерывные источники в терагерцовом диапазоне (см, например, [6]).

Перспективным способом повышения частоты является переход к работе на высоких циклотронных гармониках (см., например, [101–103]). Такой подход позволяет значительно (в n раз) снизить требование к величине магнитного поля при работе на заданной частоте или многократно поднять частоту генерации при работе с заданным уровнем магнитного поля. Этот подход активно используется для повышения частоты излучения как при работе с импульсными, так и с непрерывными магнитными системами. Существенно, что при переходе к режиму работы на высокой циклотронной гармонике обостряется конкуренция со стороны паразитных мод, синхронных с более низкими циклотронными гармониками, вплоть до основной. Наличие указанных паразитных мод приводит к снижению эффективности или даже полному подавлению генерации на гармониках.

Для подавления паразитных мод и обеспечения устойчивой генерации на рабочей моде в процессе развития гиротронов предложено большое количество различных методов селекции мод [29, 104–133], некоторые из которых реализованы на практике (см, например, [114, 126, 132]). Методы селекции разделяют на электродинамические [104–119] и электронные [120–133]. Электронные методы селекции мод рассмотрены во введении к третьей главе. К электродинамическим методам селекции относятся конструктивные изменения геометрии резонатора. Рассматриваются как аксиально-симметричные системы (связанные резонаторы с трансформацией мод (СРТМ) [104–106], резонаторы эшелеттного типа [107, 108], коаксиальные резонаторы [109–112], резонаторы с локальными неоднородностями [113, 114]), так и системы

без аксиальной симметрии (открытые (квазиоптические) резонаторы [115–117], резонаторы с азимутально-асимметричным поперечным сечением [118, 119]).

2.1 Генерация излучения с высокими КПД и мощностью в гиротроне на третьей циклотронной гармонике с селективным отражателем

Одним из перспективных методов дополнительной селекции в гиротроне является введение в электродинамическую систему обратной связи. Реализовать селективную обратную связь можно, например, при помощи избирательного отражения, изменением толщины выходного окна или введением в систему «кольцевой диафрагмы» (аксиально-симметричного сужения на выходном участке волновода). Ранее подобные системы с обратной связью за счет отражений использовались для исследования различных автомодуляционных и стохастических режимов генерации [134, 135]. Немало работ посвящено исследованию возможности стабилизации частоты излучения и управлению параметрами таких систем [136–139]. В [136] приведены результаты эксперимента по стабилизации частоты 28 ГГц гиротрона, работающего на второй циклотронной гармонике. С этой целью была разработана и изготовлена размещенная в волновом переходе гиротрона кольцевая диафрагма, имеющая возможность перемещения вдоль центральной оси прибора. В ходе эксперимента наблюдалось периодическое изменение уровня мощности выходного излучения при изменении расстояния между диафрагмой и резонатором [136]. Из результатов эксперимента становится очевидным, что введение в систему отражателя позволит не только управлять параметрами выходного излучения, но и повысить селекцию собственных мод резонатора, синхронных с высокими циклотронными гармониками.

Селективный отражатель может быть расположен вблизи резонатора или на некотором расстоянии. Последний случай рассмотрен в этом параграфе, где отражение в систему вводилось при помощи изменения толщины выходного окна.

2.1.1 Описание экспериментальной установки

Эксперимент по возбуждению моды на третьей гармонике гирочастоты при наличии селективного отражателя [А7] проведён на базе имеющегося в ИПФ РАН гиротронного комплекса с «теплым» магнитом [140]. Комплекс включает гиротрон, который работает на моде $TE_{0,2}$ на второй гармонике гирочастоты при ускоряющем напряжении до 24 кВ и токе электронного пучка 0,5–2,4 А совместно с масляноохлаждаемым магнитом с индукцией магнитного поля в пространстве взаимодействия около 0,5 Тл. В непрерывном режиме генерации на частоте 28 ГГц гиротрон максимальная мощность выходного излучения превышает 15 кВт. Данный гиротрон имеет прямой вывод излучения и однодисковое выходное

окно из нитрида бора с толщиной 2,61 мм, оптимизированное для работы на моде $TE_{0,2}$. Этот гиротрон и его аналоги активно используются в большом количестве приложений, например, для высокотемпературной обработки материалов, для создания ЭЦР-источников многозарядных ионов, для CVD-технологий [141–143]. В экспериментах мощность выходного сигнала измерялась с помощью водяного калориметра с погрешностью около 50 Вт, а спектральный состав и частоты мод — с помощью анализатора спектра Keysight N9010A и осциллографа Keysight DSAZ594A.

После проведения анализа спектра собственных мод для работы на третьей циклотронной гармонике выбрана мода $TE_{0,3}$ с частотой около 40,5 ГГц. На рисунке 2.1 представлен участок спектра вблизи этой моды. В случае работы на моде $TE_{0,3}$ возможными конкурентами являются мода $TE_{2,2}$, синхронная со второй гармоникой гирочастоты, с рабочей частотой около 26,9 ГГц и мода $TE_{2,1}$ на основном циклотронном синхронизме с частотой около 14,1 ГГц. Критические частоты мод $TE_{2,2}$ и $TE_{2,1}$ равняются 26,8 и 12,2 ГГц соответственно.

Схема эксперимента показана на рисунке 2.2. В ходе эксперимента отражённый сигнал формировался и вводился в систему путем изменения толщины выходного окна. Толщина выходного окна менялась посредством добавления дополнительных пластинок из нитрида бора, плотно прижатых к основному окну тефлоновой трубкой. Согласно нелинейной теории гиротронов [144] за эффективность электронно-волнового взаимодействия отвечает параметр $I_0 Q_{tot} G_{m,p}$ (здесь I_0 — нормированный ток, Q_{tot} — полная добротность, $G_{m,p}$ — фактор связи электронного пучка и высокочастотного поля в пространстве взаимодействия). Введение в систему селективного отражателя позволит повысить дифракционную и полную добротности рабочей моды и, следовательно, снизить стартовый ток выбранной рабочей моды.

Толщина дополнительной пластинки выбиралась с целью достижения наибольшего отражения при работе на моде $TE_{0,3}$ и минимальных коэффициентов отражения в случае паразитных мод. Такой подход позволит повысить селекцию моды $TE_{0,3}$. При этом возможный небольшой зазор между двумя пластинками является несущественным из-за работы гиротрона в относительно низком частотном диапазоне: длина возможного зазора (не более 0,1 мм) значительно меньше длины волны любой рабочей моды.

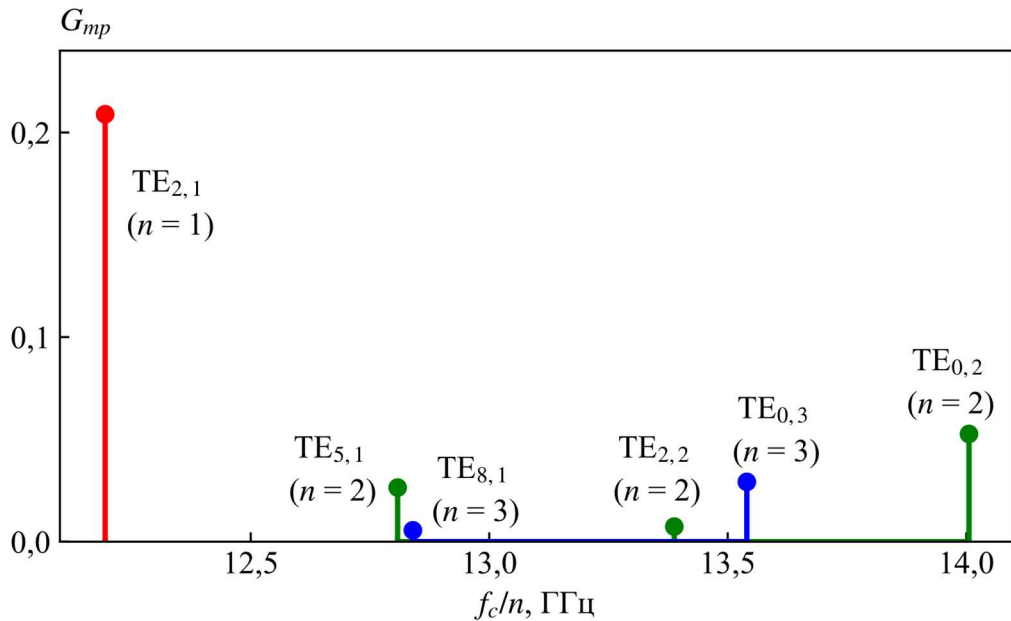


Рисунок 2.1 — Спектр вблизи моды $TE_{0,3}$, синхронной с третьей циклотронной гармоникой.

$G_{m,p}$ — фактор связи (зависит от выбора собственной моды и от среднего радиуса центра электронных орбит R_0), f_c — критические частоты

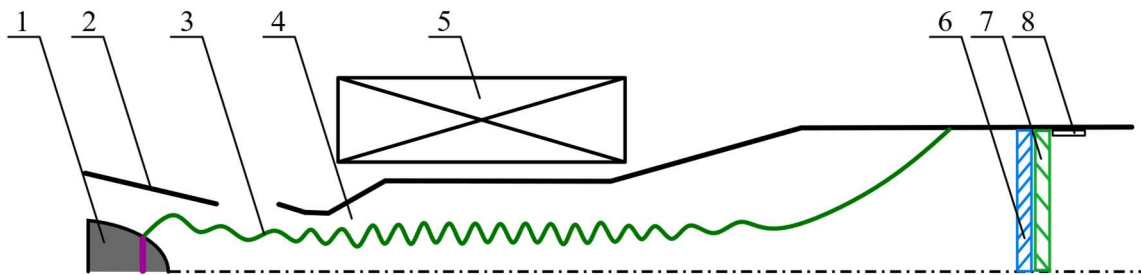


Рисунок 2.2 — Схема эксперимента с дополнительной пластинкой: 1 — катодный узел, 2 — модулирующий анод, 3 — электронный пучок, 4 — резонатор, 5 — теплый магнит, 6 — выходное окно, 7 — дополнительная пластина, 8 — тефлоновая трубка

2.1.2 Оптимизация толщины выходного окна

Подготовка к эксперименту была выполнена в два этапа.

Этап №1. Оптимизация и изготовление первой дополнительной пластины (пластины №1), которая обеспечивает минимальные коэффициенты отражения для всех рассматриваемых мод, с целью проверки полученных оценок на стартовые токи и демонстрации невозможности возбуждения моды $TE_{0,3}$ на третьей гармонике при отсутствии отраженного сигнала от выходного окна.

Этап №2. Оптимизация и изготовление второй дополнительной пластины (пластины №2), которая с одной стороны обеспечивает минимальные коэффициенты отражения

для мод на основном и втором циклотронном резонансе и с другой стороны сильное отражение выходного сигнала при работе на моде $TE_{0,3}$ на третьей гармонике гирочастоты.

Толщина дополнительных пластин оптимизировалась в соответствии с теорией слоистых сред [145]. Данная методика позволяет определить коэффициенты отражения для проходящей многослойную среду плоской волны с линейной поляризацией. В ходе расчётов падающий волновой пучок аппроксимировался плоской волной с « E -поляризацией» (в этом случае напряженность поля направлена перпендикулярно плоскости падения, образованной направлением распространения волны и вектором нормали к границе раздела двух сред). Результаты расчёта коэффициентов отражения для моды $TE_{0,3}$ и паразитных мод показаны на рисунке 2.3. В итоге были выбраны дополнительная пластина с толщиной 2,72 мм (пластина №1) с минимальными коэффициентами отражения мод $TE_{2,1}$, $TE_{2,2}$, $TE_{0,2}$ и $TE_{0,3}$ и пластина №2 с толщиной 2,21 мм. В случае пластины №2 мощность отраженного сигнала при работе на моде $TE_{0,3}$ составила около 55% мощности выходного сигнала, в случае паразитных мод на второй гармонике — не превысила 40%, а в случае основной паразитной моды $TE_{2,1}$ коэффициент отражения по мощности составил около 18,5%.

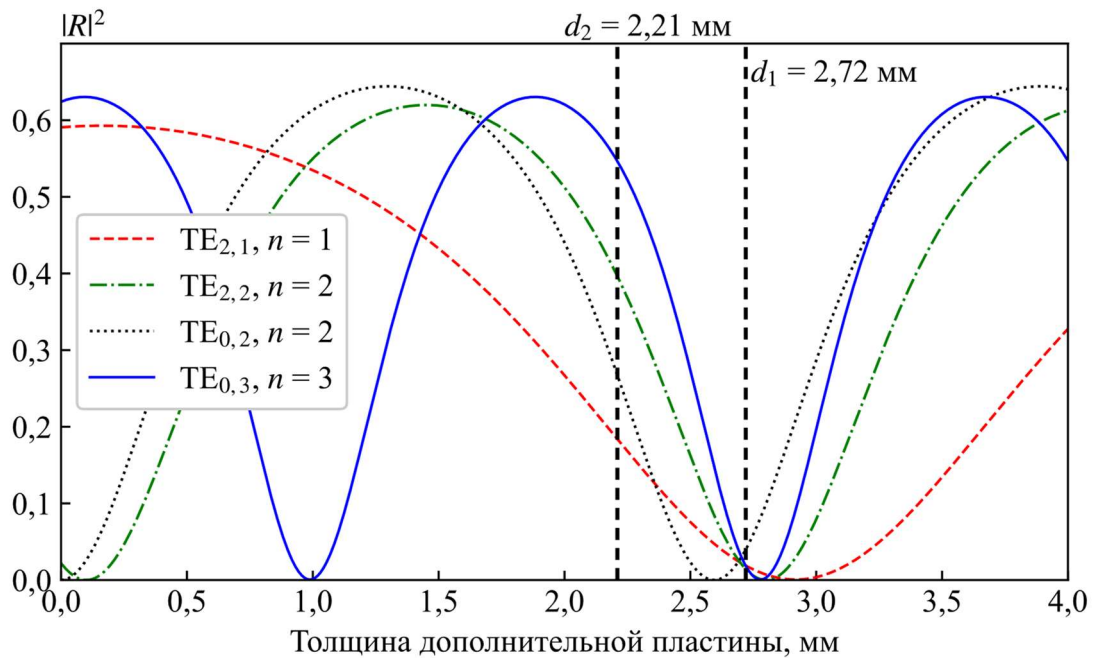


Рисунок 2.3 — Зависимость коэффициентов отражения для моды $TE_{0,3}$ и её конкурентов от толщины дополнительной пластины. d_1 — толщина доп. пластины, соответствующая минимальным коэффициентам отражения для рассматриваемых мод, d_2 — толщина доп. пластинки, выбранная с целью возбуждения третьей гармоники

Следует отметить, что с точки зрения электродинамики для пластины №2 наилучшим будет значение толщины, при котором коэффициенты отражения для мод на первой и второй

гармониках близки к нулю. Однако анализ показал, что для этой цели требуется дополнительная пластина с толщиной более 7 мм. В такой пластине значительно возрастут тепловые потери, что потребует установки дополнительной системы охлаждения.

2.1.3 Результаты численного моделирования

Расчёт электронно-волнового взаимодействия в гиротроне с учётом отражённого сигнала может быть сделан несколькими способами. Одним из подходов является решение самосогласованной нестационарной системы уравнений с учётом запаздывающей обратной связи. Такой подход обычно используется при моделировании различных многомодовых режимов генерации в гиротронах с плотным спектром мод. Однако в случае рассматриваемого гиротрона из-за малого количества конкурентов для определения границ области генерации и оценки уровня выходной мощности достаточно использование одномодовой расчётной модели, приведенной в приложении А. При этом отражение от выходного окна может быть учтено добавлением кольцевой диафрагмы в волновом переходе на выходе из резонатора (см. рисунок 2.4). В расчётах параметры кольцевой диафрагмы для каждой моды выбирались отдельно с целью получения заданных коэффициентов отражения. Небольшое смещение отражателя вдоль оси прибора позволяет скорректировать разность фаз падающей и отражённой волн. Численное моделирование выполнено при ускоряющем напряжении 20 кВ; питч-фактор задавался равным 1,8, а относительный разброс осцилляторных скоростей — 20%.

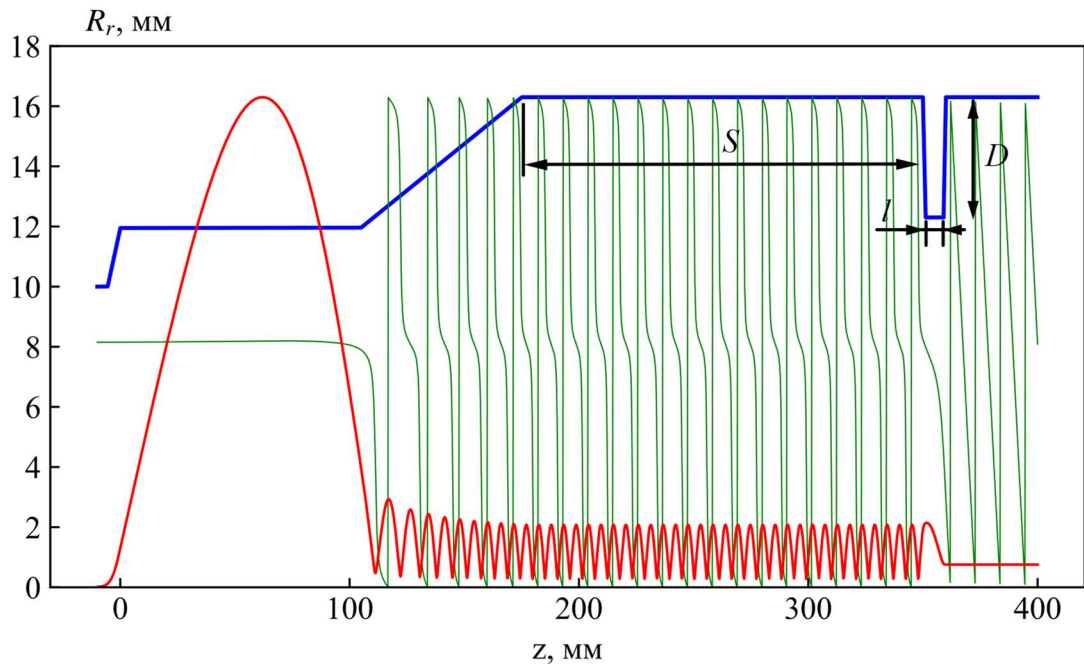


Рисунок 2.4 — Профиль резонатора с кольцевой диафрагмой и расчётная продольная структура моды $TE_{0,3}$ при толщине дополнительной пластины 2,21 мм

Расчётные зависимости стартовых токов для выбранной моды и соседних мод без учёта отражений (случай с дополнительной пластиной №1) от выходного окна показаны на рисунке 2.5а. Для моды $TE_{0,3}$ имеется лишь малая часть зоны самовозбуждения, в которой стартовый ток паразитной моды $TE_{2,1}$ превышает стартовый ток рабочей моды. Обычно режимы генерации, расположенные в данной зоне, имеют низкий КПД. При небольшом увеличении тока электронного пучка зона самовозбуждения выбранной моды перекрывается возбуждением паразитной модой.

Введение в систему пластины №2 позволяет существенно снизить минимальный стартовый ток рабочей моды $TE_{0,3}$. Рисунок 2.5б показывает зависимости стартовых токов рассматриваемых мод от магнитного поля с учётом отражений от выходного окна с пластиной №2. В этом случае, зона самовозбуждения рабочей моды, в которой возбуждение паразитной моды отсутствует, увеличивается, что позволяет надеяться на достижение в эксперименте приемлемого уровня КПД и выходной мощности.

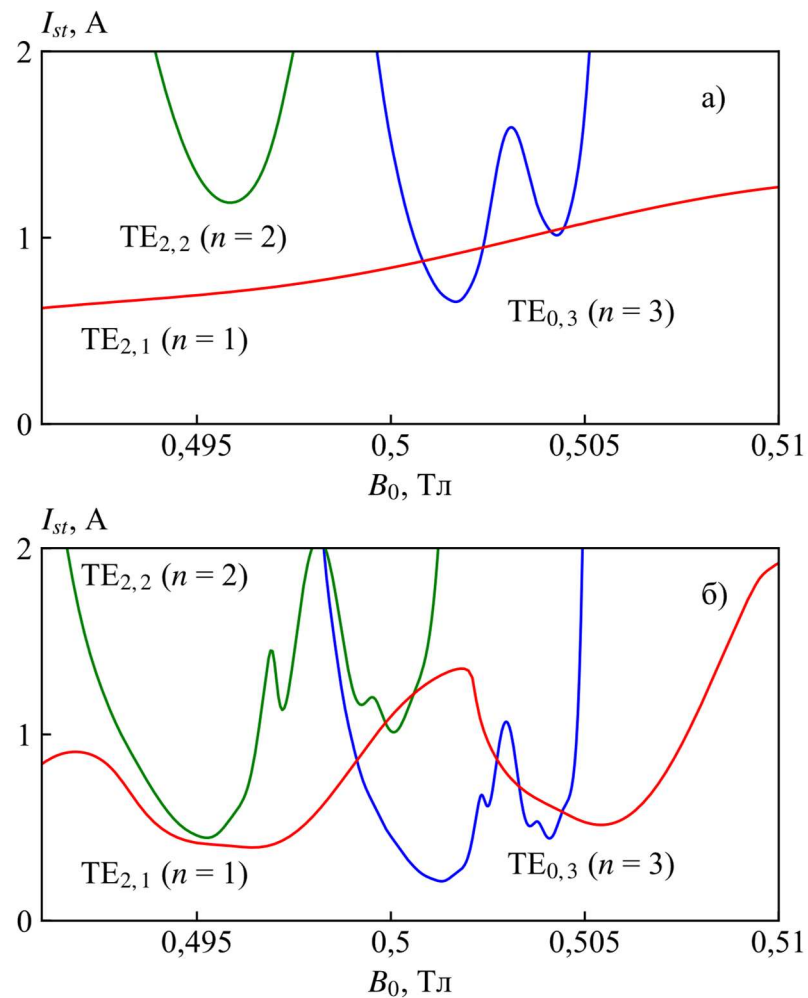


Рисунок 2.5 — Зависимость стартовых токов моды $TE_{0,3}$ и основных конкурентов от магнитного поля без отражений (а) и с учетом отражений от выходного окна с пластиной №2 (б)

На основе расчётных данных было принято решение рассмотреть режимы генерации с током от 0,5 до 2 А, что позволяет с одной стороны продемонстрировать эффективность селекции моды на третьей циклотронной гармонике в широком наборе параметров, с другой стороны позволит достичь киловаттный уровень мощности при работе на третьей гармонике гирочастоты. Результаты расчётов мощности выходного излучения для рабочей моды $TE_{0,3}$ приведены на рисунке 2.8 в виде пунктирных линий.

2.1.4 Экспериментальные результаты

В ходе проведения экспериментальных исследований первоначально была установлена пластина №1. При токе пучка 0,5 А генерация излучения во всём рассматриваемом диапазоне отсутствовала. При плавном увеличении тока пучка наблюдалось возбуждение моды $TE_{2,1}$ на основном циклотронном резонансе, при этом режим с возбуждением моды $TE_{0,3}$ обнаружен не был. Проведенный эксперимент качественно соответствует результатам численного моделирования.

В эксперименте с пластиной №2 наблюдалась устойчивая одночастотная генерация на частоте 40,5 ГГц, соответствующая возбуждению моды $TE_{0,3}$ на третьей гармонике гирочастоты. На рисунках 2.6 и 2.7 показаны данные с анализатора спектра Keysight N9010A и осциллографа Keysight DSAZ594A. При плавном уменьшении магнитного поля мощность выходного излучения возрастала, но в некоторый момент происходил срыв генерации, и наблюдалось возбуждение моды $TE_{2,1}$. Данный эффект был зафиксирован как на показаниях анализатора спектра, так и по резкому изменению мощности выходного излучения на калориметре.

В ходе измерений снята зона генерации моды $TE_{0,3}$ для различных значений тока электронного пучка (см. рисунок 2.8). При токах $I_b = 1,5$ А; 1,9 А максимальный КПД практически не менялся, то есть была достигнута окрестность точки с оптимальным КПД. В результате наибольшая мощность выходного излучения составила 3 кВт при КПД 8%, что является рекордным значением для гиротронов, работающих на третьей гармонике в непрерывном режиме [146]. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчётными данными.

Таким образом, введение в систему отраженного сигнала при помощи изменения толщины вакуумного окна для возбуждения моды на высокой циклотронной гармонике — достаточно простой подход, который дал положительный результат. Представляется, что использование гораздо более сложных отражателей позволит не только снизить стартовые токи выбранных мод, но и добиться ещё более эффективной их селекции. Представляется, что

данный метод может быть успешно применен в гиротронах разных диапазонов частот, в том числе, в гиротронах субтерагерцового и терагерцового диапазонов.

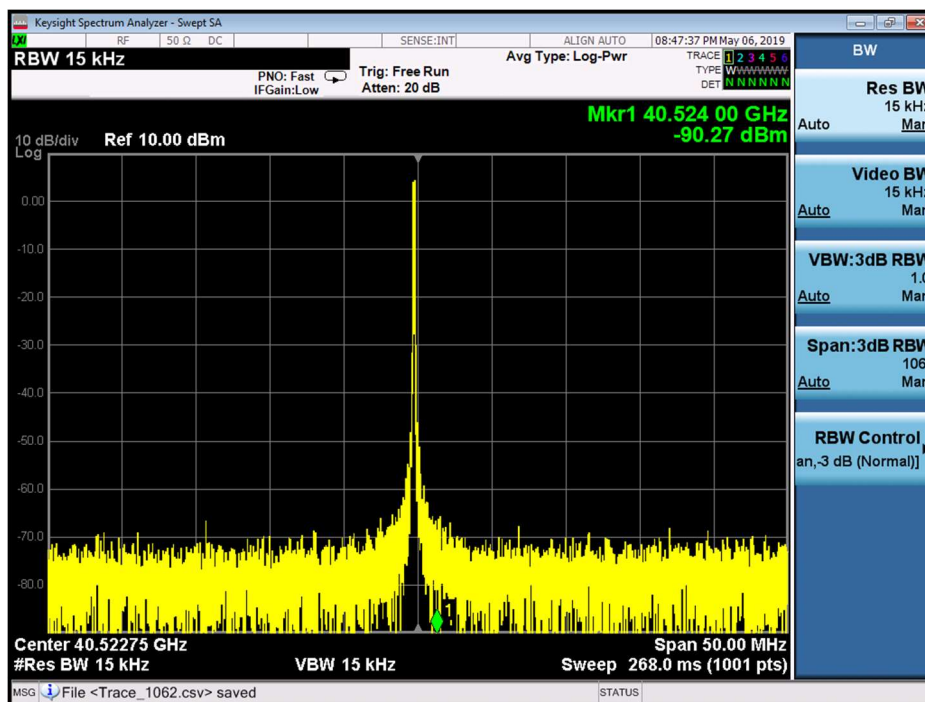


Рисунок 2.6 — Данные с анализатора спектра Keysight N9010A, показывающие генерацию излучения на частоте 40,5 ГГц

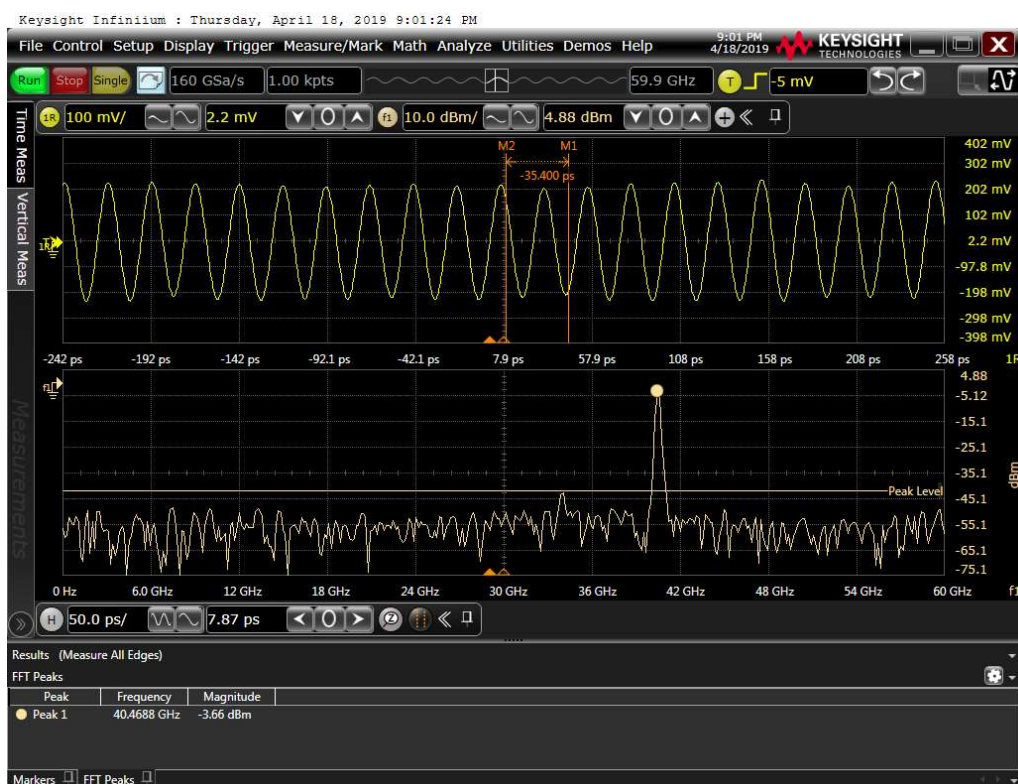


Рисунок 2.7 — Данные с осциллографа Keysight DSAZ594A, показывающие генерацию излучения на частоте 40,5 ГГц

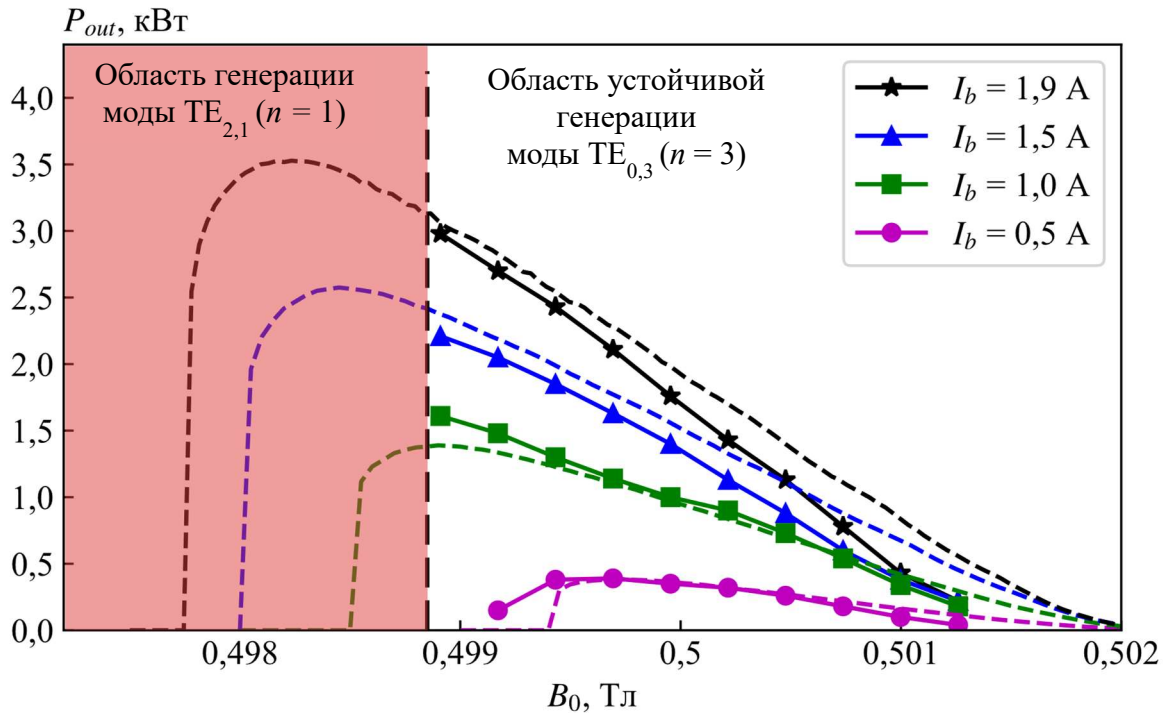


Рисунок 2.8 — Зависимость мощности выходного излучения при работе на моде $TE_{0,3}$ от магнитного поля для различных токов пучка (пунктирные линии — расчётные данные, сплошные — результаты эксперимента)

2.2 Использование локальной неоднородности на выходе из резонатора для управления дифракционной добротностью резонаторов терагерцовых гиротронов

По мере повышения рабочей частоты и роста ограничений на сверхразмерность резонатора, связанных с процессами конкуренции мод, в гиротронах на высоких циклотронных гармониках повышаются требования к точности изготовления электродинамической системы. В силу технологии изготовления регулярная часть резонатора может принять форму усечённого конуса, что может оказывать сильное влияние на добротность собственных мод резонатора [147, А8].

В случае резонатора, расширяющегося в сторону коллектора, дифракционная и полная добротности мод резонатора снижаются, что приводит к росту стартового тока колебаний. Поскольку терагерцовые гиротроны малой мощности, работающие на высоких циклотронных гармониках, как правило, имеют незначительное превышение рабочего тока над стартовым, данный эффект может привести к драматическому падению генерируемой мощности и даже к отсутствию генерации. В случае обратной ситуации, когда радиус регулярной части резонатора на коллекторном конце меньше, чем радиус на конце со стороны катодного узла, добротность повышается, но при этом также происходит уменьшение мощности выходного излучения, вызванное ростом доли омических потерь. При увеличении дифракционной добротности доля

омических потерь в терагерцовом диапазоне может достигать 90%, что приводит к падению доставляемой потребителю мощности на 1–2 порядка.

2.2.1 Терагерцовый гиротрон для экспериментов по ДПЯ

Для анализа метода уменьшения чувствительности к конусности резонатора использован гиротрон с рабочей частотой 0,527 ТГц [148], работающий на второй циклотронной гармонике на моде TE_{6,5}. Данная лампа спроектирована в качестве источника микроволнового излучения для экспериментов по динамической поляризации ядер в установках ядерного магнитного резонанса, что и определило рабочую частоту. Гиротрон проектировался для работы с ускоряющим напряжением 15 кВ при токе электронного пучка 0,4 А и питч-факторе 1,2. Радиус регулярной части резонатора равен 1,9881 мм. Оптимальная с точки зрения эффективности генерации длина резонатора 20 мм соответствует КПД 2,13% и мощности 128 Вт. Ранее электронно-оптическая система (ЭОС) была протестирована в гиротроне с рабочей частотой 0,263 ТГц, работающем на основном гирорезонансе. Полученные в нём режимы генерации полностью соответствовали расчетным [149, 150], что позволяет говорить о достижении заявленных параметров электронного потока.

После смены электродинамической системы под рабочую частоту 0.527 ТГц генерация на второй циклотронной гармонике не наблюдалась. Изменение технологии изготовления и повторное изготовление резонатора привело к увеличению мощности излучения лишь до уровня 5–10 Вт. Такое расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами можно объяснить влиянием возможной слабой конусности резонатора на дифракционную добротность рабочего типа колебания и соответственно на режим работы гиротрона. В таблице 2.1 приведены электродинамические параметры рабочей моды, на рисунке 2.9 — результаты расчетов минимального стартового тока рабочей моды и максимально достижимого КПД гиротрона в зависимости от разницы ΔR между радиусами на концах регулярной части резонатора. Для расчета электро-волнового взаимодействия в резонаторе использована самосогласованная модель, учитывающая скоростной разброс электронов и омические потери мощности в стенке резонатора (см. приложение А). Согласно численным оценкам, приемлемые режимы генерации могут быть достигнуты при разнице радиусов не более 2 микрон, что эквивалентно углу наклона образующей конуса к оси резонатора, равному десятку угловых секунд. Как следует из рисунка 2.9, при разнице радиусов $\Delta R = 2$ мкм стартовый ток рабочей моды увеличивается более чем вдвое, а волновой КПД стремится к нулю.

Таблица 2.1 Электродинамические характеристики рабочей моды в зависимости от параметра ΔR (разницы между радиусами на концах регулярной части резонатора)

| ΔR , мкм | f , ГГц | Q_{dif} | Q_{ohm} | Q_{tot} |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| -1 | 526,53 | 367700 | 10455 | 10170 |
| 0 | 526,40 | 63640 | 10457 | 8980 |
| +1 | 526,25 | 20230 | 10460 | 6900 |
| +2 | 526,08 | 10650 | 10462 | 5280 |

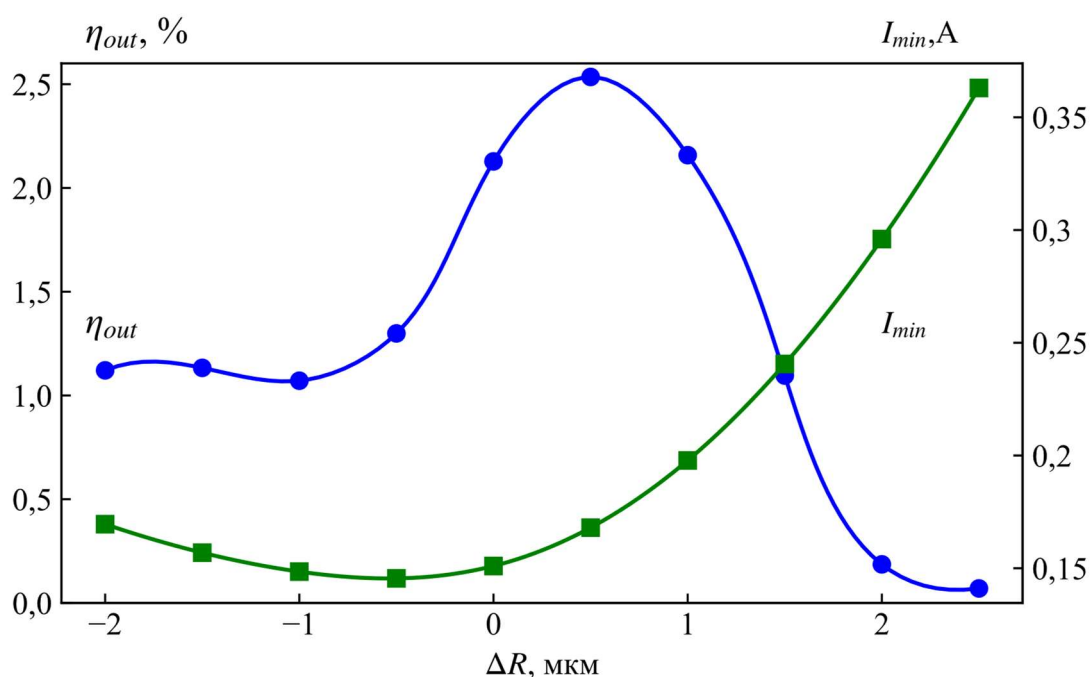


Рисунок 2.9 — Зависимости КПД гиротрона (круги) и минимального стартового тока (квадраты) от изменения радиуса регулярной части (конусности) резонатора

2.2.2 Эффект локальной неоднородности на выходе из пространства взаимодействия

Для снижения негативного влияния конусности регулярной части резонатора может быть использована неоднородность, расположенная вблизи выходной части (на его коллекторном конце) [A8]. Введение локальной неоднородности может повысить полную добротность электродинамической системы, в том числе при слабом наклоне регулярной части резонатора, и таким образом снизить чувствительность системы к её конусности. Данная неоднородность может быть выполнена в виде кольцевой диафрагмы ($D < 0$) или канавки ($D > 0$) (рисунок 2.10). В расчётах рассматривались локальные неоднородности с «прямоугольным» профилем (в виде равнобедренной трапеции с достаточным количеством точек интегрирования на боковых сторонах) с длиной вдоль оси прибора много меньшей, чем длина регулярной части резонатора.

Данный подход с введением локальных неоднородностей может быть особенно интересен при конструировании гиротронов с наборными резонаторами, состоящими из отдельных частей. В случае погрешностей в изготовлении резонатора такого гиротрона появляется возможность скорректировать его электродинамические параметры с помощью введения на стыке различных частей резонатора дополнительной вставки. Эта вставка ввиду своих малых размеров может быть изготовлена с гораздо большей точностью, чем отдельные части электродинамической системы.

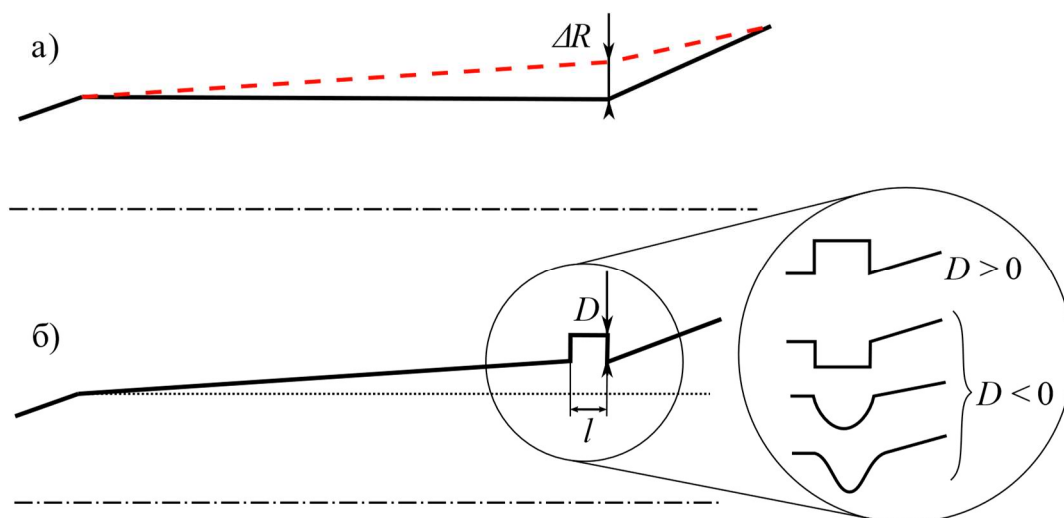


Рисунок 2.10 — Схема резонатора с конусностью (а) и с локальной неоднородностью на коллекторном конце (б)

На первом этапе расчетов была решена электродинамическая задача по определению дифракционной и полной добротности в зависимости от параметров неоднородности (длина l и глубина D) для различных значений конусности резонатора. Анализ данных позволил выявить область параметров, наиболее благоприятных для реализации предложенного подхода. Результаты расчетов при разнице диаметров на концах регулярной части резонатора в 2 микрона приведены на рисунке 2.11. На рисунке выделяются перспективные области с повышенным уровнем добротности, как в случае кольцевой диафрагмы, так и в случае неоднородности с $D > 0$. Периодическая структура в области $D > 0$ связана с резонансным характером зависимости коэффициента отражения от длины неоднородности. Области с высокой добротностью не меняются при изменении конусности резонатора или длины резонатора, то есть почти не зависят от конкретного профиля резонатора и определяются главным образом частотой излучения. Следующим шагом стало определение оптимальных параметров неоднородности с учетом влияния на эффективность электронно-волнового взаимодействия. Для каждого конкретного профиля резонатора была проведена оптимизация по величине расстройки циклотронного резонанса для достижения максимального КПД. На

рисунке 2.12 приведена плоскость изо-КПД гиротрона в зависимости от длины и глубины неоднородности для разницы радиусов $\Delta R = 2$ мкм. Согласно расчётам, при введении локальной неоднородности, расположенной на коллекторном конце, в резонаторе с конусностью $\Delta R = 2$ мкм можно рассчитывать на генерацию излучения с волновым КПД $\sim 1\%$, что всего в 1,2–1,3 раза меньше, чем в гиротроне с идеально гладким резонатором.

2.2.3 Трансформация мод в резонаторе терагерцового гиротрона с неоднородностью на коллекторном конце

При введении неоднородностей в электродинамический тракт существенным является вопрос о трансформации рабочей моды в другие типы колебаний и итоговая структура выходного излучения. По мере увеличения размеров неоднородности эффекты переизлучения начинают играть бóльшую роль, что приводит к усложнению модового состава волнового пучка на выходе из резонатора. В зависимости от параметров локальной неоднородности дифракционная добротность из-за трансформации мод может уменьшиться более чем вдвое по сравнению с одномодовым приближением. Эффекты переизлучения анализировались на основе метода поперечных сечений в модификации, описанной в [66, 67]. Поскольку рассматриваемые неоднородности являются аксиально-симметричными, то азимутальный индекс m у всех мод полагался одинаковым. На рисунке 2.13 в логарифмическом масштабе приведен результат расчета трансформации мод для резонатора с кольцевой диафрагмой с длиной $l = 0,5$ мм и глубиной $D = -15$ мкм.

Дальнейшая оптимизация профиля резонатора заключалась в поиске параметров неоднородности, дающих максимальное произведение КПД электронно-волнового взаимодействия на процентное содержание рабочей моды в выходном излучении. КПД рассчитывался в одномодовом приближении. Такой подход позволяет достаточно просто выполнить оптимизацию параметров и достаточно точен в силу того, что трансформация излучения происходит на выходном конце резонатора, где взаимодействие электронного пучка с паразитными модами практически отсутствует, а к потребителю будет поступать только мощность, содержащаяся в рабочей моде, поскольку вся примесь будет рассеиваться в тракте транспортировки излучения.

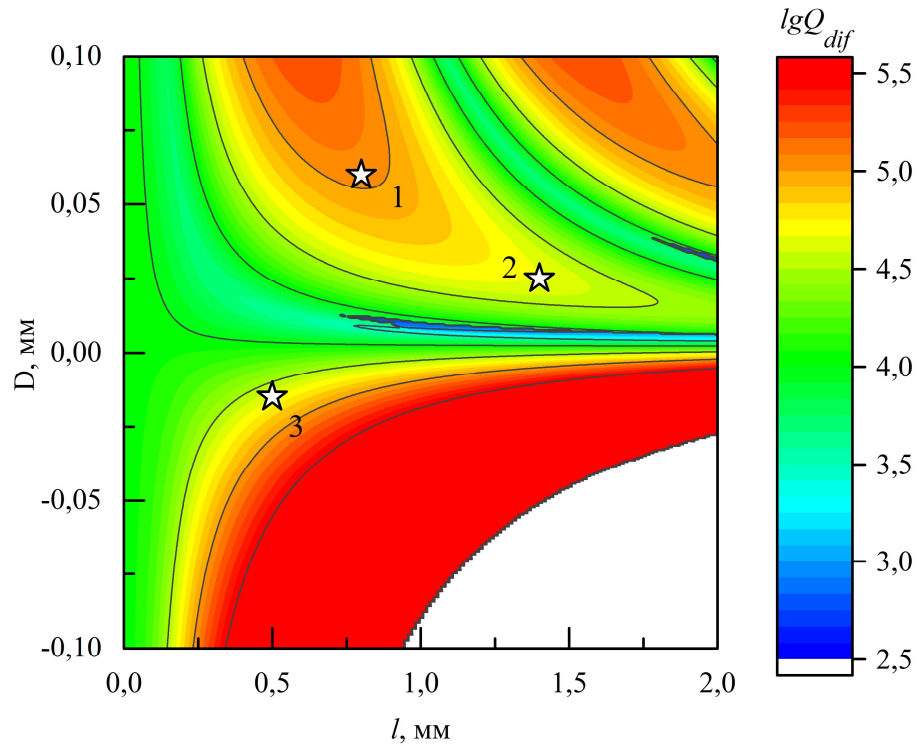


Рисунок 2.11 — Изолинии дифракционной добротности резонатора в зависимости от параметров неоднородности (по оси абсцисс длина неоднородности l , по оси ординат глубина неоднородности D) для разницы радиусов $\Delta R = 2$ мкм. Звездой отмечены выбранные конфигурации неоднородности

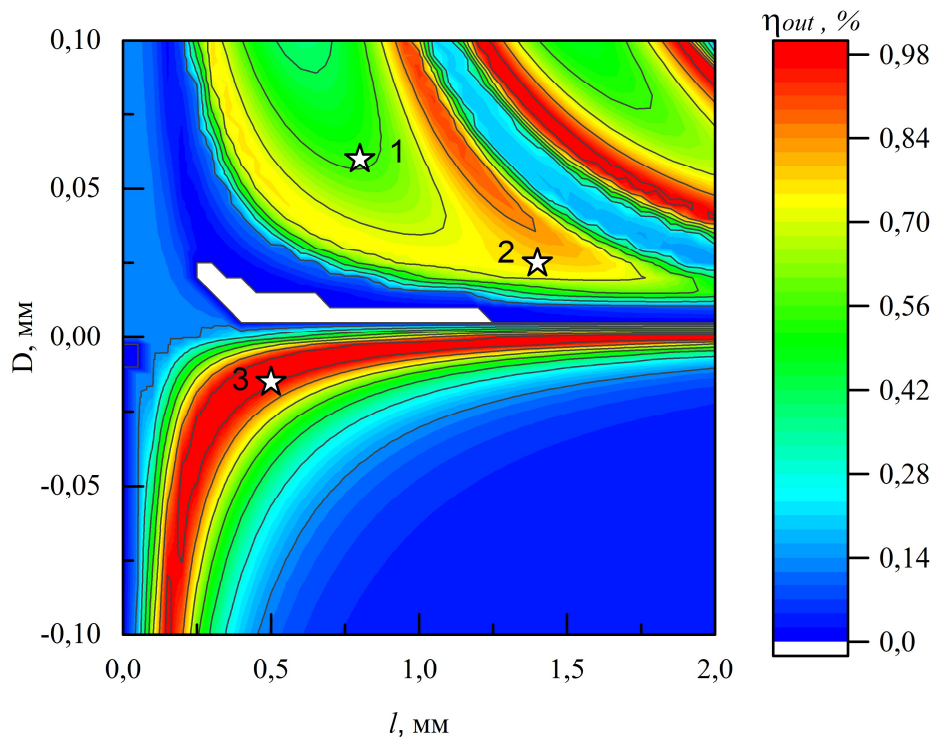


Рисунок 2.12 — Расчетные изолинии КПД в зависимости от длины l и глубины D неоднородности для разницы радиусов $\Delta R = 2$ мкм. Звездой отмечены выбранные конфигурации неоднородности

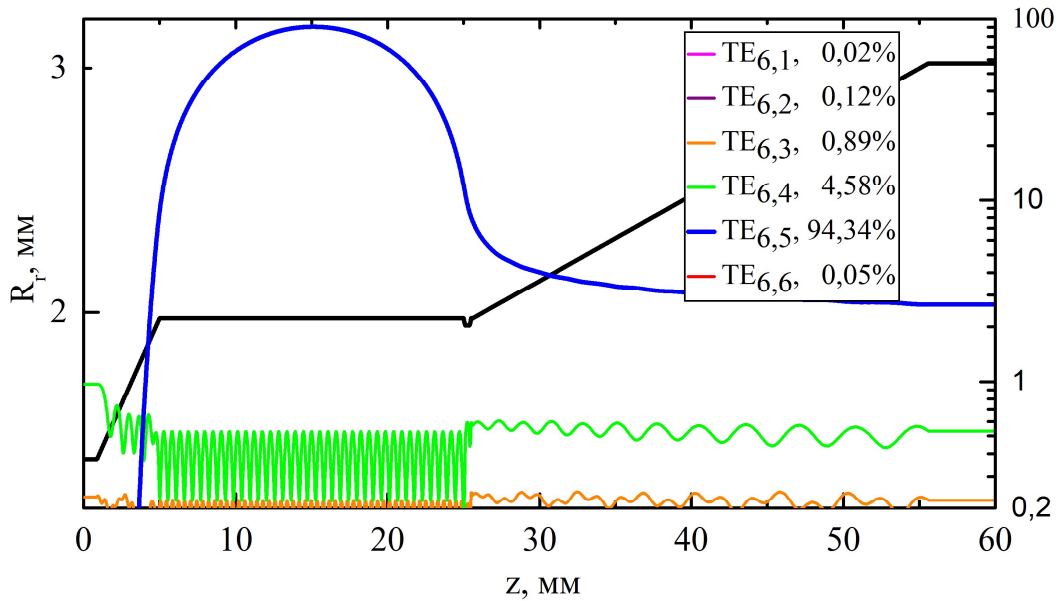


Рисунок 2.13 — Продольные профили и модовый состав волнового пучка на выходе из резонатора

2.2.4 Результаты численного моделирования

На рисунке 2.14 представлены результаты расчета КПД от конусности резонатора для случая регулярного резонатора и трех вариантов неоднородности, демонстрирующих эффективность предлагаемого метода (таблица 2.2). С точки зрения чувствительности к конусности резонатора при сравнении двух вариантов резонатора с канавкой, вариант №1 ($l = 0,8$ мм, $D = 60$ мкм) представляется предпочтительным. Однако введение в резонатор канавки №1 приводит к существенному падению мощности и к высоким коэффициентам переизлучения (доля рабочего типа колебаний 82%, по сравнению с 97% в варианте №2 ($l = 1,4$ мм, $D = 25$ мкм)). Вариант с наличием диафрагмы ($l = 0,5$ мм, $D = -15$ мкм) снижает чувствительность к конусности резонатора, обладает как высокой долей рабочей моды в выходном излучении (94,3%), так и достаточно высоким КПД при всех рассматриваемых значениях конусности, что делает его наиболее привлекательным. На рисунках 2.11 и 2.12 варианты выбранных электродинамических структур помечены звездами.

Таблица 2.2 Параметры рассмотренных локальных неоднородностей

| | Канавка №1 | Канавка №2 | Диафрагма |
|-------------------------------|------------|------------|-----------|
| Номер на рисунках 2.11 и 2.12 | №1 | №2 | №3 |
| Длина l , мм | 0,8 | 1,4 | 0,5 |
| Глубина D , мкм | 60 | 25 | -15 |

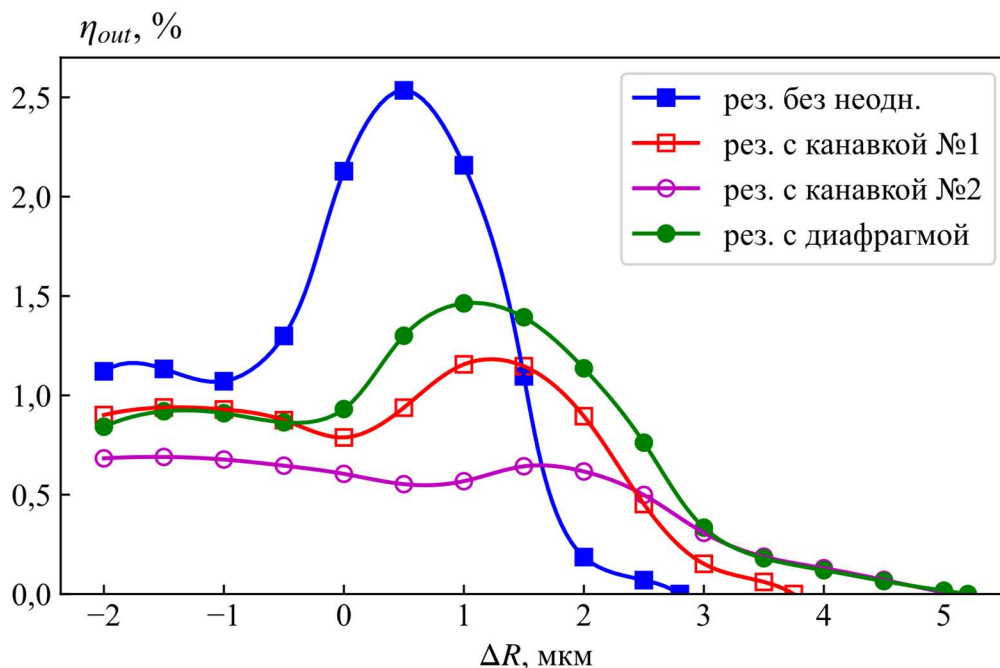


Рисунок 2.14 — Зависимость КПД для случая резонатора без локальной неоднородности, двух вариантов канавки и одной диафрагмы в зависимости от параметра конусности

Как в случае резонатора без локальной неоднородности, так и в случае введения таковой, приемлемый КПД получен и при работе на высоких продольных модах ($q > 1$) (см. рисунок 2.15), что дополнительно расширяет потенциальную полосу перестройки рабочей частоты. Отметим, что данные на рисунках 2.9 и 2.14 приведены с учетом всех возбуждаемых продольных мод. В случае закрывающего резонатора (случай с отрицательным значением параметра конусности ΔR) режим работы гиротрона на моде с одной продольной вариацией становится малоэффективен из-за высокой доли омических потерь. При этом дифракционная добротность мод с бóльшим числом продольных вариаций остаётся сопоставима с омической добротностью, что обеспечивает умеренный уровень омических потерь и соответственно бóльший КПД. В случае резонатора, раскрывающегося в сторону коллектора ($\Delta R > 0$), при общей динамике уменьшения дифракционной добротности и повышения стартового тока по мере раскрытия резонатора прослеживается тренд снижения стартовых токов мод с большим числом продольных вариаций относительно стартового тока первой продольной моды. Этот тренд обусловлен наличием в системе высоких омических потерь, больше влияющих именно на первую продольную моды с наибольшей дифракционной добротностью.

Повысить содержание рабочего типа колебаний в выходном пучке (уменьшить трансформацию мод) можно оптимизацией профиля локальной неоднородности. Например, при одинаковых значениях добротности, по сравнению с 94,5% при прямоугольной форме диафрагмы, для $\sin(z)|_0^\pi$ содержание рабочей моды повышается до 95,9%, а для $\sin^2(z)|_0^\pi$ —

до 96,8%. На практике, однако, наиболее технологичным при относительно малых диаметрах резонатора представляется сборка конструкции из серии цилиндров. Именно поэтому в приведенных выше расчетах форма диафрагмы задавалась прямоугольником, что не накладывает жестких технических ограничений и требований на точность сопряжения элементов.

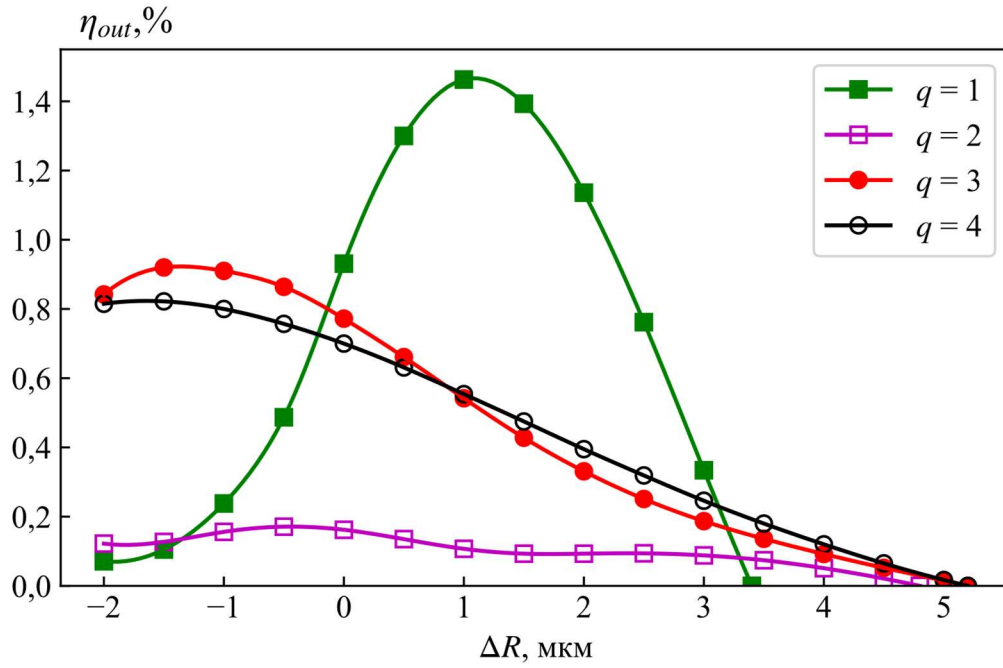


Рисунок 2.15 — Зависимость КПД от параметра конусности резонатора для мод с различным числом продольных вариаций в случае резонатора с диафрагмой

2.3 Специфика влияния омических потерь на работу гиротронов терагерцового диапазона

За время развития гиротронов предложено и проанализировано множество различных методов селекции, но вне зависимости от метода одной из главнейших проблем гиротронов субтерагерцового и, тем более, терагерцового диапазонов являются высокие омические потери. Указанные потери не только ограничивают мощность выходного излучения и коэффициент полезного действия гиротрона, но и существенно влияют на устойчивость его рабочего режима [A9].

2.3.1 Влияние омических потерь на эффективность электронно-волнового взаимодействия

Для анализа влияния омических потерь на волновой КПД гиротрона воспользуемся известным соотношением

$$\eta_{out} = \left(\frac{Q_{ohm}}{Q_{ohm} + Q_{dif}} \right) \eta_{el}, \quad (2.1)$$

где η_{el} , η_{out} — электронный и волновой КПД, Q_{dif} , Q_{ohm} — дифракционная и омическая добротности соответственно. Электронный КПД определяется эффективностью преобразования энергии электронного пучка в ВЧ излучение и равен отношению мощности, передаваемой электронным пучком высокочастотному полю, к мощности электронного пучка. Дифракционная добротность в резонаторе гиротрона, как правило, близка к удвоенной минимальной дифракционной добротности и может быть определена как $Q_{dif} \approx 2 \cdot Q_{dif,min} = 8\pi \cdot (L/\lambda)^2$. Омическую добротность определим как (см. например, [151])

$$Q_{ohm} = \frac{\pi Z_0 R_r}{\lambda Z_s} \left(1 - \frac{m^2}{v_{mp}^2} \right), \quad (2.2)$$

где R_r — радиус резонатора, v_{mp} — p -ый корень функции Бесселя J_m' , $Z_0 \approx 377$ Ом — волновое сопротивление в вакууме. Реальная часть поверхностного импеданса зависит от длины волны [152]:

$$Z_s = k_0 \cdot \sqrt{\frac{\pi Z_0}{\mu_m \sigma \lambda}}. \quad (2.3)$$

Здесь k_0 — коэффициент потерь, учитывающий влияние микронеровностей поверхности резонатора, σ — удельная проводимость по постоянному току, зависящая от температуры, μ_m — относительная магнитная проницаемость. Согласно [153, 154] коэффициент потерь k_0 в проводнике с глубиной скин-слоя гладкой поверхности d и среднеарифметической высотой микронеровностей R_a определяется эмпирической формулой

$$k_0 = \left(1 + th \left(\frac{R_a}{1,8d} \right) (K - 1) \right), \quad (2.4)$$

где K — коэффициент шероховатости (отношение длины микропрофиля к длине профиля идеально гладкой токонесущей поверхности).

По мере продвижения в терагерцовый диапазон и, соответственно, уменьшения длины волны происходит миниатюризация пространства взаимодействия, а омическая и дифракционная добротности электродинамической системы меняются по законам: $Q_{ohm} = C_2 R_r / \sqrt{\lambda [\text{мм}]}$ и $Q_{dif} = C_1 (L/\lambda)^2$. Хотя величины C_1 и C_2 зависят от свойств металла резонатора, от его профиля и рабочего типа колебания, для приближенных предварительных аналитических оценок будем считать их постоянными. В первоначальных оценках пренебрежём зависимостью электронного КПД от уровня омических потерь. В этом случае (2.1) преобразуется к виду

$$\eta_{out} = \left(\frac{C_2 (R_r/\lambda) \sqrt{\lambda [\text{мм}]}}{C_2 (R_r/\lambda) \sqrt{\lambda [\text{мм}]} + C_1 (L/\lambda)^2} \right) \eta_{el} \approx \left(\frac{\sqrt{\lambda [\text{мм}]}}{\sqrt{\lambda [\text{мм}]} + C_3} \right) \eta_{el}. \quad (2.5)$$

Величина $C_3 = C_1(L/\lambda)^2 / (C_2(R_r/\lambda))$ при масштабировании всех элементов электродинамической системы пропорционально длине волны не меняется. Как видно из (2.5), по мере роста рабочей частоты всё большую роль играют омические потери, приводящие к снижению эффективности работы гиротронов.

Для анализа влияния омических потерь на эффективность электронно-волнового взаимодействия и на конкуренцию мод рассматривается серия гиротронов, работающих в разных диапазонах (0,03–1 ТГц) с одинаковыми рабочими параметрами (ускоряющим напряжением 15 кВ, током пучка 0,5 А и питч-фактором 1,4). Далее сопоставляются два варианта гиротрона, работающие на частотах 0,03 ТГц (низкочастотный вариант) и 0,5 ТГц (высокочастотный вариант). В качестве рабочей моды, для примера, выбрана мода $TE_{28,3}$, работающая на второй циклотронной гармонике. Выбранная мода $TE_{28,3}$ находится в плотном спектре мод (см. рисунок 2.16). Основным конкурентом является мода $TE_{-10,3}$, синхронная с пучком на основном циклотронном резонансе.

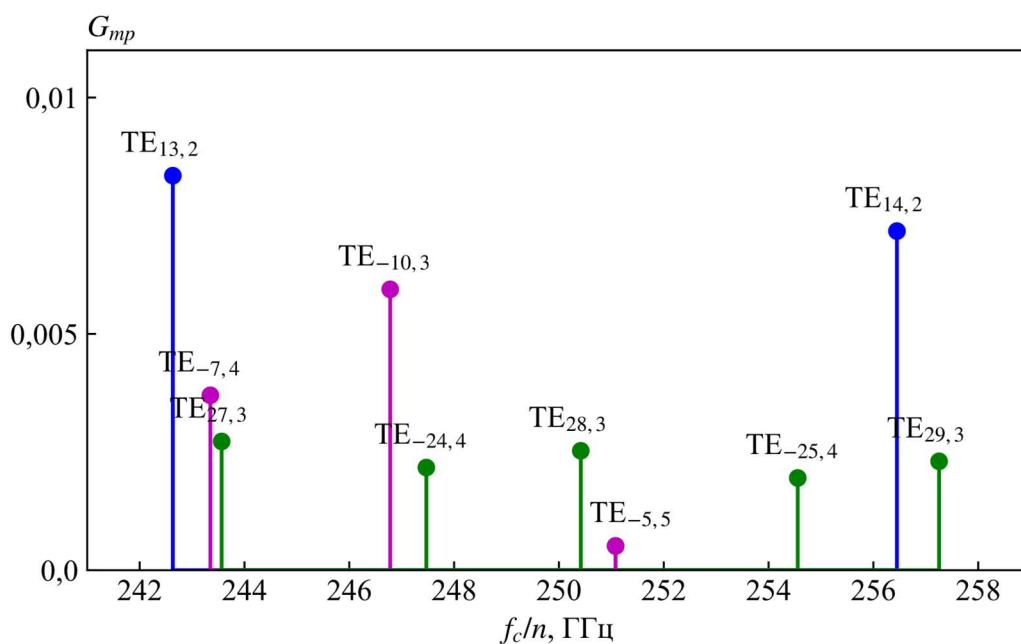


Рисунок 2.16 — Спектр вблизи рабочей моды $TE_{28,3}$

Для низкочастотного варианта при длине резонатора 330 мм и радиусе 65,2 мм величина C_3 приблизительно равна 2,2. По (2.5) при переходе к высокочастотному варианту гиротрона и масштабировании всей электродинамической системы КПД уменьшается в 2,3 раза. Заметим, что низкочастотный вариант гиротрона на моде $TE_{28,3}$ вряд ли целесообразно реализовать из-за больших размеров электродинамической системы. Тем не менее, выбранная мода является типичной в случае гиротронов терагерцового диапазона и имеет характерную для гиротронов данного диапазона проблему конкуренции мод.

Дальнейшие расчёты эффективности гиротронов проведены в рамках самосогласованной модели (см. приложение А) с учётом омической добротности (2.2) и относительного разброса осцилляторных скоростей 30%. Определение добротности (2.2) отличается от формулы, приведенной в приложении А. Предложенный здесь подход позволяет лучше описать влияние шероховатости поверхности на работу гиротронов в терагерцовом диапазоне. При определении омической добротности использовался поверхностный импеданс бескислородной стандартной меди, измеренный по специальной методике (см. п. 2.3.3). При росте рабочей частоты доля омических потерь растёт, в том числе из-за увеличения параметра k_0 , отражающего усиливающее влияние микронеровностей поверхности резонатора. Параметр среднеарифметической высоты неровностей оценивался как 0,2 мкм, параметр шероховатости взят равным 1,6. Так, при переходе от низкочастотного к высокочастотному варианту гиротрона коэффициент потерь k_0 менялся от 1,14 до 1,45. Заметим, подобный множитель, связанный с микронеровностями поверхности резонатора, обычно оценивается равным двум (см., например, [155]), что означало, что толщина скин-слоя из-за шероховатостей вдвое превышает теоретическую.

Для каждого варианта гиротрона величина магнитного поля и длина резонатора оптимизировались в целях достижения наибольшего КПД. Вместе с ростом частоты генерации растёт нормированная длина резонатора. Так, в случае низкочастотного варианта гиротрона оптимизированная длина резонатора равна 330 мм (33λ), в случае высокочастотного варианта — 24 мм (40λ). Рост омических потерь при масштабировании электродинамической системы приводит к снижению полной добротности резонатора, что может привести к срыву генерации. В этом случае, увеличение длины резонатора позволяет снизить стартовый ток и повысить эффективность электронно-волнового взаимодействия, но при этом дополнительно увеличивается влияние омических потерь на работу гиротрона.

Рисунок 2.17 показывает расчётное продольное распределение амплитуды высокочастотного поля в пространстве взаимодействия рабочей моды и её конкурента в режиме с оптимальным для моды $TE_{28,3}$ магнитным полем. Здесь мода $TE_{28,3}$ имеет похожую на функцию Гаусса продольную структуру ВЧ-поля. При таком распределении, как правило, мода имеет высокую дифракционную добротность и, как следствие, высокую долю омических потерь в терагерцовом диапазоне. При этом мода $TE_{-10,3}$ является бегущей (имеет продольную структуру поля с несколькими вариациями ВЧ-поля) и из-за высоких дифракционных потерь имеет меньшую долю омических потерь (см. (2.1)).

На рисунке 2.18 показана характерная зависимость оптимизированного волнового КПД и доли омических потерь при работе на моде $TE_{28,3}$ в интервале частот 0,03–1 ТГц. При переходе от низкочастотного (30 ГГц) к высокочастотному (500 ГГц) варианту гиротрона расчётный

волновой КПД уменьшается с 10,4% до 2,3% (в 4,5 раза), при этом электронный КПД равен 16,5% и 10,5% соответственно, а доля омических потерь увеличивалась с 40% до 85% (в 2 раза). Для варианта гиротрона с частотой генерации 1 ТГц оптимальный волновой КПД составил лишь 1,35%. Отметим, что при переходе от низкочастотного к высокочастотному варианту гиротрона омические потери практически не влияют на эффективность электронно-волнового взаимодействия в случае работы паразитной моды $TE_{-10,3}$. Немонотонная зависимость волнового КПД связана с изменением продольной структуры паразитной моды.

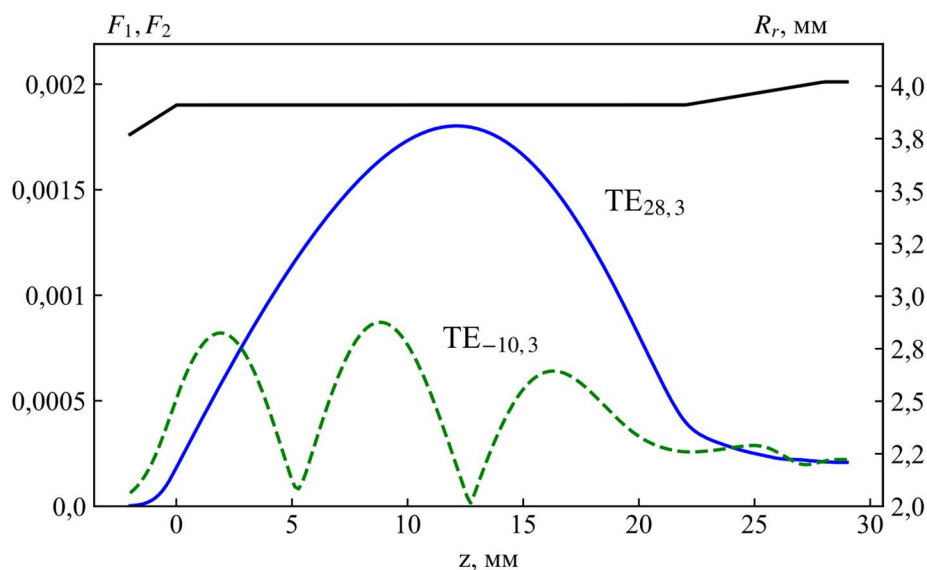


Рисунок 2.17 — Профиль резонатора и продольная структура амплитуды ВЧ-поля в резонаторе гиротрона рабочей моды $TE_{28,3}$ и паразитной моды $TE_{-10,3}$

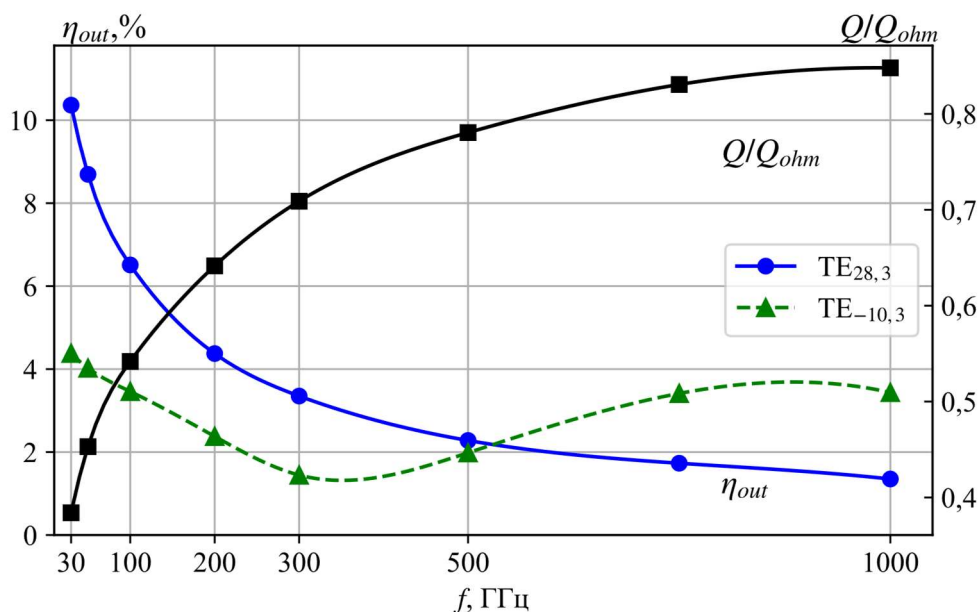


Рисунок 2.18 — Характерная зависимость КПД рабочей моды $TE_{28,3}$ (круги) и паразитной моды $TE_{-10,3}$ (треугольники) от частоты генерации. Квадратными маркерами показана расчётная зависимость доли омических потерь в резонаторе в случае работы на моде $TE_{28,3}$

2.3.2 Влияние омических потерь на устойчивость рабочего режима

Наряду с падением эффективности гиротрона рост доли омических потерь может приводить к нарушению устойчивости режима стационарной генерации, в особенности при работе на высоких циклотронных гармониках. Рассмотрим тенденции в изменении стартовых токов, следующие из линейной теории. На рисунке 2.19 изображена зависимость стартовых токов мод для высокочастотного варианта гиротрона. Звездой указан режим работы с наибольшим волновым КПД. В высокочастотном варианте увеличение длины резонатора в длинах волн до 40λ позволяет снизить стартовый ток рабочей моды примерно до 0,1 А в минимуме (практически совпадает с минимальным стартовым током рабочей моды в низкочастотном варианте при длине резонатора 33λ). Но вместе с этим снижается стартовый ток паразитной моды, что ухудшает селекцию рабочей моды.

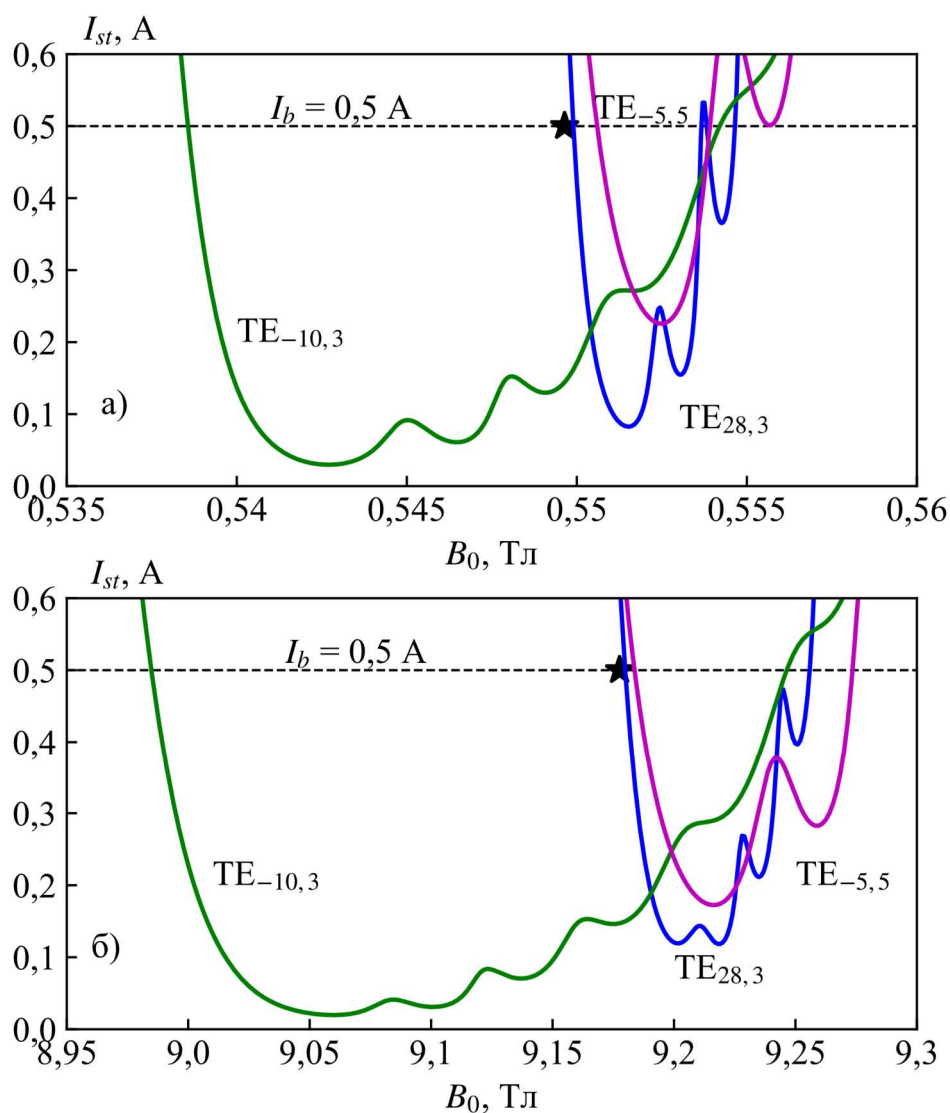


Рисунок 2.19 — Стартовые токи рабочей моды $TE_{28,3}$ и паразитных мод в зависимости от магнитного поля. (а) Низкочастотный вариант. (б) Высокочастотный вариант

Рассмотрим проблему конкуренции мод $TE_{28,3}$ и $TE_{-10,3}$ в рамках многомодовой модели [156, 157]. В двухмодовом приближении условие устойчивости одномодовой генерации на рабочей моде (при разных значениях ее амплитуды F_1 и при амплитуде паразитной моды $F_2 = 0$) можно представить в виде

$$\frac{\widehat{\Phi}_1(F_1, F_2 = 0)}{\widehat{\Phi}_2(F_1, F_2 = 0)} > \hat{q}, \text{ где} \quad (2.6)$$

$$\hat{q} = A_{1,2} \cdot \frac{\omega_1 Q_2 G_{mp2} \int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} |f_2(\zeta)|^2 d\zeta}{\omega_2 Q_1 G_{mp1} \int_{\zeta_{in}}^{\zeta_{out}} |f_1(\zeta)|^2 d\zeta}; \quad A_{1,2} = \frac{\left(\frac{n_2^{n_2+1}}{2^{n_2} n_2!}\right)^2 \beta_{\perp 0}^{2(n_2-2)}}{\left(\frac{n_1^{n_1+1}}{2^{n_1} n_1!}\right)^2 \beta_{\perp 0}^{2(n_1-2)}}.$$

Здесь $\widehat{\Phi}_s$ — приведённый фактор возбуждения s -й моды электронным пучком, $f_s(\zeta)$ — (фиксированная) продольная структура s -й моды, n_s — номер циклотронной гармоники s -й моды, ω_s и Q_s — собственная частота и добротность s -й моды, ζ_{in} и ζ_{out} — безразмерные продольные координаты на входе и выходе пространства взаимодействия соответственно. Параметр \hat{q} определяется отношениями как добротностей и норм конкурирующих мод, так и факторов G_{mps} , характеризующих эффективность взаимодействия пучка с высокочастотным полем s -й моды. Заметим, что параметр \hat{q} количественно характеризует эффективность линейной селекции. Подробно обозначения приведены в [156, 157].

Важным параметром в условии (2.6) является множитель $A_{1,2}$. При конкуренции мод на первой и второй гармониках параметр $A_{1,2}$ принимает вид $1/4\beta_{\perp 0}^2$ и при напряжении 15 кВ и $g = 1,4$ равен 13,2, тогда как при конкуренции двух мод на основном циклотронном резонансе этот множитель отсутствует. Указанный множитель (но не только он) показывает, что при работе на высоких циклотронных гармониках обостряется конкуренция со стороны мод, работающих на более низких гармониках.

Существенным в условии (2.6) является отношение полной добротности паразитной моды к добротности рабочей моды Q_2/Q_1 . В случае низкочастотного варианта гиротрона вклад омической в полную добротность пренебрежимо мал, тогда параметр Q_2/Q_1 определяется главным образом отношением дифракционных добротностей и принимает значение $q_1/4q_2$, где q_s — аксиальный индекс s -й моды. В случае высокочастотного варианта гиротрона полная добротность рабочей моды резонатора приближается к омической, отношение полных добротностей приближается к $q_1/\sqrt{2}q_2$. Таким образом, параметр \hat{q} при продвижении в терагерцовый диапазон в пределе увеличивается в $2\sqrt{2}$ раз, что приводит к значительному снижению устойчивости рабочей моды.

Эффект влияния омических потерь на конкуренцию мод исследовался в рамках многомодовой модели, учитывающей нефиксированную продольную структуру высокочастотного поля [А4]. Для анализа конкуренции двух мод с учётом высокой доли омических потерь построены фазовые плоскости (точнее, проекции на плоскость) F_1 и F_2 (нормированные амплитуды мод $TE_{28,3}$ и $TE_{-10,3}$ соответственно) для вариантов гиротрона, работающих в разных диапазонах частот (рисунок 2.20). Рассматривались режимы работы, соответствующие наибольшему КПД гиротрона при работе на моде $TE_{28,3}$. В случае низкочастотного варианта гиротрона режим генерации на моде $TE_{28,3}$ является устойчивым. Нормированная амплитуда рабочей моды, соответствующая стационарной одномодовой генерации, уменьшается с ростом частоты из-за увеличения омических потерь в системе, тогда как точка устойчивой генерации паразитной моды почти не смещается. При росте омических потерь особая точка «седло» приближается к особой точке «устойчивый узел», соответствующей одномодовому режиму работы. При дальнейшем увеличении омических потерь происходит бифуркация особых точек (превращение особых точек «устойчивый узел» и «седло» в особую точку «седло-узел»), приводящих к неустойчивости рабочего режима в случае высокочастотного варианта гиротрона. При этом режим генерации на паразитной моде остаётся устойчивым во всем рассмотренном диапазоне частот. Рисунок 2.21 показывает временные зависимости нормированных амплитуд рассматриваемых мод. В ходе расчётов начальная амплитуда моды $TE_{28,3}$ задавалась равной стационарному значению, при этом амплитуда моды $TE_{-10,3}$ задавалась на уровне шумов.

Отмеченные явления практически делают нереализуемыми высокоэффективные канонические гиротроны на высоких гармониках циклотронной частоты. Заметим, что в некоторых случаях, тем не менее, иногда возможен режим работы с устойчивой одночастотной генерацией, который может быть реализован, например, при помощи изменения (уменьшения) длины резонатора ценой значительного снижения волнового КПД. Это делает актуальным поиск новых методов селекции для дальнейшего продвижения в терагерцовый диапазон.

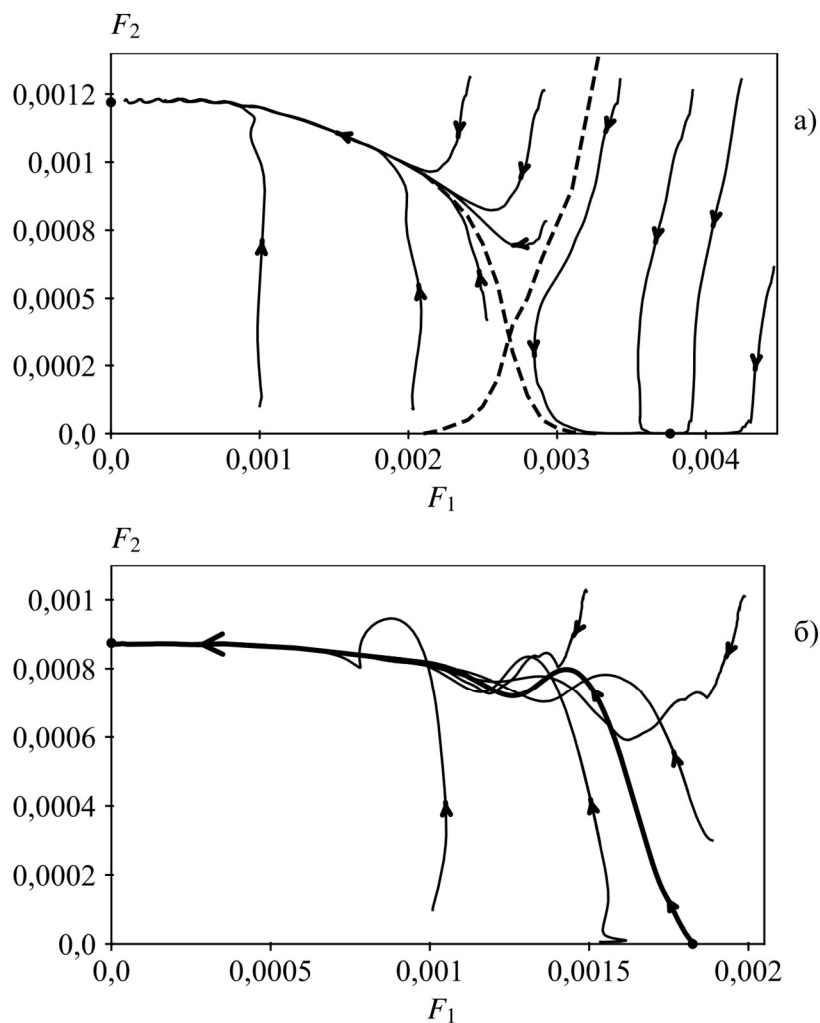


Рисунок 2.20 — Фазовые плоскости амплитуд рабочей и паразитной мод в случае низкочастотного (а) и высокочастотного (б) гиротрона

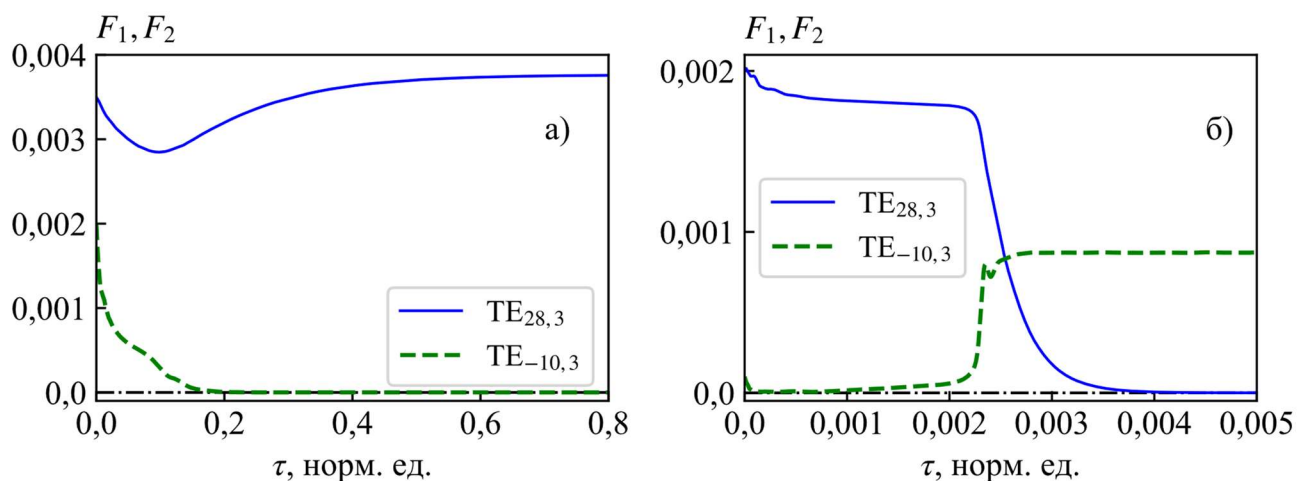


Рисунок 2.21 — Зависимость амплитуд F_1 и F_2 мод $TE_{28,3}$ и $TE_{-10,3}$ соответственно, полученных в рамках многомодовой модели. (а) Низкочастотный вариант. (б) Высокочастотный вариант

2.3.3 О возможности снижения доли омических потерь в терагерцовых гиротронах малой мощности путем охлаждения его резонатора до криогенных температур

Существует множество различных способов уменьшения доли омических потерь в резонаторе гиротрона. Одним из распространённых является оптимизация профиля резонатора. Уменьшение угла раскрытия выходного рупора или переход от конусообразного к плавно раскрывающемуся выходному рупору резонатора позволяет, в некоторой мере, уменьшить дифракционную добротность при слабом изменении омической добротности электродинамической системы [158, 32]. Добавление различных неоднородностей в регулярную часть резонатора также может способствовать уменьшению дифракционной добротности и соответственно снижению доли омических потерь [112]. Важным способом непосредственного уменьшения доли омических потерь в резонаторе гиротрона является оптимизация технологии изготовления и методов обработки внутренней поверхности резонатора [153, 159].

Есть и другие возможности уменьшения доли омических потерь. Для снижения омических потерь целесообразно рассмотреть возможность использования криопроводников (по [160]), называемых в литературе также гиперпроводниками [161]. Охлаждение металлических проводников до низких (криогенных) температур (без перехода в сверхпроводящее состояние) позволяет существенно снизить их электросопротивление. По правилу Матиссена-Флеминга [162, 163] электрическое сопротивление слабо концентрированного твёрдого раствора подчинено уравнению

$$\rho = \rho_{id} + \rho_{ost}, \quad (2.7)$$

где ρ_{id} — удельное электросопротивление основного компонента, зависящее от температуры; ρ_{ost} — остаточное сопротивление, не зависящее от температуры, обусловленное наличием примесных атомов и пропорциональное концентрации добавки. В (2.7) можно независимо понижать ρ_{id} и ρ_{ost} : ρ_{id} — путем выбора материала резонатора и температурного режима; ρ_{ost} — при помощи уменьшения влияния примесей на проводимость металла. При температуре жидкого водорода наибольший интерес в качестве криопроводника представляют особо чистые медь и алюминий (марки А999 с 0,001% примесей), при температуре жидкого азота — бериллий. Чистый бериллий при температуре жидкого азота имеет минимальное удельное сопротивление, но при этом является весьма дорогим и сложным в технологическом плане материалом. Отметим, что одновременно с электропроводностью существенно возрастает и теплопроводность указанных материалов, что для наших целей также является позитивным эффектом.

Для анализа перспективности снижения доли омических потерь при помощи охлаждения резонатора вплоть до криогенных (азотных) температур использованы результаты экспериментального исследования отражательной способности различных металлов. Измерения выполнены при помощи спектрометра на базе высокочастотного резонатора Фабри-Перо, разработанного в ИПФ РАН [30], позволяющего проводить измерения в диапазоне температур от 4 К до 370 К. Схема спектрометра изображена на рисунке 2.22.

Принцип измерения заключался в определении с высокой точностью добротности резонатора, которая зависит от потерь энергии в нём, включая омические потери в зеркалах:

$$\frac{1}{Q_{FP}} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\lambda}{2\pi L} \cdot (0,5 \cdot (\Delta P_{mirr1} + \Delta P_{mirr2}) + \Delta P_{coupl} + \Delta P_{difr}), \quad (3.8)$$

где Q_{FP} — добротность резонатора Фабри-Перо, ΔP_{mirr1} и ΔP_{mirr2} — относительные потери энергии при отражении от первого и второго зеркал резонатора, ΔP_{coupl} — потери на связь, ΔP_{difr} — дифракционные потери. Для используемой в эксперименте конфигурации резонатора дифракционные потери пренебрежимо малы (это достигается путём соответствующего выбора диаметра зеркал и длины резонатора).

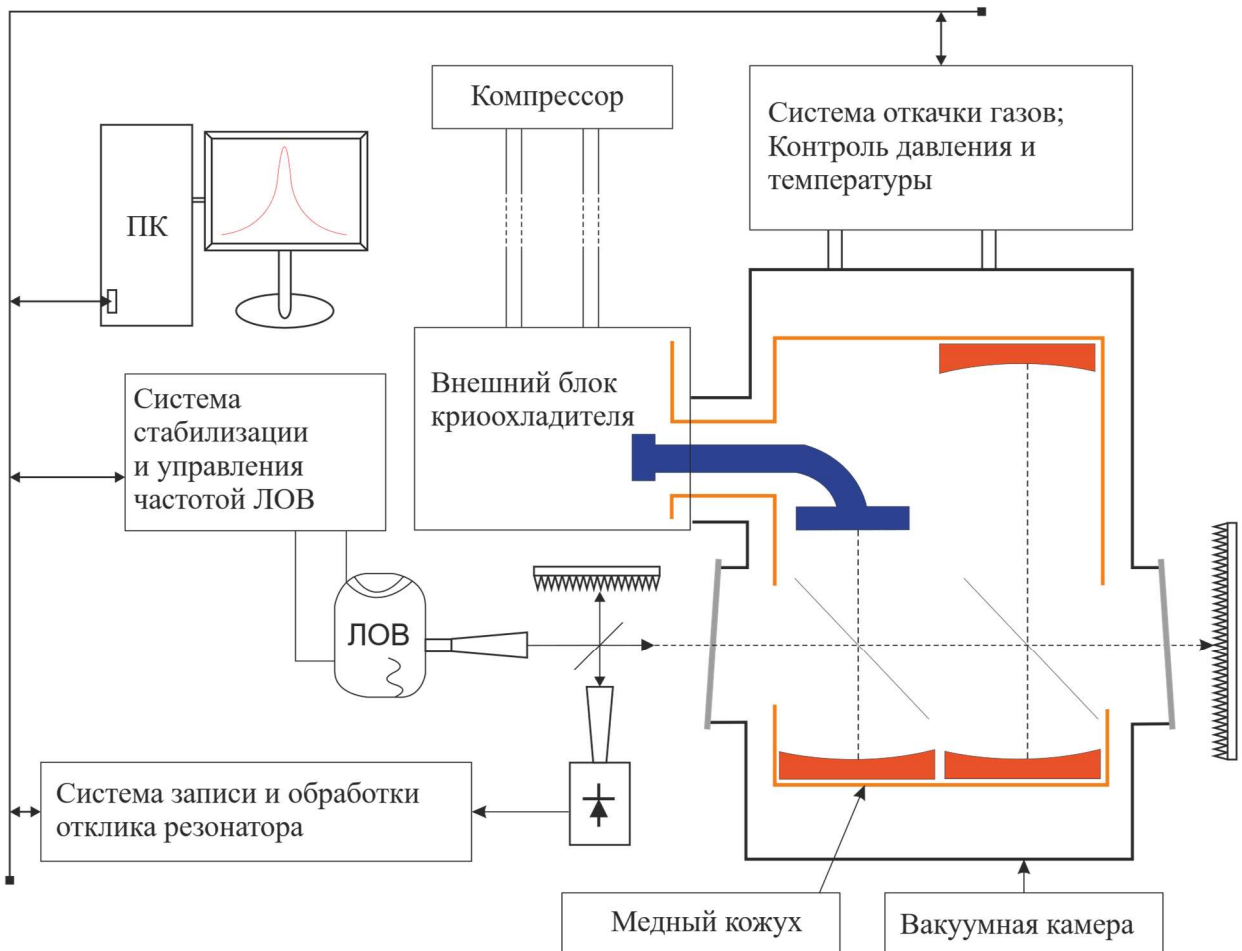


Рисунок 2.22 — Схема резонаторного спектрометра [30]

В измерительной установке использовались два резонатора, отличающиеся по длине в 2 раза. «Короткий» резонатор образован плоским и сферическим зеркалами, а «длинный» — двумя сферическими. Все три сферических зеркала полностью идентичны и имеют совпадающие с высокой точностью потери. В качестве плоского зеркала «короткого» резонатора использовался исследуемый образец. Для расчёта потерь при отражении от образца через ширину резонанса «короткого» резонатора по формуле (2.8) необходимо определить потери в сферическом зеркале и потери на связь. Потери на связь, определяемые коэффициентом отражения тонкой диэлектрической плёнки связи, идентичны для двух резонаторов и определяются из независимых измерений. Потери в сферических зеркалах находятся из ширины резонанса «длинного» резонатора. Таким образом, в результате измерения ширины резонансов для «длинного» и «короткого» резонаторов на частотах основных мод резонаторов и использования формулы (2.8) определяются потери на отражение. Их величина прямо пропорциональна реальной части поверхностного импеданса металла:

$$\Delta P_{mirr} = 4Z_s/Z_0. \quad (2.9)$$

Подробное описание экспериментальной установки, процедуры измерения и результатов содержится в работе [164]. Кроме традиционного материала для резонаторов гиротронов — стандартной бескислородной меди (OFC), рассматривались и другие материалы: высокочистая медь (99,999%), гальваническое золото, алюминий. При охлаждении металла до криогенных температур приближение нормального скин-эффекта может нарушаться, т.е. формула (2.3) перестает описывать зависимость поверхностного импеданса металла от длины волны и температуры, но соотношение (2.2) по-прежнему выполняется, т.к. следует из граничных условий. Поверхностное сопротивление металлов (реальная часть поверхностного импеданса) определялось экспериментально с помощью выражения (2.9). Результаты измерений температурной зависимости потерь на отражение для разных металлов на частоте 230 ГГц показаны на рисунке 2.23. Красные заполненные квадраты соответствуют высокочистой меди (ВЧ-медь), коричневые полые квадраты — стандартная бескислородной меди, чёрные полые круги — алюминию, синие заполненные круги — гальваническому золоту. Линии соответствующего цвета — гладкие аппроксимации (подробное описание результатов представлено в [164]).

Основные результаты расчётов для высокочастотного (0,5 ТГц) варианта гиротрона представлены на рисунках 2.24 и 2.25. Переход к работе высокочастотного варианта гиротрона с охлаждаемым до температуры 80 К резонатором позволяет повысить омическую добротность в 1,67 раз, а КПД — с 2,3% до 4,2% (в случае стандартной бескислородной меди), при этом доля омических потерь снизилась с 85% до 72%. Для каждого варианта гиротрона со своим материалом резонатора и уровнем охлаждения длина резонатора и величина магнитного поля

оптимизировались отдельно. По мере охлаждения резонатора до криогенных температур происходит обратная бифуркация особых точек (особая точка «седло-узел» распадается на особые точки «устойчивый узел» и «седло»), приводящая к устойчивой одночастотной генерации на рабочей моде. В случае использования стандартной бескислородной меди устойчивая генерация в оптимальном режиме появляется при работе с резонатором, охлаждённым до 220 К. Переход к использованию резонаторов из высокочистой меди позволяет повысить омическую добротность на 20%, а волновой КПД с 2,3% до 2,8%, при этом устойчивая генерация в оптимальном режиме наблюдается уже при комнатной температуре.

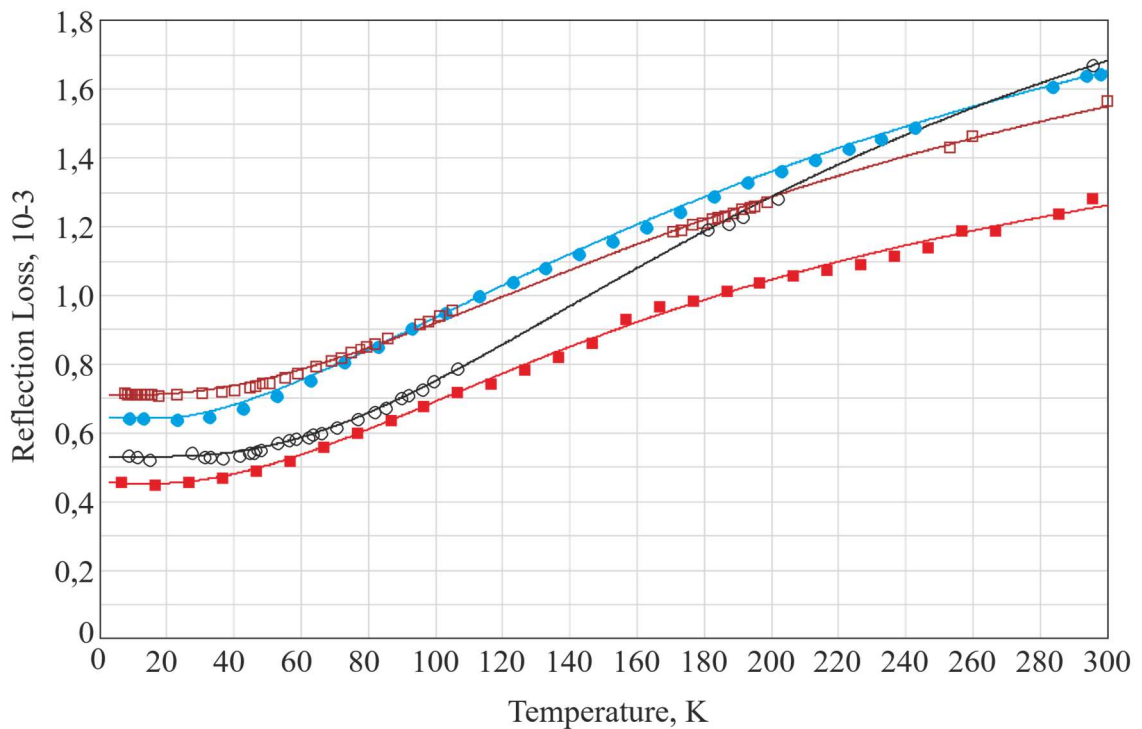


Рисунок 2.23 — Экспериментально измеренные температурные зависимости потерь на отражение для разных металлов на частоте 230 ГГц

В случае варианта гиротрона с частотой генерации 1 ТГц при использовании стандартной бескислородной меди охлаждение резонатора до температуры жидкого азота уже не позволяет получить устойчивую одночастотную генерацию. Тем не менее, устойчивая генерация наблюдалась в расчётах с уменьшенной (при незначительном снижении КПД гиротрона) длиной охлаждённого до 80 К резонатора из стандартной бескислородной меди и в случае использования в качестве материала резонатора высокочистой меди, охлаждённой до 80 К.

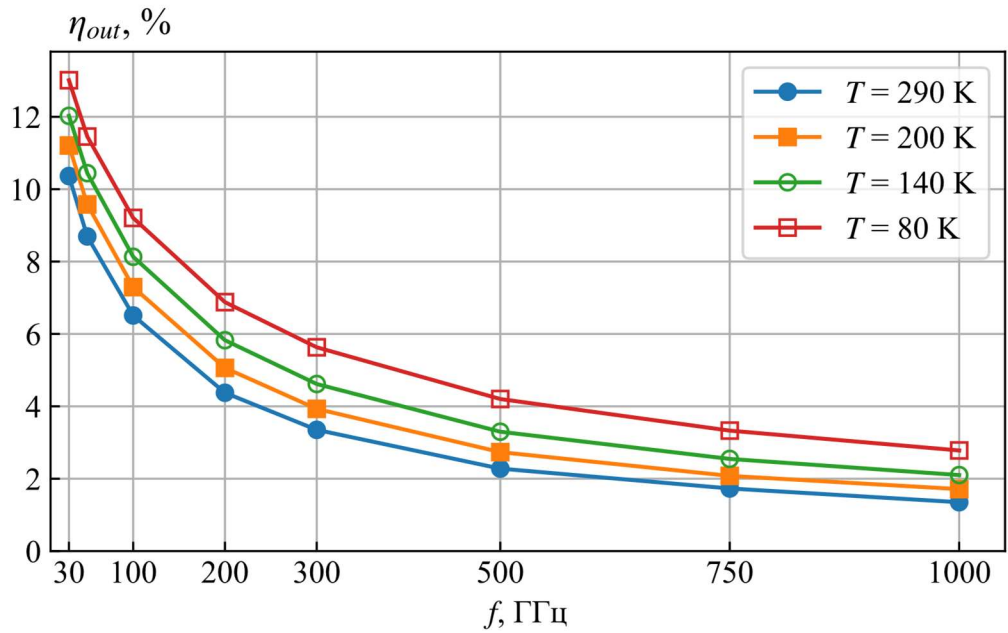


Рисунок 2.24 — Зависимость оптимизированного волнового КПД гиротрона от частоты генерации при работе на моде $TE_{28,3}$

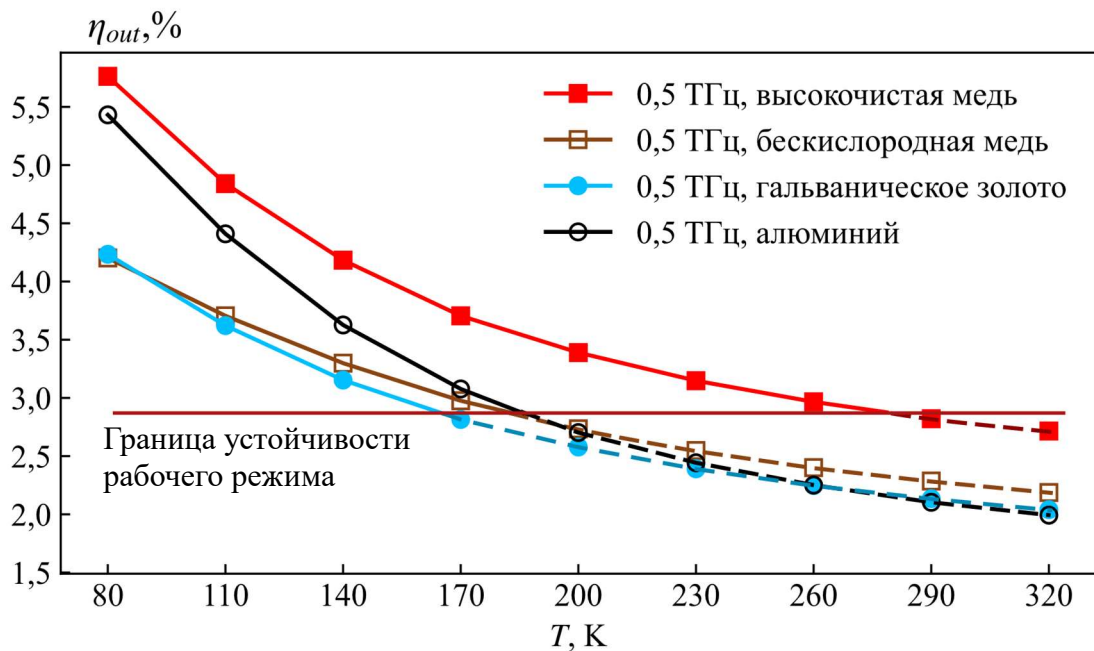


Рисунок 2.25 — Расчётные температурные зависимости оптимизированного КПД высокочастотного варианта гиротрона

Из рассмотренных материалов особый интерес представляет алюминий. При охлаждении до азотных температур электропроводность алюминия приближается к значениям идеальной меди. Другой перспективный вариант, гальваническое золото, не дает ощутимый эффект и остаётся на уровне проводимости стандартной бескислородной меди. Разумеется,

охлаждение резонаторов реализуемо только в гиротронах сравнительно малой мощности, когда производительность системы охлаждения превосходит уровень омических потерь в резонаторе гиротрона и в случае импульсных гиротронов. Маломощные гиротроны могут использоваться для задач спектроскопии (охлаждение способствует и стабилизации частоты) или в качестве задающих генераторов сверхмощных гиротронных комплексов.

2.4 Основные выводы по главе 2

Как показали результаты численного моделирования и экспериментальных исследований, введение в гиротрон селективной обратной связи может способствовать работе гиротрона на высоких циклотронных гармониках. В ходе эксперимента путем введения в систему отраженного сигнала при помощи изменения толщины выходного окна были получены рекордные значения КПД и выходной мощности гиротрона на рабочей моде, синхронной с третьей гармоникой гирочастоты, в непрерывном режиме. Максимальная мощность выходного излучения в непрерывном режиме, составила 3 кВт при КПД 8% на частоте 40,5 ГГц. Данный подход легко масштабируется при укорочении длины волны и может быть успешно применён в гиротронах других диапазонов, в частности, может быть использован в W-диапазоне [А6].

По мере роста частоты генерации и продвижения в терагерцовый диапазон всё большую роль играют омические потери в стенке резонатора. Высокие омические потери в терагерцовых гиротронах влияют как на эффективность, так и на устойчивость их рабочего режима. Наряду с оптимизацией геометрии электродинамических систем и совершенствованием технологических процессов, одним их перспективных методов понижения доли омических потерь в изготовленных из высокочистых металлов резонаторах субтерагерцового и терагерцового диапазонов является их охлаждение до криогенных температур. Данный метод позволяет не только значительно повысить КПД терагерцовых гиротронов, но и способствует повышению устойчивости одномодового режима генерации.

С другой стороны, в гиротронах терагерцового диапазона критически важным является точность изготовления резонатора, поскольку небольшие отклонения от проектного профиля могут привести к заметному снижению эффективности или к отсутствию генерации. На основе численного моделирования процесса взаимодействия электронного пучка с полем в конусном резонаторе показано, что при оптимизированных размерах контролируемой неоднородности можно обеспечить сохранение приемлемого уровня выходного КПД и модового состава излучения в достаточно широком интервале возмущений профиля резонатора.

ГЛАВА 3. Многоствольные гиротронные системы для обеспечения многочастотной генерации

Существенным недостатком канонического гиротрона при продвижении в терагерцовый диапазон и при переходе к работе на высоких циклотронных гармониках является обострение проблемы конкуренции со стороны мод, работающих на более низких гармониках. С другой стороны, в гиротронах весьма ограничены возможности перестройки частоты, что уменьшает частотные возможности отдельного гиротрона и снижает количество потенциальных приложений. Вместе с ростом интереса к субтерагерцовому и терагерцовому диапазонам частот растут требования к потенциальным источникам в этих диапазонах, которые канонический (классический) гиротрон удовлетворить уже не может. Всё больший интерес начинают представлять неканонические варианты гиротронов [29].

В настоящее время существует множество неканонических схем гиротронов, одной из которых является гиротрон с приосевым пучком, так называемый гиротрон с большой орбитой (ГБО) [120–126]. В ГБО электроны движутся по винтовым траекториям вокруг оси аксиально симметричного резонатора. Такой пучок значительно разрежает спектр мод и тем самым упрощает селективное возбуждение высоких циклотронных гармоник по сравнению с каноническим гиротроном. ГБО обычно работает на высокой гармонике циклотронной частоты, и, следовательно, при работе на одной и той же частоте электромагнитного поля требует меньшее магнитное поле, и имеет больший радиус орбиты электронных траекторий по сравнению с обычным гиротроном «с малой орбитой». Как правило, ГБО имеет сложную неадиабатическую электронно-оптическую систему с кикером или реверсом магнитного поля с высоким коэффициентом перемагничивания (отношение магнитного поля в пространстве взаимодействия к магнитному полю в прикатодной области). Площадь электронного пучка в поперечном сечении в пространстве взаимодействия ГБО существенно меньше, чем в каноническом гиротроне, что при близкой величине плотности тока пучка приводит к заметно меньшей величине полного тока и мощности пучка. Таким образом, гиротроны с большой орбитой имеют высокую степень селекции, но уровни достижимой мощности заметно ниже, чем для канонических гиротронов. Ещё одним недостатком ГБО также является использование магнитной системы со специфическим распределением магнитного поля которая не является коммерчески широкодоступной. Естественно, такая уникальная магнитная система существенно дороже по сравнению с магнитной системой канонического гиротрона.

Другим примером гиротрона с дополнительной электронной селекцией рабочего типа колебаний являются многолучевые гиротроны [127–133]. Впервые они были предложены ещё в 80-е годы. В многолучевых гиротронах к основному пучку добавляется один или несколько

винтовых электронных пучков. Хотя развитие приборов такого типа испытало некий спад, но в настоящее время прослеживается рост интереса к ним. Вместе с новыми возможностями многолучевые гиротроны имеют и собственный ряд затруднений. Главной проблемой таких приборов является разработка подходящей электронно-оптической системы, формирующей электронные пучки с требуемыми характеристиками.

В многолучевых гиротронах дополнительные электронные пучки могут быть использованы как для подавления паразитных колебаний, так и с целью улучшения условий самовозбуждения рабочей моды. Дополнительный электронный пучок может быть излучающим (активным) или выполнять роль поглотителя. В первом случае радиусы ведущих центров активных пучков выбираются из условий лучшего взаимодействия с полем рабочей моды и наименьшего взаимодействия с полем паразитной моды. Во втором случае дополнительный квазипрямолинейный электронный пучок эффективно взаимодействует с одной из паразитных мод в условиях циклотронного поглощения и подавляет её. С другой стороны, дополнительные электронные пучки могут способствовать возбуждению большего числа рабочих мод, что позволяет значительно лучше освоить рабочий диапазон частот. Заметим, что в большинстве случаев многолучевых гиротронов рассматриваются системы с аксиальной симметрией. Переход к аксиально-несимметричным системам открывает ряд дополнительных возможностей. Так, например, многолучевые гиротроны могут быть построены на основе тонких пучков, находящихся в одной или нескольких плоскостях, что успешно было продемонстрировано в эксперименте [165].

Механизм электронной селекции путем секционирования активной среды целесообразно дополнить посредством использования различных электродинамических методов селекции. Для этого многолучевые системы из пучков разных типов могут быть построены в сочетании с самыми разнообразными электродинамическими системами. В частности, многообещающими выглядят многоствольные гиротроны (МСГ) [A10–A12, A56]. Переход к многолучевым и многоствольным системам открывает возможности построения огромного множества новых, ещё не реализованных гироприборов. Идея многолучевых многоствольных систем в вакуумной высокочастотной электронике является весьма плодотворной и активно используется, например, при создании мощных клистронов [166–168]. В мощных многолучевых клистропах используется несколько электронных пучков, каждый из которых распространяется в своём индивидуальном канале в замедляющей системе или резонаторном блоке. Переход к многолучевым клистропам позволяет снизить ускоряющее напряжение по сравнению с однолучевыми аналогами, что приводит к уменьшению габаритов и массы клистронов, а также источников их электропитания. Низкоперевансные парциальные пучки лучше группируются и более эффективно отдают энергию в выходном резонаторе, что приводит к повышению КПД

клизотронов на 10–20% и дает возможность расширения полосы усиления [167, 168]. Но при этом зависящие от длины волны мелкомасштабные элементы этих приборов не позволяют продвинуться далеко в терагерцовый диапазон. В этой главе рассматриваются возможности расширения частотных характеристик гиротронных приборов при помощи использования многолучевых и многоствольных систем с несколькими винтовыми пучками (лучами) и одним или несколькими параллельно расположенными резонаторами (стволами) с учетом их специфики и уникальных возможностей.

3.1 Описание схемы многоствольного гиротрона

Многоствольные гиротронные системы могут быть реализованы в различных вариантах. (см, например, [165, 169, 170]). Причем электронные пучки могут быть сформированы при помощи одного или нескольких катодно-подогревательных узлов с одним или несколькими областями эмиссии (рисунок 3.1). При этом выбор различных параметрах электронных пучков и разной связи между резонаторами в таких системах позволяет реализовать самые разнообразные стохастические и динамические режимы. Некоторая техническая сложность таких систем может компенсироваться их уникальными характеристиками.

Перспективный вариант многоствольного гиротрона включает систему формирования нескольких винтовых электронных пучков; резонаторную систему, состоящую из нескольких стволов (резонаторов), каждый из которых расположен соосно электронному пучку; и систему вывода энергии с передачей ВЧ-мощности к выходному окну из каждого ствола электродинамической системы (см. рисунок 3.1a). Резонаторы МСГ могут иметь разные геометрические размеры. Каждый из резонаторов работает в режиме с приосевым электронным пучком (как в случае гиротрона с большой орбитой). Движение электронов по винтовым траекториям вокруг оси соответствующего аксиально-симметричного резонатора значительно разрежает эффективный спектр рабочих мод и повышает их селекцию как в случае гиротрона с большой орбитой. Существенно, что все резонаторы МСГ расположены в магнитном поле единой (одной и той же) магнитной системы.

В разработанном устройстве предлагается использование адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (МИП) с секционированной эмиссией, в отличие от подходов к формированию электронного пучка, применяемых обычно в гиротроне с большой орбитой. Магнитная система в этом случае не отличается от магнитных систем обычных гиротронов, что упрощает процесс разработки и способствует снижению стоимости системы. Отметим, что области эмиссии на катоде МИП могут быть расположены на одном или нескольких кольцевых поясах, или произвольным образом относительно центральной оси гиротрона. Использование большего количества областей эмиссии позволяет сформировать большее число винтовых

электронных пучков в поле одной магнитной системы (рисунок 3.2). При этом количество стволов резонаторной системы также увеличится, что позволит использовать магнитную систему более эффективно.

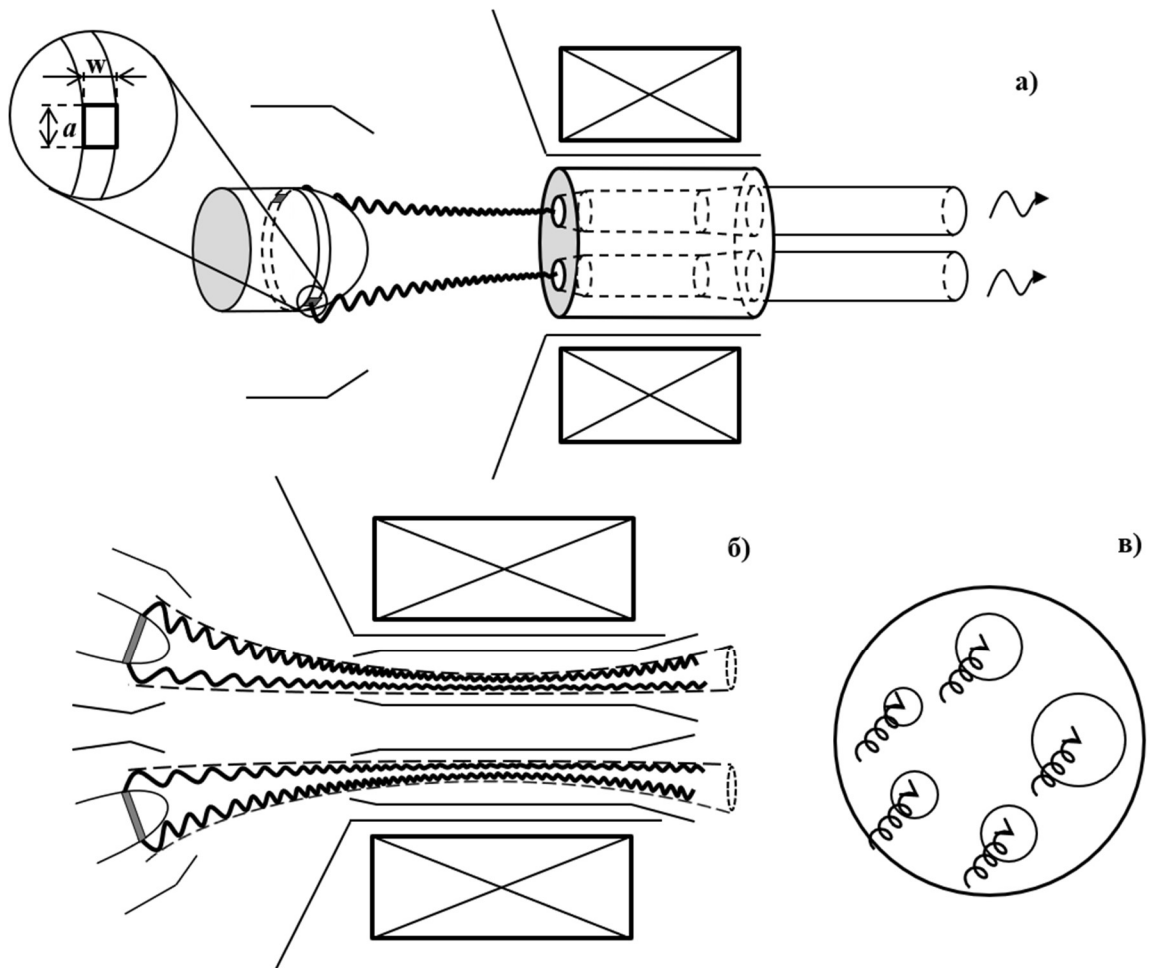


Рисунок 3.1 — Примеры схем построения многоствольного гиротрона с одним (а) и несколькими (б) катодно-подогревательными узлами; вид резонаторной системы в поперечном сечении (в)

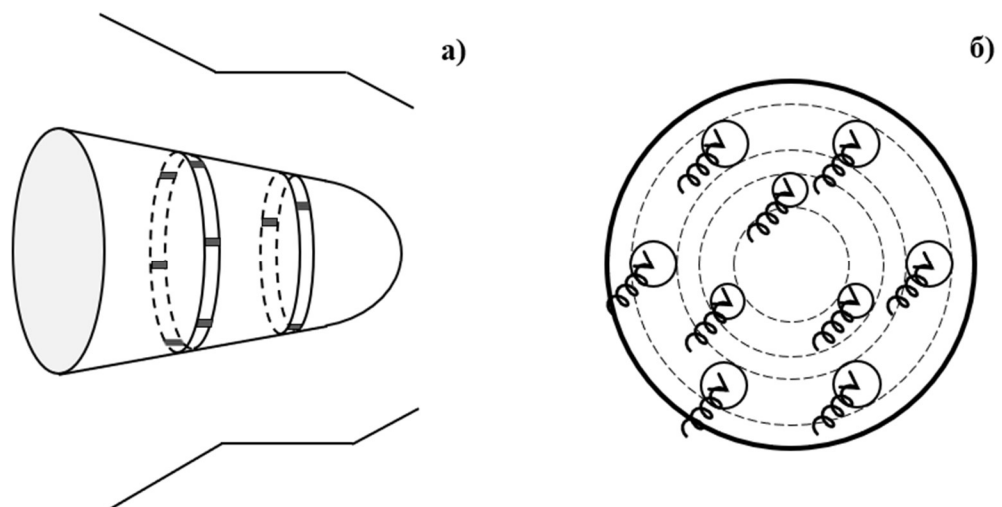


Рисунок 3.2 — Схема МИП с секторами эмиссии, расположенными на двух кольцевых поясах (а) и вид резонаторной системы в поперечном сечении (б)

Отметим, что части магнетронно-инжекторной пушки, которые расположены на расстоянии от эмиттера и не оказывают влияния на формирование электронных пучков, могут быть удалены без ущерба для работы системы. В этом случае может быть заметно уменьшена мощность, которая необходима для обеспечения термоэлектронной эмиссии. Кроме того, несомненным достоинством такого варианта является существенное уменьшение электрической емкости в системе анод-катод, что делает возможным более быстрое управление параметрами электронного пучка.

На начальном этапе исследования многоствольных гиротронов рассматривается простейший вариант системы формирования нескольких винтовых пучков — МИП с секторами эмиссии, равномерно расположенными по азимутальному углу на одном кольцевом пояске. С таким подходом к формированию электронных пучков не требуется специального проектирования электронно-оптической системы (ЭОС): например, может использоваться готовый экземпляр электронной пушки, при этом нужно лишь обеспечить секционирование эмиссии. Данная конструкция, даже в предложенном простейшем варианте, может быть использована, например, с целью одновременной многочастотной генерации на кратных или близких друг к другу частотах или с целью расширения диапазона плавной или ступенчатой перестройки частоты в случае многоствольной электродинамической системы с отличающимися друг от друга радиусами резонаторов.

В многоствольном гиротроне в ходе формирования винтового пучка электроны испытывают поперечный дрейф, приводящий к быстрому отдалению электронов от площадки эмиттера. Вследствие этого электроны практически не формируют облако пространственного заряда вблизи катода и почти не экранируют вылет электронов с эмиттера, что позволяет увеличить плотность эмиссии и рабочий ток. Переход от трубчатого винтового электронного пучка к нескольким тонким винтовым электронным пучкам позволяет также снизить тепловую нагрузку на стенку каждого резонатора и коллекторную систему. Это, в свою очередь, упрощает системы охлаждения как резонатора, в котором происходит электронно-волновое взаимодействие, так и коллектора, на который оседает отработанный электронный пучок. Недостатком рассматриваемой схемы ЭОС является низкий рабочий ток, которого, однако, в ряде случаев может быть вполне достаточно для эффективной генерации ВЧ-излучения в гиротроне умеренной мощности. Описанный вариант ЭОС для многоствольного гиротрона выглядит наиболее простым и является предпочтительным с точки зрения возможности реализации с минимальными затратами.

В отличие от канонического гиротрона с аксиально-симметричной МИП в многоствольном гиротроне средний радиус встрела пучка (средняя координата ведущих центров электронных орбит в пространстве взаимодействия) не следует из выбора рабочего

типа колебаний, а наоборот, сам определяет положение каждого ствола резонаторной системы. При проектировании МИП радиус встрела являлся свободным параметром и ограничен снизу лишь размерами стволов резонаторной системы.

По мере повышения частоты излучения и, соответственно, роста статического магнитного поля прослеживается явная тенденция уменьшения величины азимутального дрейфа электронного пучка [A11]. С другой стороны, предложенная схема МСГ позволяет использовать преимущества гиротронов с приосевым пучком (большой орбитой) для селективного возбуждения мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками. Эти факторы делают многоствольный гиротрон перспективным источником излучения в терагерцовом диапазоне.

Далее, в качестве примера, рассмотрены особенности проектирования электронно-оптической системы МСГ и перспективные варианты реализации многолучевых многоствольных гиротронов, основные проектные параметры которых показаны в таблице 3.1. Траекторный анализ многолучевой МИП выполнен с учетом возможности моделирования аксиально-несимметричной эмиссии электронов в программе «ANGEL-TA-S3D» [73]. Для описания электронно-волнового взаимодействия в резонаторах многоствольного гиротрона использовалась самосогласованная модель, приведенная в приложении А.

3.2 Электронно-оптические системы многоствольного гиротрона

3.2.1 Азимутальный дрейф электронного пучка

Для простоты исследования далее рассматривается прямоугольная форма сектора эмиссии с размером в плоскости (R, Z) (шириной эмиссионного пояса) w и поперечным размером по азимуту a (рисунок 3.1а). В общем случае форма может быть синтезирована путём обратной трассировки электронов из пространства взаимодействия (резонатора) в область катода. На следующих этапах электронно-оптическая система может быть усовершенствована, например, путем профилирования электродов и использования отдельных подогревателей для парциальных эмиттеров. Разумеется, каждая парциальная пушка может быть оптимизирована независимо, но это требует использования трехмерных программ расчета и на современном этапе значительно усложнит конструкцию. Для использования в многоствольной гиро-ЛБВ аналогичная схема ЭОС рассмотрена в [171].

Таблица 3.1 Варианты реализации многоствольного гиروتрона

| | | | | | |
|----------------------------------|---|--|---|---|---|
| | Многоствольная система с плавной перестройкой частоты | Многоствольная система с «изолированными» электронными пучками | Многоствольная система для работы на высоких гармониках | Многоствольный гиروتрон для ДПЯ с выводом излучения в сторону коллектора | Многоствольный гиروتрон для ДПЯ с выводом излучения в сторону эл. пушки |
| Рабочая мода | TE _{1,3} (n = 1) | TE _{1,3} (n = 1) | TE _{2,5} (n = 2); TE _{3,7} (n = 3); TE _{3,8} (n = 3) | TE _{2,4} (n = 2); TE _{3,5} (n = 3); TE _{4,7} (n = 4); TE _{3,7} (n = 3) | TE _{2,4} (n = 2); TE _{3,5} (n = 3); TE _{4,7} (n = 4) |
| Число резонаторов | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| Рабочий ток, мА | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Ускоряющее напряжение, кВ | 40 | 15; 40; 80 | 80 | 80 | 80 |
| Питч-фактор | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,4; 1,2 | 1,4 |
| Рабочие частоты, ГГц | 133,2–146,3 | 139–145,6 | 268,1; 395,9; 447,8 | 263; 394,5; 526; 593 | 263; 394,5; 526 |
| Магнитное поле, Тл | 4,99–5,83 | 5,02–6,29 | 5,42; 5,39; 6,1 | 5,41; 8,1 | 5,447 |
| Мощность выходного излучения, Вт | от 35 | от 35 | 980; 300; 280 | 85; 64; 42; 200 | 209; 82; 29 |

При построении многоствольного гиротрона важно точно учитывать поперечный (азимутальный) дрейф электронного пучка. Это необходимо чтобы пучок находился точно на оси соответствующего ствола резонаторной системы. Небольшое отклонение электронного пучка от оси может привести к снижению уровня выходной мощности и даже к срыву генерации [172, 173]. Скорость дрейфа электрона при произвольной ориентации полей имеет компоненты, направленные как вдоль магнитного поля, так и перпендикулярно ему, и определяется известной формулой [10]:

$$\vec{v}_{dr} = v_B \frac{\vec{B}}{B} + \frac{[\vec{E}, \vec{B}]}{B^2} - \frac{v_{\perp}^2 + 2v_B^2}{2\eta B^3} [\vec{B}, \nabla|\vec{B}|], \quad (3.1)$$

где v_{\perp} — осцилляторная скорость, v_B — компонента скорости электрона, направленная вдоль \vec{B} . Величина азимутального дрейфа электронного пучка в гиротроне главным образом определяется поперечным дрейфом, которому отвечает второе слагаемое в (3.1). При этом ниже пренебрегается третьим слагаемым, определяющим градиентный дрейф. Вблизи катода магнитное поле практически однородно и поэтому градиентный дрейф в этой области пренебрежимо мал. В области нарастания магнитного поля с бóльшим значением $\nabla|\vec{B}|$ градиентный дрейф мал из-за сильного магнитного поля.

Дрейф электронного пучка в азимутальном направлении в гиротронах хоть и наблюдался ранее (см., например, [174, 175]), но подробно не исследовался, вследствие малого влияния при азимутальной симметрии систем. Наибольшее отклонение электронного пучка в азимутальном направлении происходит на первых витках траектории из-за высокой напряжённости электрического поля вблизи катода. Для аналитических оценок величину азимутального дрейфа электронного пучка можно определить как произведение начальной скорости азимутального дрейфа и времени пролета в области скрещенных полей: $X_{dr} = v_{dr} \cdot t_{pass}$. Время пролета t_{pass} можно оценить из предположения равноускоренного движения в постоянном электрическом поле и определить как

$$t_{pass} = \sqrt{\frac{2D}{\eta E_c \cos A}}, \quad (3.2)$$

где A — угол между электрическим и магнитным полем у поверхности катода, $\eta = e_0/m_0$, E_c — напряжённость электрического поля вблизи катода, D — протяжённость области сильных скрещенных полей, которая зависит от геометрических особенностей катода и анода, и может быть приближенно определена, например, как длина катода от центра эмиттера до носика. Таким образом, линейный дрейф электронов в скрещенных полях в области катода для предварительных оценок может быть представлен в виде:

$$X_{dr} = \alpha \sqrt{\frac{2D \sin^2 A}{\eta d \cos A}} \cdot \frac{\sqrt{U_a}}{B_0}, \quad (3.3)$$

где d — расстояние между катодом и анодом, $\alpha = B_0/B_c$ — коэффициент перемангничивания, B_c и B_0 — величины магнитного поля в центре эмиттера и в центре магнитной системы, U_a — анодное напряжение. Для определения азимутального дрейфа в градусах формула (3.3) преобразуется к виду

$$\Omega_{dr} = X_{dr} \frac{180^\circ}{\pi(R_c + h_1 \cos \psi)}, \quad (3.4)$$

$$h_1 = \frac{2\alpha^2 \cos^2 \varphi}{\eta d} \left(1 + \frac{\pi^2}{4} \operatorname{tg}^2 \varphi \right) \frac{U_a}{B_0^2}, \quad (3.5)$$

где R_c — радиус катода в районе эмиттера, h_1 — высота первого максимума траектории над катодом, φ — угол наклона магнитного поля к поверхности катода, ψ — угол наклона эмиссионной поверхности катода относительно центральной оси. Формулы (3.3)–(3.5) приведены в международной системе единиц СИ.

Приближенная формула (3.4) позволяет оценить величину азимутального дрейфа электронного пучка лишь на качественном уровне, но показывает основные тенденции. Для проверки аналитической модели и дальнейших исследований проведён уточнённый расчёт при помощи программы «ANGEL-TA-S3D» [73], которая позволяет делать расчёт как с азимутально-симметричной эмиссией, так и для пучков, эмитированных с заданных секторов. Отметим, что программа «ANGEL-TA-S3D» учитывает все компоненты дрейфа, поскольку интегрирует полные уравнения движения.

Для анализа азимутального дрейфа электронного пучка рассмотрен ряд гиротронов [14, 91, 101, 140, A1], основные параметры которых приведены в таблице 3.2. В таблице приведен рабочий ток с азимутально-симметричного кольцевого эмиттера, при этом варианты с ограниченной эмиссией в таблице не рассматриваются. Рассчитанный с использованием программы «ANGEL-TA-S3D» азимутальный дрейф электронных пучков в рассматриваемых гиротронах показан на рисунке 3.3. На оси ординат указан радиус электронного пучка в цилиндрической системе координат. Величина азимутального дрейфа электронного пучка определяется, главным образом, значением магнитного поля в области катода и радиусом катода. С увеличением магнитного поля величина дрейфа уменьшается, что облегчает построение многоствольных систем на высоких частотах.

В рамках аналитического подхода хорошо прослеживаются зависимости величины азимутального дрейфа электронного пучка от основных параметров ЭОС. На рисунке 3.4 показана полученная двумя способами (аналитически по (3.3)–(3.5) и численно при помощи программы «ANGEL-TA-S3D») зависимость азимутального дрейфа от анодного напряжения и

от магнитного поля. Для аналитических оценок, в качестве длины области скрещенных полей D выбрано расстояние от центра эмиттера до носика катода вдоль оси прибора. Результаты, рассчитанные по (3.4) хорошо согласуются с результатами траекторного анализа. Таким образом, простой аналитический подход позволяет качественно оценить величину азимутального дрейфа для различных вариантов ЭОС многоствольных гироприборов и предсказать тенденции и возможности его изменения при коррекции параметров.

Таблица 3.2 Параметры гиротронов [14, 91, 101, 140, A1]

| Номер гиротрона | f , ГГц | Номер гармоники | R_c , мм | B_0 , Тл | I_b , А | U_a , кВ | X_{dr} , мм | Ω_{dr} , градусы |
|-----------------|-----------|-----------------|------------|------------|-----------|------------|---------------|-------------------------|
| №1 [140] | 28 | 2 | 10 | 0,52 | 2 | 20 | 13,3 | 76 |
| №2 [14] | 95 | 1 | 50 | 4,58 | 80 | 133 | 16,6 | 19 |
| №3 [91] | 140 | 1 | 41,5 | 5,5 | 40 | 80 | 10,1 | 14 |
| №4 [101] | 258 | 2 | 5 | 4,7 | 0,4 | 12 | 3,2 | 37 |
| №5 [A1] | 260 | 1 | 20 | 8,28 | 1 | 8,5 | 2,4 | 7 |

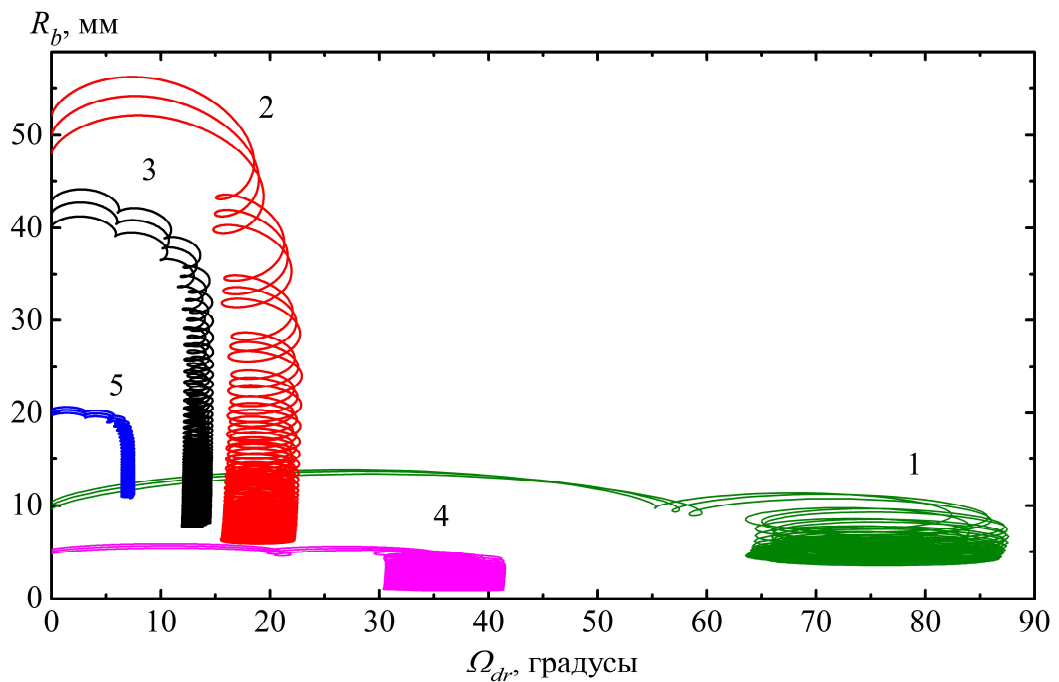


Рисунок 3.3 — Азимутальный дрейф электронных пучков в гиротронах [14, 91, 101, 140, A1].

Соответствие условных номеров гиротронов и их характеристик приведены в таблице 3.2

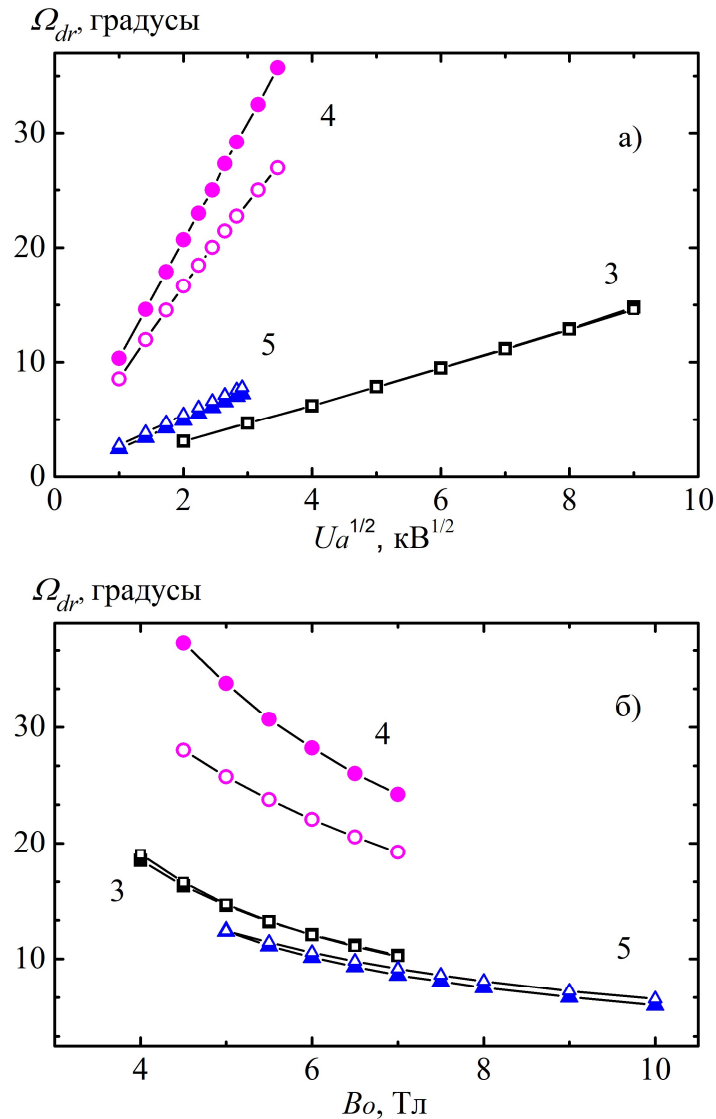


Рисунок 3.4 — Зависимости величины азимутального дрейфа электронного пучка от анодного напряжения (а) и от магнитного поля (б), полученные аналитически (полые маркеры) и в рамках численного моделирования (заполненные маркеры). Соответствие условных номеров гиротронов и их характеристик приведены в таблице 3.2

Ввиду ограниченности расчётных моделей и возможных ошибок в процессе изготовления в таких многостольных системах всегда остается опасность отклонения электронного пучка от центра соответствующего резонатора. Поэтому важной задачей является удержание каждого пучка точно по центру соответствующего резонатора. Для этого должна быть предусмотрена возможность коррекции положения пучков по радиусу и по азимуту, которая может быть осуществлена при помощи изменения анодного напряжения и тока расположенной в области катода катушки подмагничивания. Из адиабатической теории, приведенной в [10], и аналитической формулы для азимутального дрейфа (3.4) следуют соотношения:

$$t_{\perp} \sim \frac{B_0 U_a^2}{B_c^3 U_0}, \quad R_b \sim \sqrt{\frac{B_c}{B_0}}, \quad X_{dr} \sim \frac{\sqrt{U_a}}{B_c}. \quad (3.6)$$

Здесь U_a и U_0 — анодное и ускоряющее напряжения, t_{\perp} — осцилляторная энергия электронов в рабочем пространстве, R_b — средний радиус пучка в области взаимодействия относительно центральной оси магнитной системы. Подбором параметров B_c , U_a и U_0 можно управлять положением электронного пучка в рабочем пространстве. Таким образом, для управления радиусом пучка R_b при сохранении азимутального дрейфа и питч-фактора требуется соблюдение пропорций:

$$\frac{R_b^2}{B_c} = const, \quad \frac{R_b^4}{U_a} = const, \quad \frac{R_b^2}{U_0} = const. \quad (3.7)$$

В случае изменения величины азимутального дрейфа в рабочем пространстве необходимо следовать пропорциям:

$$\frac{X_{dr}^2}{U_a} = const, \quad \frac{X_{dr}^4}{U_0} = const. \quad (3.8)$$

Указанные способы коррекции положения электронного пучка могут быть использованы также при плавной перестройке рабочей частоты, которая заключается в последовательном возбуждении мод с разным числом продольных вариаций за счёт изменения внешнего магнитного поля. Отметим, что при изменении полярности магнитного поля изменяется на противоположное и направление азимутального дрейфа, что в некоторых случаях позволяет использовать парциальный электронный пучок для возбуждения двух разных электродинамических систем, отличающихся азимутальным расположением.

В случае появления отраженного тока электроны возвращаются в прикатодную область со смещением на удвоенный угол дрейфа от эмиттера. Далее, после повторного отражения, электроны продолжают дрейф и возвращаются в область резонаторной системы. Отраженный поток электронов, вернувшись в область резонатора, попадает на тело блока резонатора вне резонаторного отверстия и может приводить к повышенному нагреву и даже деградации поверхности вследствие перегрева. С целью ослабления данного эффекта в области катода могут быть расположены специальные вставки для осаждения отраженного потока электронов [176].

3.2.2 ЭОС для многоствольного гиротрона 140 ГГц

Для гиротронов с базовой частотой 140 ГГц ранее разработаны два варианта МИП, которые отличаются наклоном эмиссионной поверхности катода к центральной оси резонатора: 25° и 35° , формирующие пограничный (промежуточный вариант между регулярно пересекающимся и ламинарным пучком) и ламинарный пучки соответственно. Катоды имеют

диаметр 83 мм в центре эмиссионного пояса. Данные пушки и их модификации хорошо себя зарекомендовали в мощных гиротронах 110, 140 и 170 ГГц, созданных для комплексов электронно-циклотронного нагрева и управления током плазмы в токамаках и стеллараторах для УТС. Такие пушки также использовались в экспериментах с гиротронами по дискретной перестройке частоты. Выбор параметров гиротронной установки обусловлен имеющимися в распоряжении источником питания (до 80 кВ) и магнитной системой с максимальным полем 7 Тл. В рабочем режиме расчётный питч-фактор электронного пучка в рассматриваемых МИП близок к 1,2. Типичная величина скоростного разброса δV_{\perp} в пушках миллиметрового диапазона длин волн при малых токах составляет около 25% [177].

В ходе расчётов было задано $N_E \times N_{\varphi}$ центров эмиссии ($N_E = 35$ — число фракций электронов, отличающихся положением вдоль образующей конуса катода, $N_{\varphi} = 40$ — число фракций по азимуту одного парциального электронного пучка). Каждый центр был источником $N_V = 35$ трубок тока с различными значениями начальных скоростей, разброс которых вызван шероховатостью эмиссионной поверхности.

Важным при реализации ЭОС многоствольного гиротрона является формирование тонкого приосевого электронного пучка с достаточным для гиротрона рабочим током. В случае широких электронных пучков растёт риск возбуждения конкурирующих мод. Допустимые размеры электронного пучка в резонаторах гиротрона определяются условием эффективного электронно-волнового взаимодействия. Обычно смещение ведущих центров электронных орбит от оси резонатора не должно превышать $0,2\lambda$ [126, 178]. В случае сектора эмиссии с шириной эмиссионного пояса $w=5$ мм и поперечным размером по азимуту $a = 1$ мм электронный пучок является достаточно тонким для эффективного электронно-волнового взаимодействия при работе гиротрона на первой циклотронной гармонике. При плотности эмиссионного тока 3 А/см^2 такие секторы эмиссии позволяют получить рабочий ток 150 мА в каждом парциальном электронном пучке, тогда как в случае аналогичной МИП с азимутально-симметричной кольцевой эмиссией рабочий ток равен 40 А. На рисунке 3.5 изображена расчётная зависимость разброса осцилляторных скоростей электронов δV_{\perp} и средней относительной энергии осцилляторного движения t_{\perp} от рабочего тока (при одинаковой плотности тока) в случае азимутально-симметричного сплошного эмиттера и в случае сектора эмиссии в МИП с ламинарным пучком. В случае азимутально-симметричного эмиттера электронный пучок частично экранирует электрическое поле вблизи катода, что приводит к снижению t_{\perp} при росте тока. В случае нарушенной симметрии, т.е. использования секторного эмиттера, электронный пучок практически не влияет на электрическое поле вблизи катода, питч-фактор пучка остается достаточно высоким и не зависит от рабочего тока.

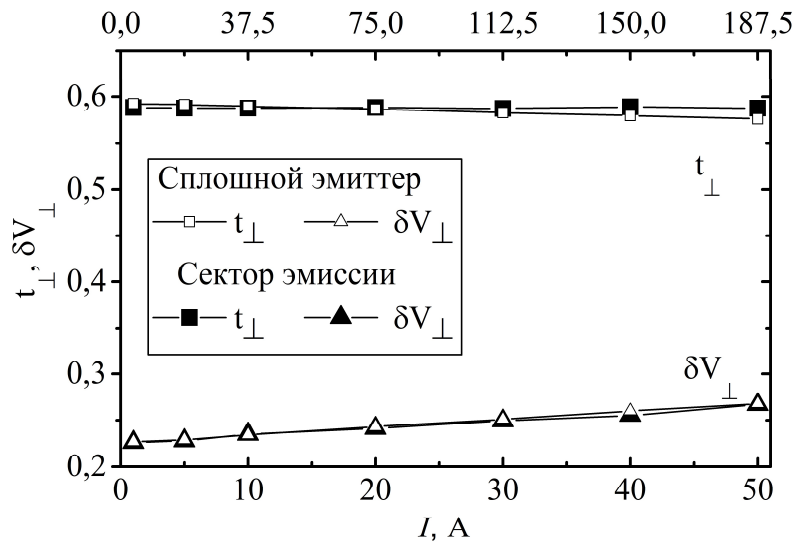


Рисунок 3.5 — Зависимость разброса осцилляторных скоростей электронов δV_{\perp} и средней относительной энергии осцилляторного движения t_{\perp} от тока пучка в случае азимутально-симметричного сплошного эмиттера и эмиттера в виде сектора эмиссии в МИП с ламинарным пучком

На рисунке 3.6 изображены траектории электронных пучков в плоскости (R, Φ) и поперечные срезы в сечении плоскостью (R, Φ) в пространстве взаимодействия для двух вариантов катода с наклоном эмиссионной поверхности 25° и 35° . Вариант катода с наклоном 25° хотя и позволяет получить электронный пучок с меньшим радиальным разбросом, но при этом пучок имеет больший дрейф в азимутальном направлении. В случае катода с наклоном 25° азимутальный дрейф электронного пучка равен 22° , для катода с наклоном 35° — $14,5^{\circ}$. Меньший азимутальный дрейф пучка в случае катода с бóльшим углом наклона эмиссионной поверхности связан с уменьшением протяжённости области сильных скрещенных полей. Отличия в геометрии двух вариантов пушек могут быть учтены в рамках аналитических оценок, которые предсказывают азимутальный дрейф 21° и $14,3^{\circ}$ для катодов с наклонами эмиссионной поверхности 25° и 35° соответственно.

Серьезные проблемы могут возникнуть на фронтах высокого напряжения в моменты запуска и выключения гиротронной установки, или при необходимости модуляции выходной мощности. Поскольку изменение напряжённости электрического поля вблизи катода приводит к изменению величины азимутального дрейфа, то в моменты нарастания или спада напряжения появляется опасность касания электронным пучком стенок резонатора или канала транспортировки, что приведёт к их нагреву, ухудшению вакуума в гироприборе и преждевременной деградации материала резонатора. Ситуацию несколько облегчает то обстоятельство, что наибольшие отклонения от оси резонатора имеют место при малых

напряжениях и токах, т.е. при низкой энергии пучка. Следовательно, тепловая нагрузка в моменты запуска и выключения гиротронной установки может остаться приемлемой, особенно при малой длительности фронтов импульсов. На рисунке 3.7 показан след пучка в резонаторе в зависимости от ускоряющего напряжения. Величина тока пучка в процессе запуска гиротрона определялась по предварительно измеренной вольт-амперной характеристике катода. При малых токах пространственный заряд практически не влияет на траекторию электронов, след пучка остаётся близок по форме к прямоугольному. По мере роста тока пучка пространственный заряд увеличивает перемешивание электронных траекторий, из-за чего форма следа становится овальной. Согласно расчётам, пучок с катода 35 градусов находится полностью в просвете резонатора во всем диапазоне ускоряющих напряжений (рисунок 3.8), в то время как пучок с катода с углом 25 градусов касается стенок входной части резонатора при уменьшении анодного напряжения. В этом случае диаметр резонатора 5,68 мм для рабочей моды $TE_{1,3}$ на основной гармонике гирочастоты. Отметим, что в режиме касания полная мощность пучка около 20 Вт (2,5 кВ x 7,5 мА), а касается стенки только его часть и, следовательно, проблема в этом случае не представляет особой остроты. Разумеется, в каждом конкретном случае вопрос касания должен быть исследован. При анализе стартовых сценариев дополнительно следует учитывать изменение положения пучка. Отметим, что характер изменения положения ведущего центра, питч-фактора и скоростного разброса электронного пучка при изменении напряжения в рассматриваемых ЭОС отличается от ЭОС с реверсом магнитного поля, которые обычно используются в ГБО (см., например, [179]), что должно учитываться при анализе сценария включения гиротрона.

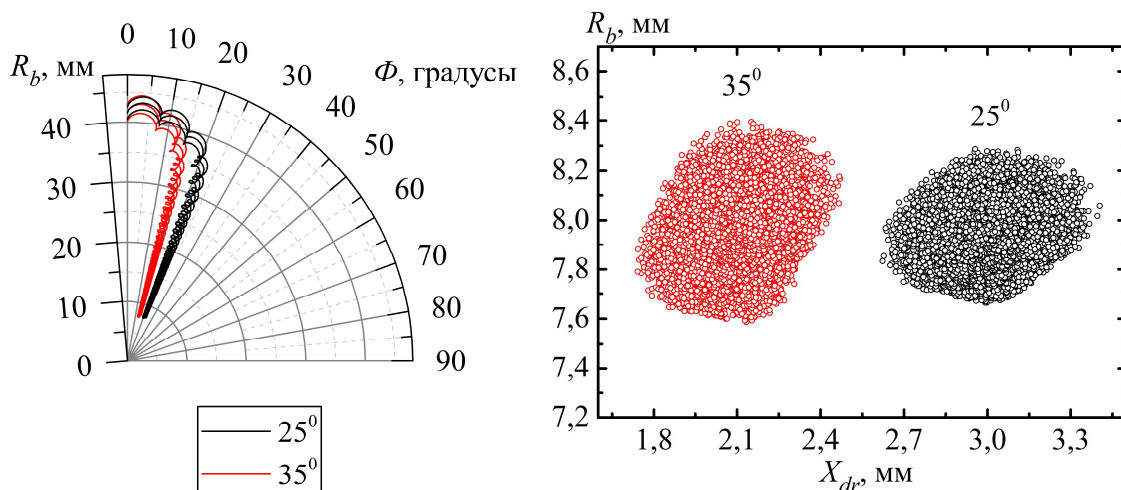


Рисунок 3.6 — (а) Траектории электронных пучков в плоскости (R, Φ) и (б) поперечные срезы в пространстве взаимодействия в сечении плоскостью (R, Φ) для двух вариантов катода с наклоном эмиссионной поверхности 25° и 35°

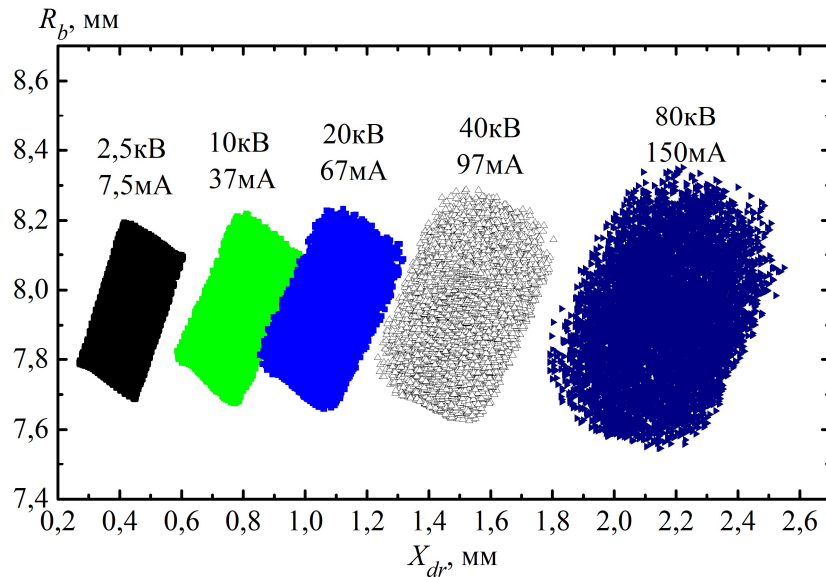


Рисунок 3.7 — Срезы в сечении плоскостью (R, Φ) электронного пучка

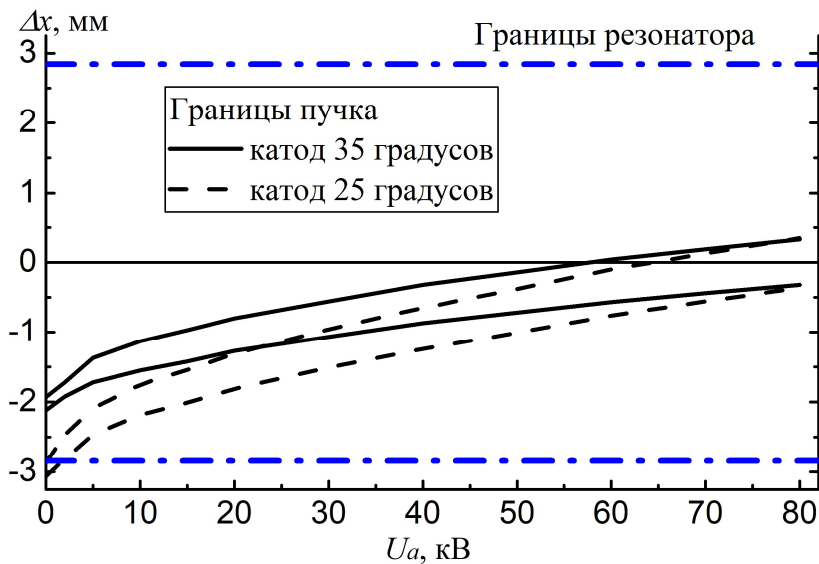


Рисунок 3.8 — Отклонение электронного пучка Δx для катодов с углом наклона эмиссионной поверхности 35° и 25° в пространстве взаимодействия во время включения/выключения гиротрона

3.3 Примеры построения МСГ

3.3.1 Многоствольная система с широкополосной плавной перестройкой частоты

Как правило, в гиротронах плавная перестройка частоты реализуется за счёт последовательного возбуждения продольных мод $TE_{m,p,q}$, имеющих одинаковую поперечную структуру $TE_{m,p}$ и отличающихся продольным индексом q . В случае многоствольного гиротрона доступный диапазон плавной перестройки многократно увеличивается за счёт использования нескольких цилиндрических резонаторов с изменёнными относительно друг друга радиусами. Для варианта многоствольного частотно-перестраиваемого гиротрона, работающего на

частотах вблизи 140 ГГц, весьма перспективной является мода $TE_{1,3}$. В этом случае возможна реализация многоствольной системы с пятью резонаторами, при этом расстояние между стенками резонаторов составит около 3,3 мм.

Количество возбуждаемых продольных мод q зависит от тока пучка, добротности соответствующей моды и ее связи с электронным пучком, т.е. объединенного параметра $IQ_{tot}G_{mp}$, характеризующего эффективность электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона [144]. Малый рабочий ток, свойственный данным системам, компенсируется характерным для приосевого пучка большим значением структурного фактора G_{mp} . Для реализации широкополосной плавной перестройки выбран сравнительно длинный резонатор, с протяженностью регулярного участка 25 мм, соответствующий плавной перестройке в диапазоне 2,5 ГГц. При меньшей длине, хотя диапазон плавной перестройки и увеличивается по (1.11), но падает полная добротность рабочих мод, что приводит к уменьшению количества возбуждаемых продольных мод. В случае более протяжённого резонатора рост числа рабочих продольных мод ограничен влиянием разброса осцилляторных скоростей электронного пучка [34]. Кроме того, на диапазон плавной перестройки частоты влияет разность потенциалов между катодом и резонатором (ускоряющее напряжение). Для расчётов выбраны ускоряющее напряжение 40 кВ и рабочий ток парциального пучка 150 мА. На рисунке 3.9 изображена расчётная зависимость мощности выходного излучения моды $TE_{1,3}$ от частоты генерации для пяти резонаторов с разными радиусами при заданных параметрах системы. Максимальная мощность выходного излучения, согласно результатам расчетов, находится на киловаттном уровне (таблица 3.3). В рассматриваемой многоствольной системе возможна плавная перестройка частоты в диапазоне 133,2–146,3 ГГц по уровню мощности выходного сигнала 35 Вт. Такой уровень вполне достаточен для многих научных и технических приложений, например, задач спектроскопии и диагностики.

Таблица 3.3 Основные параметры частотно-перестраиваемого многоствольного гиротрона с пятью резонаторами

| Номер резонатора | Радиус резонатора, мм | Диапазон перестройки частоты, ГГц | Диапазон рабочих магнитных полей, Тл |
|------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 3,06 | 133,2–135,8 | 4,99–5,41 |
| 2 | 3,005 | 135,6–138,4 | 5,08–5,52 |
| 3 | 2,95 | 138,2–140,9 | 5,17–5,62 |
| 4 | 2,895 | 140,8–143,6 | 5,27–5,73 |
| 5 | 2,84 | 143,5–146,3 | 5,37–5,83 |

Как правило, возбуждение последовательности продольных мод с одинаковой поперечной структурой в гиротроне требует изменение внешнего магнитного поля в достаточно широких пределах, поэтому основной проблемой частотно-перестраиваемых гиротронов обычного типа является конкуренция со стороны паразитных мод, что является основным ограничением диапазона плавной перестройки частоты. В случае гиротрона с приосевым пучком это ограничение играет меньшую роль, а в данном случае и вовсе отсутствует. Но вместе с этим появляются и новые специфические проблемы, одной из которых является возбуждение рабочих мод одновременно в нескольких резонаторах системы, что приводит к многочастотной генерации (см. рисунок 3.10), которая в некоторых случаях может быть нежелательной. Кроме того, по мере изменения магнитного поля потребуется корректировать величину азимутального дрейфа электронного пучка. В частности, в случае резонатора №1 при изменении магнитного поля с 5 до 5,4 Тл следует увеличить анодное и ускоряющее напряжения на 6,6 кВ для сохранения питч-фактора и величины азимутального дрейфа.

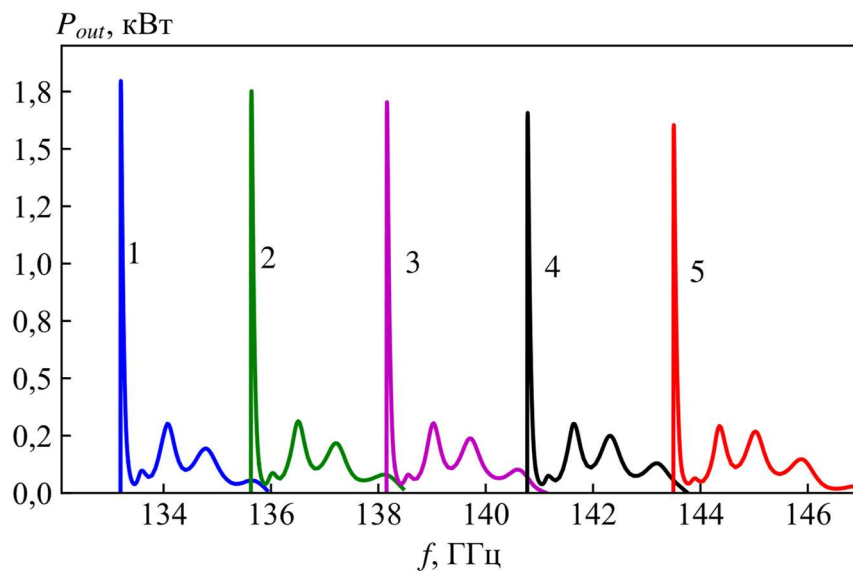


Рисунок 3.9 — Зависимость расчётной мощности от частоты генерации в многоствольной системе с широкополосной плавной перестройкой частоты

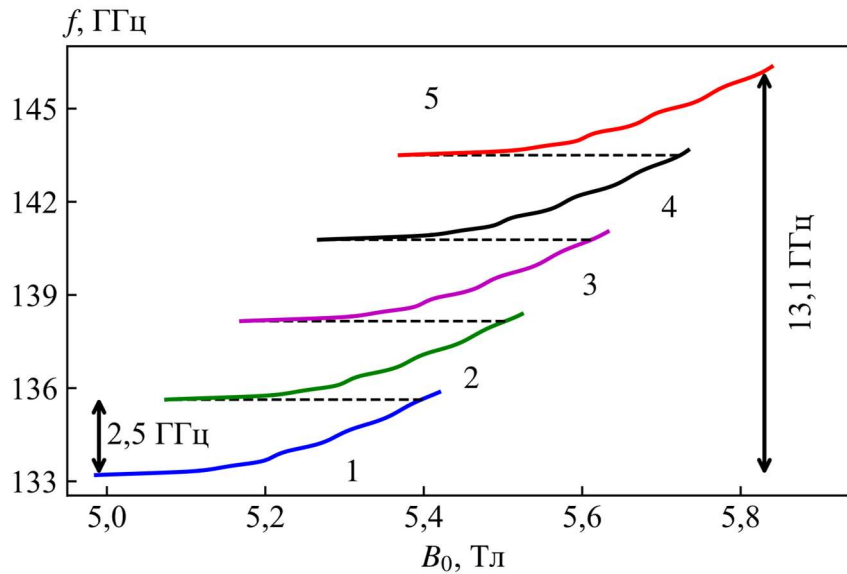


Рисунок 3.10 — Зависимость расчётной частоты генерации от магнитного поля в многоствольной системе с широкополосной плавной перестройкой частоты

3.3.2 Частотно-перестраиваемый многоствольный гиротрон с «изолированными» электронными пучками

Перспективным решением проблемы одновременной генерации в многоствольном гиротроне является выбор и реализация разных величин ускоряющих напряжений для каждого электронного пучка. Условие циклотронного резонанса в гиротронах можно представить в виде

$$\omega \approx n \omega_{H0} / (1 + U_0 [\text{kV}] / 511). \quad (3.9)$$

При изменении ускоряющего напряжения условие синхронизма выполняется уже при другом магнитном поле, что позволяет сдвинуть зоны генерации относительно друг друга и таким образом реализовать перестройку частоты без одновременной многочастотной генерации. Использование разных ускоряющих напряжений для каждого электронного пучка может быть реализовано за счёт изоляции парциальных резонаторов и/или эмиссионных секторов на катоде (парциальные катоды) и, соответственно, подачи разных напряжений на них.

Для примера ниже рассмотрен вариант трёхствольного гиротрона с резонаторами разной длины и с различными радиусами (таблица 3.4). С целью реализации широкополосной плавной перестройки частоты выбраны ускоряющие напряжения 15, 40, 80 кВ. Данный подход позволяет реализовать плавную перестройку частоты в диапазоне 139–145,6 ГГц при изменении магнитного поля с 5,02 до 6,26 Тл (рисунок 3.11). Такой подход требует использования корректирующей катушки, расположенной вблизи катода, для формирования электронных пучков с требуемыми характеристиками для каждого резонатора. Изменяющийся радиус влета и азимутальный дрейф электронного пучка при работе с разными ускоряющими напряжениями

определяет положение резонаторов относительно центральной оси электродинамической системы. Аналогичным образом, при необходимости, может быть реализована одновременная генерация на разных частотах.

Таблица 3.4 Расчетные параметры многоствольного гиротрона с «изолированными» электронными пучками

| Номер резонатора | Радиус резонатора, мм | Длина резонатора, мм | Рабочее напряжение, кВ | Диапазон перестройки частоты, ГГц | Диапазон рабочих магнитных полей, Тл |
|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2,935 | 17 | 15 | 139,0–140,9 | 5,02–5,26 |
| 2 | 2,893 | 20 | 40 | 140,9–143,1 | 5,26–5,68 |
| 3 | 2,847 | 27 | 80 | 143,1–145,6 | 5,68–6,29 |

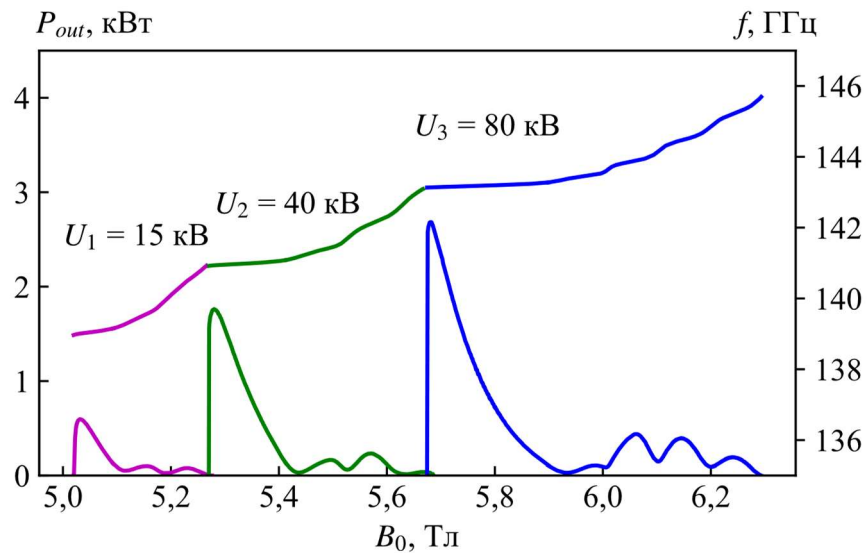


Рисунок 3.11 — Расчётная мощность и частота выходного излучения трёхствольного гиротрона в зависимости от магнитного поля

3.3.3 Многоствольный гиротрон на высоких гармониках гирочастоты

Предложенная схема многоствольного гиротрона позволяет использовать преимущества гиротронов с приосевым электронным пучком для возбуждения мод, работающих на высоких циклотронных гармониках. При работе на высоких циклотронных гармониках в гиротронах используют относительно длинные резонаторы (более 20λ), при этом работают с высокими ускоряющими напряжениями. На рисунке 3.12 изображена зависимость минимальных стартовых токов мод $TE_{1,3}$ ($n = 1$), $TE_{2,5}$ ($n = 2$) и $TE_{3,8}$ ($n = 3$) от ускоряющего напряжения при длине резонатора 20 мм. Рост ускоряющего напряжения при работе гиротрона на высоких гармониках гирочастоты, вследствие мультипольности взаимодействия, приводит к снижению

стартового тока [8, 101]. При ускоряющем напряжении 80 кВ минимальный стартовый ток в случае работы на третьей гармонике снижается более чем в четыре раза по сравнению с ускоряющим напряжением 20 кВ, при этом минимальный стартовый ток моды $TE_{2,5}$ на второй циклотронной гармонике снижается вдвое. Вместе с этим стартовый ток моды на основной циклотронной гармонике растёт с ростом напряжения, что способствует росту зон устойчивой работы мод на высоких циклотронных гармониках. Повышение доли вращательной энергии электронного пучка в области электронно-волнового взаимодействия также приводит к дополнительной селекции мод, синхронных с высокими циклотронными гармониками (см. рисунок 3.12).

Рабочие параметры гиротрона указаны в таблицах 3.1 и 3.5. Согласно расчётам, в многоствольном гиротроне при токе 150 мА возможна генерация на моде $TE_{2,5}$ (268,1 ГГц), синхронной со второй циклотронной гармоникой, и на модах $TE_{3,7}$ (395,9 ГГц) и $TE_{3,8}$ (447,8 ГГц) на третьей циклотронной гармонике. В случае работы на моде $TE_{2,5}$ наибольшую конкуренцию составляет паразитная мода $TE_{1,3}$, в случае $TE_{3,7}$ — моды $TE_{2,5}$ и $TE_{1,3}$. Основным конкурентом для моды $TE_{3,8}$ на частоте 447,8 ГГц является мода $TE_{1,3}$ (встречная волна). Расчётные зоны генерации выбранных рабочих мод и их конкурентов представлены на рисунке 3.13. Парциальная мощность выходного излучения при работе на модах $TE_{3,7}$ и $TE_{3,8}$ составила 300 Вт и 280 Вт в каждом резонаторе при КПД 2,5% и 2,3% соответственно, что теоретически позволяет реализовать киловаттный уровень мощности в непрерывном режиме в случае 4х-ствольного гиротрона с идентичными резонаторами на частотах более 400 ГГц. Следует отметить, ранее с тем же напряжением и похожим набором рабочих мод был реализован гиротрон с приосевым пучком [124].

Таблица 3.5 Расчетные параметры многоствольной системы для работы на высоких гармониках

| Рабочая мода | Номер гармоники | Частота генерации, ГГц | КПД, % | Парциальная мощность, Вт | Магнитное поле, Тл |
|--------------|-----------------|------------------------|--------|--------------------------|--------------------|
| $TE_{2,5}$ | 2 | 268,1 | 10,1 | 980 | 5,42 |
| $TE_{3,7}$ | 3 | 395,9 | 2,5 | 300 | 5,39 |
| $TE_{3,8}$ | 3 | 447,8 | 2,3 | 280 | 6,1 |

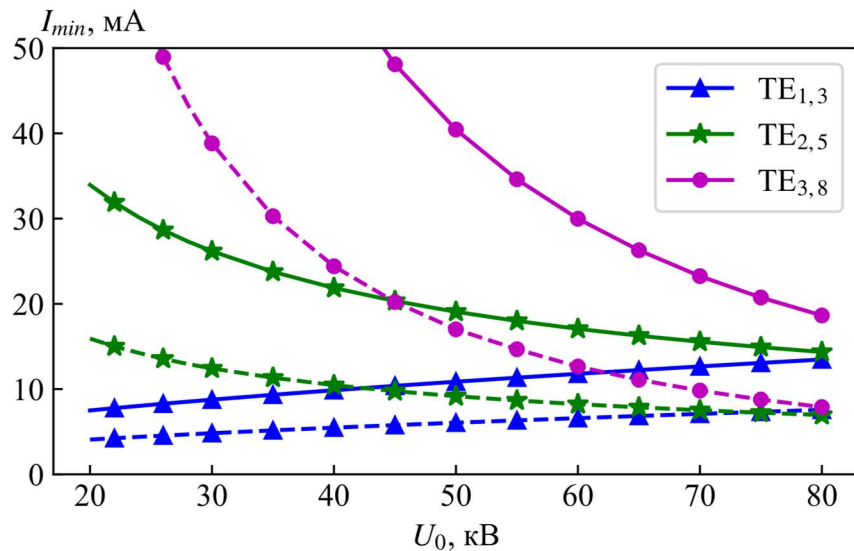


Рисунок 3.12 — Минимальный стартовый ток для мод, работающих на разных гармониках, в зависимости от напряжения при питч-факторе $g = 1,2$ (сплошные линии) и $g = 1,4$ (пунктирные)

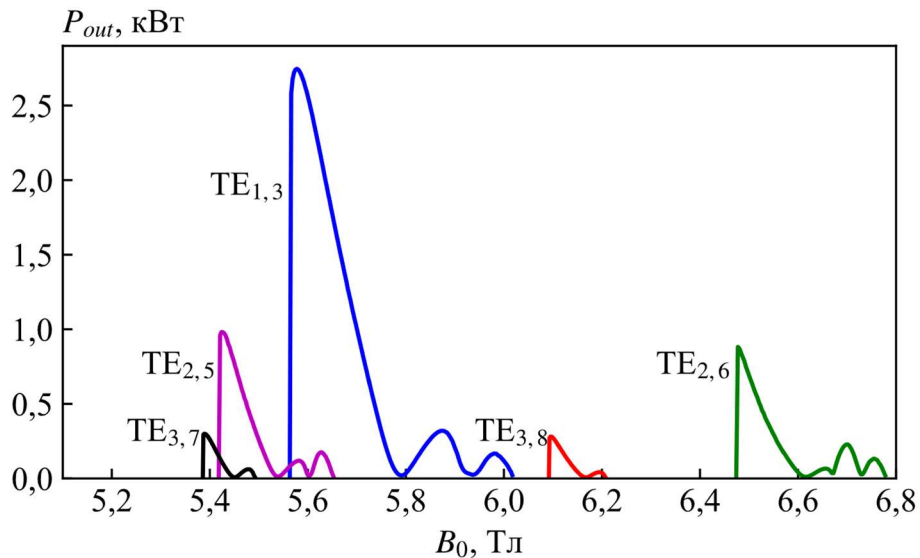


Рисунок 3.13 — Зависимость мощности выходного излучения от магнитного поля для выбранных рабочих мод и их конкурентов

3.4 Многоствольный гиротрон с одновременной генерацией излучения на кратных частотах для ДПЯ/ЯМР-спектроскопии

Многоствольный гиротрон является перспективным источником излучения в терагерцовом диапазоне, например, в ДПЯ/ЯМР-спектроскопии высокого разрешения [180, 181]. В частности, может быть реализован вариант многоствольного гиротрона с одновременным или последовательным возбуждением мод на кратных друг к другу частотах, например, на частотах 263 ГГц ($n = 2$), 395 ГГц ($n = 3$) и 526 ГГц ($n = 4$), для случая работы гиротрона на второй, третьей и четвёртой гармониках в одномодовом режиме в соответствующем стволе электродинамической системы [A12]. Кроме того, схему

многоствольного гиротрона можно дополнить четвертым резонатором, оптимизированным для генерации излучения на частоте 594 ГГц. Указанные частоты являются востребованными, например, в ДПЯ/ЯМР спектроскопии с частотами 400 МГц, 600 МГц, 800 МГц и 900 МГц соответственно. Заметим, что в крупных научных центрах зачастую одновременно используются несколько ЯМР установок с разными частотами, размещенных в одном здании, что делает желательным и наличие соответствующих ДПЯ источников с разными частотами.

Есть и другие варианты реализации одновременной многочастотной генерации в МСГ для ДПЯ/ЯМР спектроскопии: например, на частотах 198 ГГц, 395 ГГц и 594 ГГц при работе на первой, второй и третьей циклотронных гармониках. Генерация излучения на указанных частотах востребована в ДПЯ/ЯМР-установках с основными частотами по протонам 300 МГц, 600 МГц и 900 МГц соответственно.

Выбор четырехствольной схемы прибора вызван преимущественно геометрическими ограничениями, прежде всего обусловленными возможностью использования широко распространенного криомагнита JASTEC-10T100 с диаметром проходного отверстия 100 мм и максимальным полем 10 Тл или его аналогом (в том числе заметно более доступными версиями с максимальным полем 7–8 Тл). Эти ограничения приводят к тому, что разумное количество стволов резонаторной системы в терагерцовом диапазоне равно четырём. Заметим, что в других случаях количество стволов системы может достигать 10 (см. [171]).

Для генерации излучения на частотах 263 ГГц, 395 ГГц и 526 ГГц выбраны моды $TE_{2,4}$, $TE_{3,5}$ и $TE_{4,7}$, синхронные со второй, третьей и четвертой гармониками гирочастоты соответственно, при этом радиусы регулярной части стволов резонаторной системы составили 2,39, 2,15 и 2,32 мм. Для генерации излучения на частоте 594 ГГц выбрана мода $TE_{3,7}$ на третьей циклотронной гармонике с радиусом резонатора 1,94 мм. Ускоряющее напряжение принято равным 80 кВ с целью снижения влияния пространственного заряда. В этом случае рабочие магнитные поля согласно (1.1) составляют около 5,4 Тл при работе на частотах 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и 8,1 Тл в случае генерации излучения на частоте 594 ГГц.

Выбор рабочих мод определяли ограничения на радиусы парциальных резонаторов. С одной стороны, радиусы стволов должны быть около или более 2 мм, что упрощает изготовление резонаторной системы с требуемой точностью. С другой стороны, выбор резонаторов с большими радиусами для работы на выбранных частотах приведёт к обострению проблемы конкуренции мод и снизит эффективность электронно-волнового взаимодействия. Принималась во внимание и ограниченность протяженности участка однородного магнитного поля криомагнита. Кроме того, выбор радиусов резонаторов также влияет на количество стволов, которые геометрически можно расположить в резонаторной системе.

3.4.1 Проектирование электронной пушки

Предварительные оценки и траекторный анализ

Проектирование многоствольного гиротрона терагерцового диапазона целесообразно начать с построения электронно-оптической системы. Это позволит определить достижимые параметры винтовых пучков для рассматриваемой схемы МСГ. Выбранная схема формирования электронных пучков значительно ограничивает рабочий ток, которого может быть недостаточно для гарантированной работы на высоких циклотронных гармониках. Соответственно важной задачей стала оптимизация МИП с целью получения наибольшего рабочего тока каждого парциального пучка при ограниченности его поперечных размеров.

Для разрабатываемого многочастотного гиротрона оптимизировалась триодная МИП с секционированной эмиссией. Радиус центров секторов эмиттера составил 26 мм. Средний радиус ведущих центров электронных орбит составил 4,7 мм относительно центральной оси системы. Угол между плоскостью эмиттера и силовой линией магнитного поля θ был задан равным 30° градусов, что позволяет формировать квазиламинарные электронные пучки. Конфигурация электронно-оптической системы показана на рисунке 3.14.

Выбор размеров сектора эмиттера осуществлялся с целью получения требуемой формы проекций ведущих центров электронных траекторий в пространстве взаимодействия. Как было отмечено ранее, для эффективного электронно-волнового взаимодействия требуется тонкий электронный пучок со смещением центров электронных орбит от оси соответствующего резонатора не более $0,2\lambda$. Следовательно, при работе на частоте 526 ГГц на четвертой циклотронной гармонике смещение центров орбит не должно превышать 0,1 мм. Форма секторов эмиттера проектировалась с учетом возможности максимально упрощенной технической реализации электронно-оптической системы (ЭОС). Требуемые размеры сектора эмиттера можно оценить по адиабатической теории:

$$l_{em} = \Delta b * \frac{\sqrt{B_0/B_c}}{\sin(\theta)}, \quad (3.10)$$

где l_{em} — длина сектора эмиссии вдоль поверхности катода в плоскости (R, Z) , Δb — размер пучка в резонаторе. Размер сектора эмиттера по азимуту также оценивался с учётом магнитной компрессии электронного пучка. В результате, для формирования тонких электронных пучков выбраны расположенные на одном кольцевом пояске сектора эмиссии с размерами 1,3x0,8 мм — соответственно размер в плоскости (R, Z) и размер по азимуту, при этом коэффициент заполнения составил 2%.

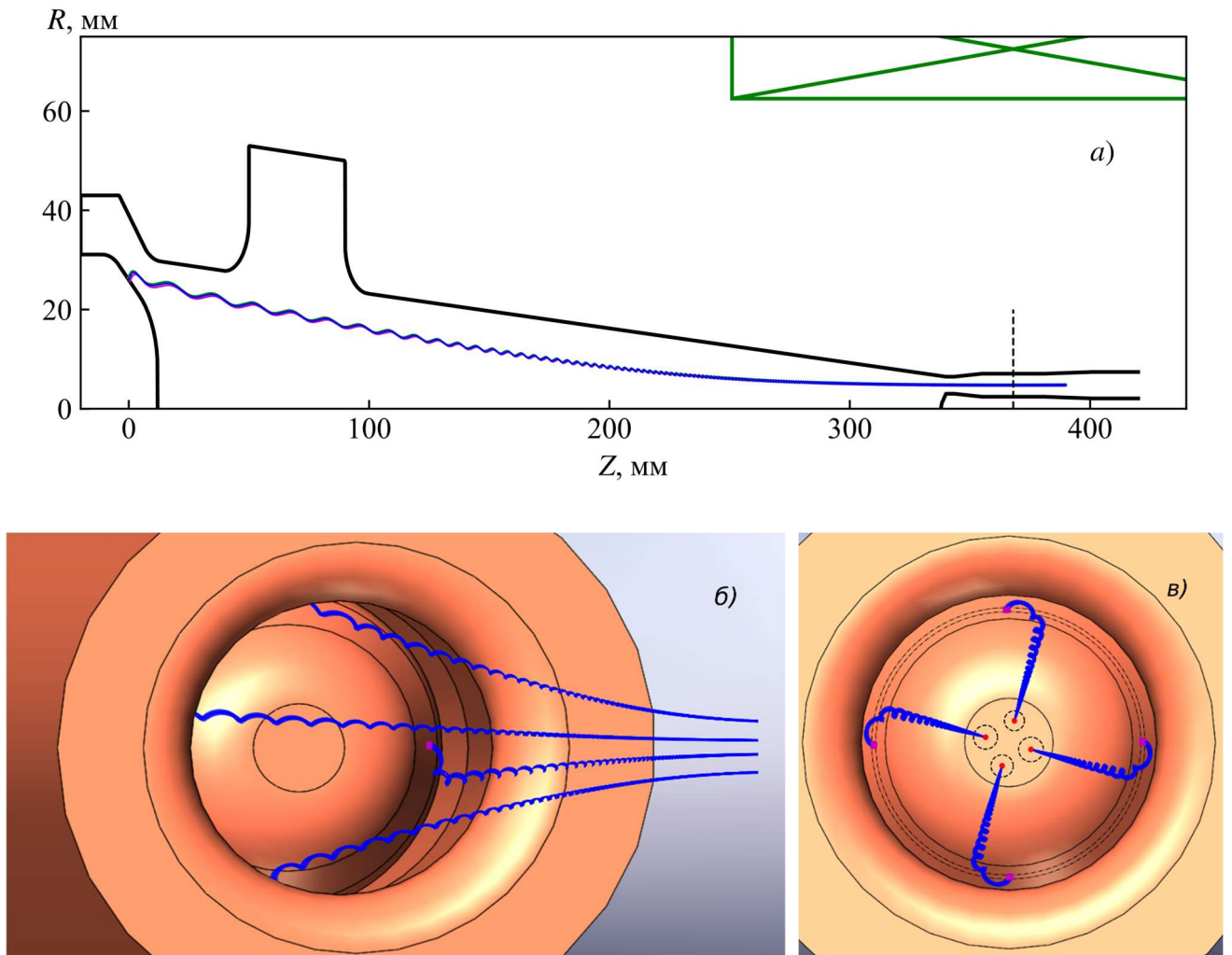


Рисунок 3.14 — (а) Геометрия многолучевой пушки для многоствольного гиротрона на плоскости (R, Z) ; (б) 3D-вид электронной пушки; (в) вид электронной пушки в координатах R, Φ

В гиротронах производства ИПФ РАН и НПП ГИКОМ обычно используется покрытие на основе LaV_6 с плотностью токоотбора до 5 A/cm^2 . В нашей системе такой уровень плотности тока не позволяет получить достаточный для гарантированной генерации рабочий ток. С другой стороны, в вакуумной электронике активно используются металлопористые катоды, плотность тока эмиссии которых может составлять более 15 A/cm^2 [182]. При токоотборе $14,1 \text{ A/cm}^2$ доступный уровень рабочего тока с учётом приемлемых размеров электронного пучка в пространстве взаимодействия составил 150 mA . Из-за малых размеров сектора эмиссии в магнитном поле $5,4 \text{ Tл}$ электронный пучок принимает вид трубчатого пучка (см. рисунок 3.15а), причем электроны распространяются по винтовой траектории вокруг его центра, а распределение плотности тока имеет несимметричный вид. Наружный размер электронного пучка в поперечном сечении составляет сумму диаметра проекции эмиссионной поверхности Δb и диаметра ларморовской окружности (радиус ларморовской окружности при магнитном поле $5,4 \text{ Tл}$ равен $0,15 \text{ мм}$). В поле $8,1 \text{ Tл}$ пучок имеет меньшие поперечные размеры, что

приводит к заполнению пространства в центре пучка электронными траекториями (рисунок 3.15б). Наибольшая плотность тока в рабочем пространстве составила около 260 и 310 А/см² в магнитном поле 5,4 и 8,1 Тл соответственно. При этом в первом случае электрическое поле на эмиттере составляет $E_c = 5,1$ кВ/мм, а анодное напряжение $U_a = 43$ кВ, а во втором случае $E_c = 7,0$ кВ/мм, $U_a = 58$ кВ. Основные параметры спроектированной электронной пушки указаны в таблице 3.6.

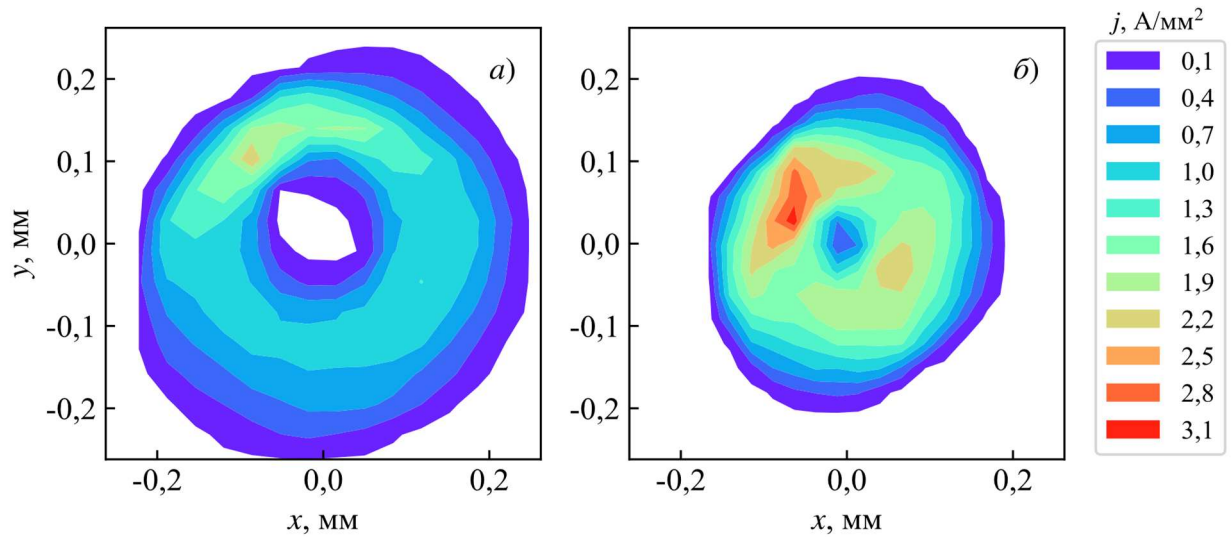


Рисунок 3.15 — Распределение плотности тока в пространстве взаимодействия в сечении плоскостью (R, Φ) при значениях магнитных полей 5,4 Тл (а) и 8,1 Тл (б)

Таблица 3.6 Основные параметры МИП для многоствольного гиротрона

| | | |
|--|------|------|
| Величина магнитного поля в центре магнитной системы, Тл | 5,4 | 8,1 |
| Ускоряющее напряжение, кВ | 80 | 80 |
| Анодное напряжение, кВ | 43 | 58 |
| Напряженность электрического поля на эмиттере, кВ/мм | 5,1 | 7,0 |
| Коэффициент магнитной компрессии | 30,2 | 30,2 |
| Средний питч-фактор пучка | 1,4 | 1,2 |
| Средний радиус ведущих центров, мм | 4,7 | 4,7 |
| Диаметр электронного пучка в рабочем пространстве, мм | 0,47 | 0,36 |
| Ср. величина азимутального дрейфа на входе в резонатор, мм | 1,24 | 1,01 |

Процесс формирования электронного пучка

Поскольку поперечный срез электронного пучка в пространстве взаимодействия имеет нетривиальный вид, проследим процесс формирования электронного пучка на примере работы пушки с полем 5,4 Тл. На рисунке 3.16 показаны срезы электронного пучка плоскостью (R, Φ) с координатами $Z = 115, 154, 201, 240, 300$ и 368 мм, где Z — расстояние от центра эмиссии вдоль центральной оси прибора. При $Z = 115$ мм срез электронного пучка имеет прямоугольную форму, но уже начинает проявляться диокотронная неустойчивость, приводящая к размыванию краев пучка [183]. Далее двигаясь по винтовой траектории вдоль силовых линий магнитного поля пучок вытягивается по ларморовской окружности. Как можно заметить, прямоугольный размер эмиттера из-за малых размеров практически не влияет на форму электронного пучка в пространстве взаимодействия.

Рассмотрим траектории электронов, принадлежащих разным фракциям. На рисунке 3.17 показано расположение отдельных фракций крупных частиц, отличающихся положением центров эмиссии на кольцевом пояске, в сечениях $Z = 115$ мм и $Z = 368$ мм. Синим и зеленым цветами обозначены крупные частицы с крайними положениями центров эмиссии, оранжевым — крупные частицы с середины пояска эмиссии, фиолетовыми линиями обозначены границы пучка. Как видно на рисунке, несимметричное распределение плотности тока вызвано пересечением электронных траекторий, имеющих разную осцилляторную скорость.

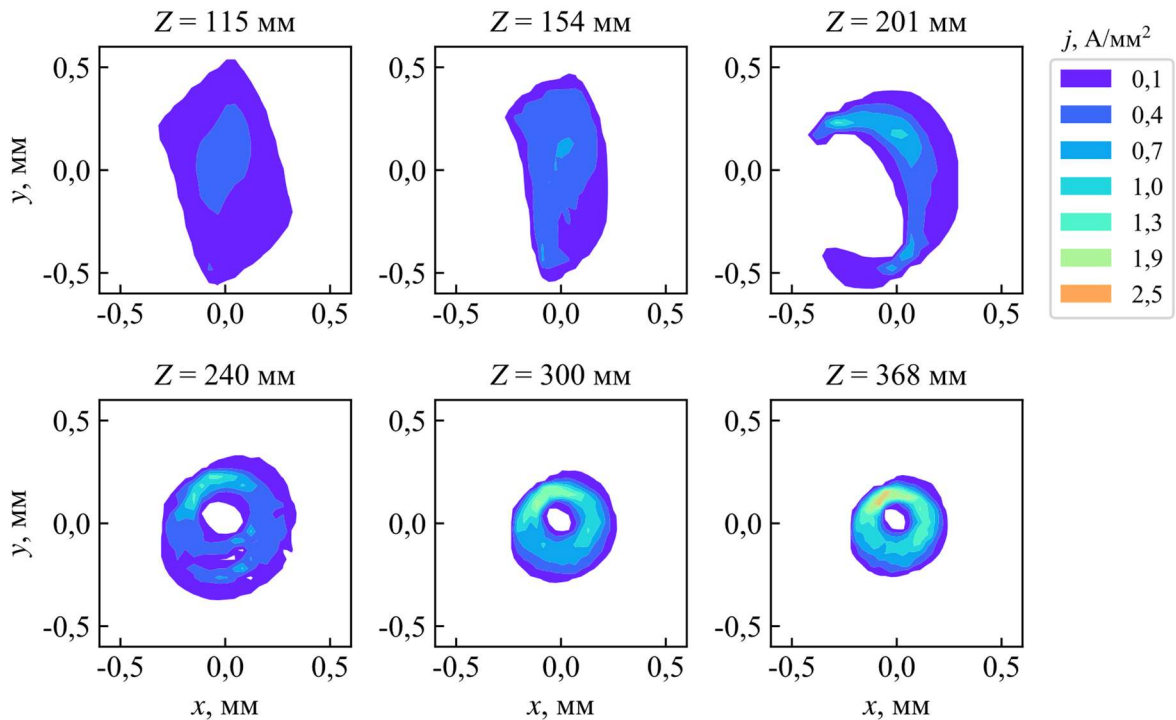


Рисунок 3.16 — Поперечные срезы электронного пучка в сечении плоскостью (R, Φ) при различном расстоянии от центра эмиссии при действующем поле 5,4 Тл

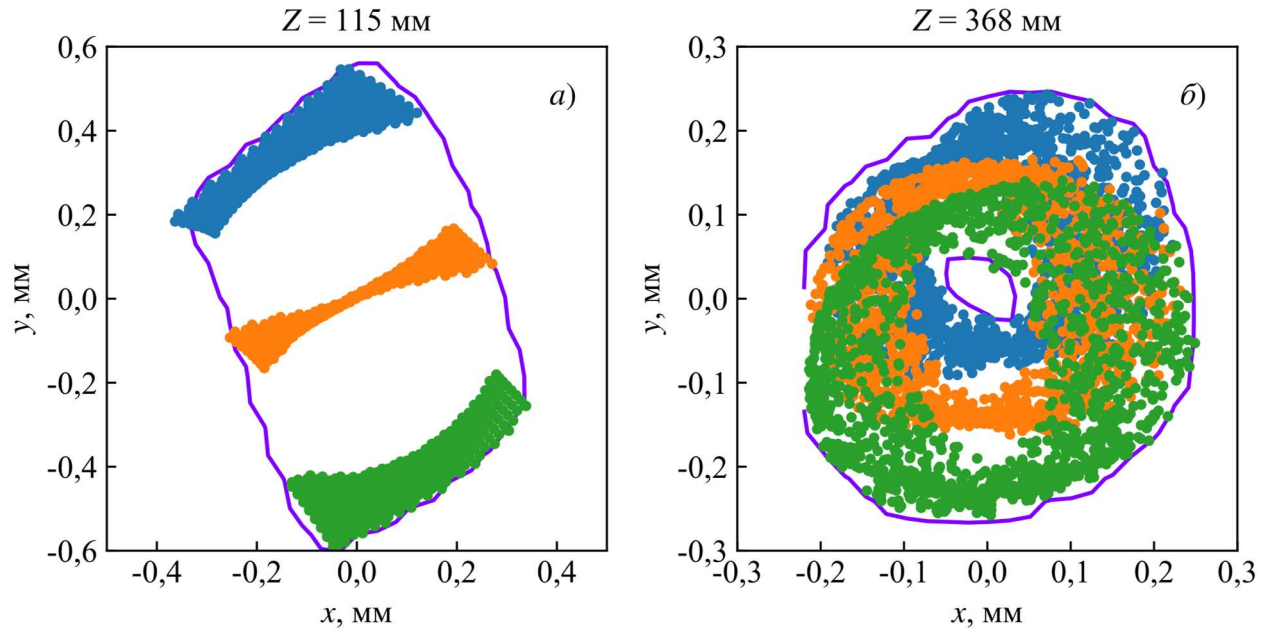


Рисунок 3.17 — Расположение отдельных фракций крупных частиц в сечениях $Z = 115$ мм (а), $Z = 368$ мм (б)

Учёт начального разброса скоростей и влияние пространственного заряда на параметры электронного пучка

В ходе траекторного анализа учитывалось влияние разброса начальных скоростей электронов, вызванное наличием шероховатости эмиттера. Итоговый разброс скоростей складывается из позиционного разброса скоростей, разброса начальных скоростей и разброса скоростей, вызванного полем пространственного заряда (ППЗ). В данном случае рассматриваются секторы эмиссии с малыми размерами, вследствие чего позиционный разброс скоростей минимален и не играет существенной роли. В начальном разбросе скоростей задавалась только φ -ая компонента разброса скоростей в виде функции Гаусса со среднеквадратичным отклонением 12% (соответствует разбросу в 30 % по полной ширине спектра осцилляторных скоростей). На рисунке 3.18 показаны функции распределения по вращательным скоростям с учётом и без учета ППЗ. Поле пространственного заряда расширяет функцию распределения, уменьшает питч-фактор электронного пучка и увеличивает скоростной разброс примерно вдвое, отражённый ток при питч-факторе 1,4 составляет менее 0,3%.

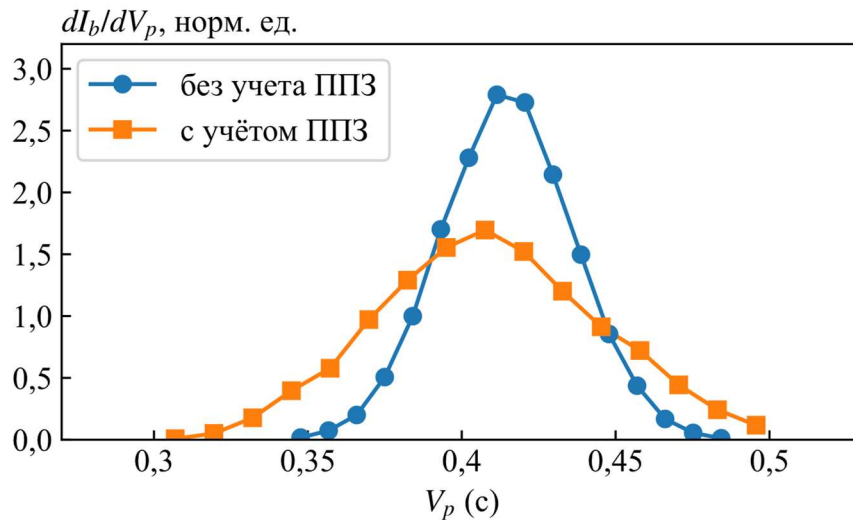


Рисунок 3.18 — Функция распределения при учёте (квадраты) и без учёта (круги) пространственного заряда при магнитном поле 5,4 Тл

Несмотря на заметное влияние пространственного заряда, в данной системе электронная пушка работает в Т-режиме (в режиме с температурным ограничением эмиссии). На рисунке 3.19 приведены зависимости питч-фактора, скоростного разброса и отраженного тока при изменении тока пучка. Отраженный ток начинает значительно расти при токе парциального пучка около 100 мА. Тем не менее, отражённый ток слабо влияет на формирование пучков, поскольку отражённые электроны в результате азимутального дрейфа отдаляются от сектора эмиссии. Поле пространственного заряда вблизи сектора эмиссии меняется только за счёт собственной эмиссии. При токе парциального пучка 150 мА из-за ППЗ средний питч-фактор уменьшается с 1,47 до 1,4, при этом отражённый ток не превышает 0,3%. При большем токе поле пространственного заряда начинает играть доминирующую роль. Для сравнения, аналогичные зависимости приведены на рисунке 3.19 для случая симметричной эмиссии со всего кольцевого пояса при одинаковой плотности тока. Как видно из рисунка, переход от трубчатого пучка к тонким пучкам электронов при сохранении плотности тока эмиссии приводит к заметному снижению влияния ППЗ.

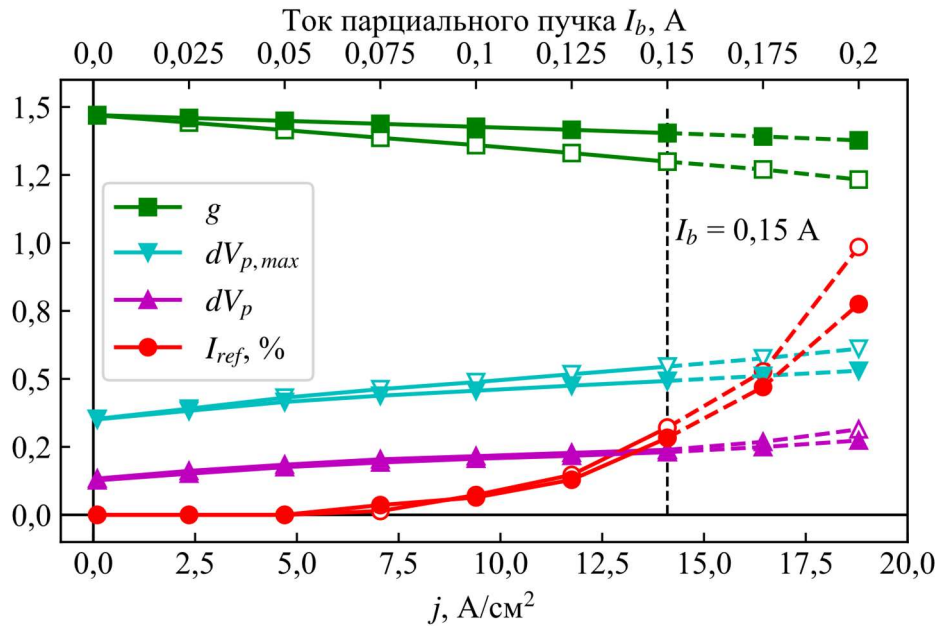


Рисунок 3.19 — Параметры электронного пучка (питч-фактор g (квадраты), отражённый ток I_{ref} в % (круги), скоростной разброс с отсечками по уровням 10% и 90% dV_p (треугольники углом вверх), полный скоростной разброс $dV_{p,max}$ (треугольники углом вниз)) в зависимости от плотности эмиссии для МСГ с четырьмя пучками (заполненные маркеры) и для случая симметричной эмиссии со всего кольцевого пояса (полые маркеры) при магнитном поле 5,4 Тл

Азимутальный дрейф электронного пучка

Средний азимутальный дрейф в режиме с $B_0 = 5,4$ Тл составил 16 градусов, или 1,24 мм в резонаторе, а в случае режима с 8,1 Тл — 12 градусов, или 1,01 мм (см. таблицу 3.6). Траектории трубок тока при полях 5,4 и 8,1 Тл показаны на рисунке 3.20. Дополнительным способом уменьшить величину азимутального дрейфа в скрещенных полях является изменение длины катодного носика. Даже без укорочения длины катодного носика азимутальный дрейф рассматриваемой электронной пушки не превышает радиуса стволов резонаторной системы, рассмотренных в следующем разделе. Это позволяет обеспечить условие, при котором в процессе изменения напряжения (включения/выключения установки) электронные пучки не будут касаться стенок резонаторов.

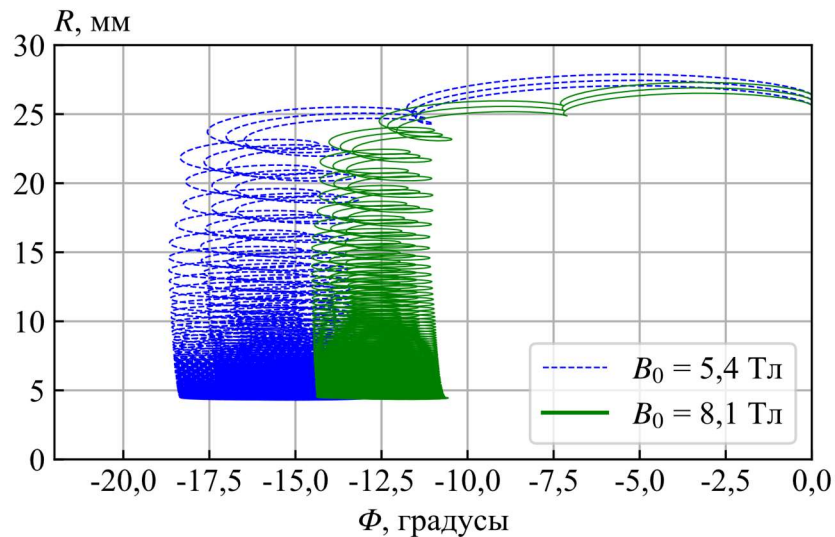


Рисунок 3.20 — Траектории пучков в координатах R , Φ при полях 5,4 Тл (пунктирные линии) и 8,1 Тл (сплошные линии)

Далее оценим возможности корректировки позиции электронного пучка по (3.6)–(3.8). Для примера, при работе с полем 5,4 Тл уменьшение анодного напряжения с 43 кВ до 40 кВ, ускоряющего напряжения с 80 кВ до 72,2 кВ, магнитного поля вблизи катода с 0,162 Тл до 0,146 Тл радиус пучка в резонаторе уменьшается на 0,24 мм, при этом азимутальный дрейф и питч-фактор сохраняются. В свою очередь для уменьшения величины азимутального дрейфа на 0,12 мм анодное напряжение следует уменьшить с 43 кВ до 35 кВ, ускоряющее напряжение — с 80 кВ до 53 кВ, при этом радиус пучка и питч-фактор практически не изменятся. Приведенные аналитические оценки согласуются с результатами траекторного анализа.

Как видно на конкретных примерах, возможности по коррекции положения пучка весьма ограничены. Система не имеет азимутальной симметрии, поэтому даже небольшое азимутальное отклонение резонаторной системы может привести к срыву генерации. При этом, несомненно, реализовать требуемое расположение каждого ствола системы для одновременной работы нескольких из них является весьма сложной задачей. Возможным решением проблемы является использование схемы МИП с индивидуальным подогревом каждого сектора эмиттера. Такой подход позволит гибко управлять возбуждением ВЧ-колебаний в каждом стволе резонаторной системы и упростит эксплуатацию установки.

3.4.2 Электронно-волновое взаимодействие с МСГ на высоких гармониках

Обозначим стволы электродинамической системы для работы на частотах 263 ГГц, 395 ГГц, 526 ГГц и 594 ГГц как резонаторы № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно. Результаты расчётов режима с одновременной трёхчастотной генерацией показаны в таблице 3.7 и на рисунке 3.21. На первом этапе расчётов отдельно оптимизировалась геометрия каждого ствола

резонаторной системы: в случае резонатора № 3 — с целью достижения наибольшего КПД (возбуждение в гиротроне моды, синхронной с четвёртой гармоникой гирочастоты, является весьма сложной задачей); в остальных случаях — с целью достижения наибольшей полосы плавной перестройки (такой подход позволяет расширить частотные возможности прибора). При этом положение каждого ствола резонаторной системы определяется соответствующим парциальным электронным пучком. Магнитное поле 5,41 Тл является оптимальным для работы на частоте 526 ГГц на четвертой циклотронной гармонике и неоптимальным для мод $TE_{2,4}$ и $TE_{3,5}$. При одновременной генерации излучения на частотах 263, 395 и 526 ГГц расчётная выходная мощность составила 88, 64 и 42 Вт соответственно. При отдельной оптимизации режимов мощность достигает более 1 кВт на частоте 263 ГГц и около 260 Вт на частоте 395 ГГц. Для одночастотной генерации на 594 ГГц максимальная мощность составила около 200 Вт.

В рассматриваемой схеме МСГ в режиме работы на 4-ой циклотронной гармонике электронный КПД системы составляет 2,21% (расчётный волновой КПД равен 0,35%). Низкий электронный КПД обусловлен с одной стороны, характерным для работы на 4-ой циклотронной гармонике слабоэффективным (мультипольным) электронно-волновым взаимодействием, с другой стороны малой добротностью рабочей моды. В рассматриваемой системе дифракционная добротность значительно больше омической добротности. Это приводит к высокой доле омических потерь, которая составляет в этом случае около 84%. Иными словами, 84% мощности высокочастотного излучения, отобранной у электронного пучка, уходит на нагрев стенки резонатора. Волновой КПД системы может быть увеличен при помощи повышения ускоряющего напряжения и/или среднего питч-фактора электронного пучка.

Таблица 3.7 Режимы генерации многоствольной системы. Рабочие параметры:

$$U_0 = 80 \text{ кВ}, I = 0,15 \text{ А}$$

| | f , ГГц | Мода | Номер гармоника | B_0 , Тл | R_r , мм | L , мм | η_{out} , % | P_{out} , Вт |
|-----------------|-----------|------------|-----------------|------------|------------|----------|------------------|----------------|
| Рез. № 1 | 263,0 | $TE_{2,4}$ | 2 | 5,41 | 2,39 | 18 | 0,74 | 88 |
| Рез. № 2 | 394,5 | $TE_{3,5}$ | 3 | 5,41 | 2,15 | 20 | 0,54 | 64 |
| Рез. № 3 | 526,0 | $TE_{4,7}$ | 4 | 5,41 | 2,32 | 26 | 0,35 | 42 |
| Рез. № 4 | 594,0 | $TE_{3,7}$ | 3 | 8,1 | 1,94 | 14 | 1,71 | 200 |

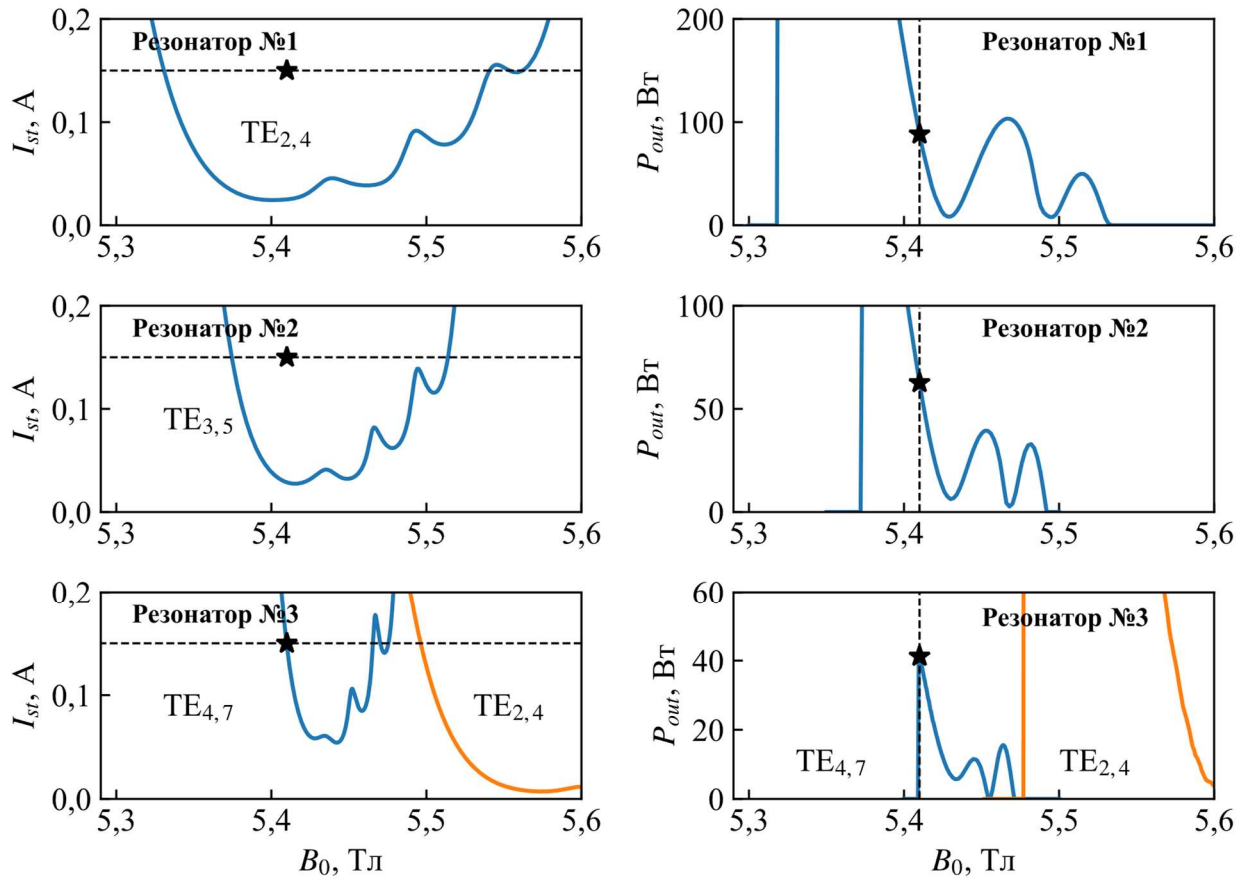


Рисунок 3.21 — Зависимости стартового тока (слева) и выходной мощности (справа) от магнитного поля. Звездой указан режим одновременной многочастотной генерации на кратных друг к другу частотах

Приосевой электронный пучок эффективно взаимодействует лишь с модами, азимутальный индекс которых совпадает с номером циклотронной гармоники. Благодаря этому правилу отбора моды $TE_{2,4}$ и $TE_{3,5}$ практически не имеют конкурентов. Вместе с тем, для моды $TE_{4,7}$ основным конкурентом является мода $TE_{2,4}$, синхронная со второй циклотронной гармоникой. Паразитная мода $TE_{2,4}$ не перекрывает зону генерации моды $TE_{4,7}$ даже в случае работы на высоких продольных модах из-за выбора «сверхдлинного» (45λ) резонатора с узкой полосой циклотронного резонанса. Таким образом, в случае тонкого приосевого пучка моды $TE_{2,4}$, $TE_{3,5}$ и $TE_{4,7}$ хорошо отселектированы (не имеют значимых конкурентов). В случае резонатора № 4 у выбранной моды $TE_{3,7}$ есть конкурент — мода $TE_{2,5}$, не влияющая на режим с наибольшим КПД, но ограничивающая диапазон плавной перестройки частоты (см. рисунок 3.22б).

Выше показано, что согласно результатам траекторного анализа, максимальное отклонение ведущих центров электронных орбит составляет около 0,1 мм. Широкий электронный пучок неизбежно приводит к росту стартового тока и к снижению мощности

выходного излучения, особенно для мод $TE_{4,7}$ и $TE_{3,7}$. Кроме того, появляются паразитные моды, для которых правило отбора не выполняется. В случае резонатора № 3 при отклонении электронного пучка от оси ствола возможно возбуждение моды $TE_{4,5}$ ($n = 3$) на третьей циклотронной гармонике. На рисунке 3.22 показаны зависимости стартового тока рабочих и паразитных мод при радиусе встрела 0 и 0,1 мм. При отклонении центра электронных орбит на 0,1 мм стартовый ток моды $TE_{4,5}$ приближается к стартовому току желаемой моды $TE_{4,7}$. При работе на моде $TE_{3,7}$ с частотой генерации 594 ГГц при отклонении пучка на 0,1 мм относительно оси резонатора расчётный КПД снижается с 1,71% до 0,38% (более чем в 4 раза).

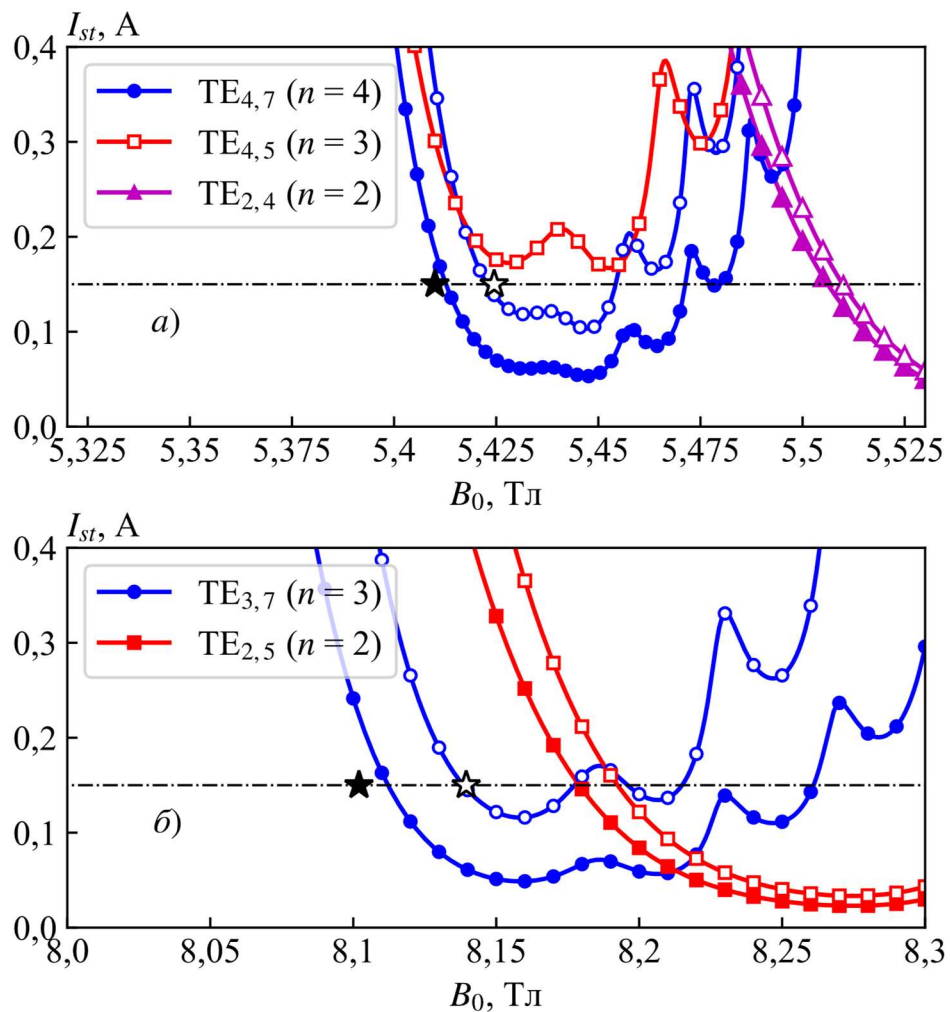


Рисунок 3.22 — Стартовые токи мод $TE_{4,7}$ ($n = 4$, круги), $TE_{4,5}$ ($n = 3$, квадраты), $TE_{2,4}$ ($n = 2$, треугольники) (а) и мод $TE_{3,7}$ ($n = 3$, круги), $TE_{2,5}$ ($n = 2$, квадраты) (б) от магнитного поля при отклонении центра электронных орбит на 0 мм (заполненные маркеры) и 0,1 мм (полые маркеры). Звездой указаны рабочие режимы

Переход к изолированным резонаторам или катодным участкам эмиссии с наведением разных ускоряющих напряжений для каждого парциального пучка, влетающего в соответствующий резонатор, позволит не только корректировать параметры выходного

излучения, но и значительно повысить КПД и мощность излучения в случае резонаторов № 1 и № 2. Так, в случае рез. № 1 с частотой излучения 263 ГГц расчётная мощность повысится более чем в 10 раз (с 90 Вт до 1100 Вт) при увеличении ускоряющего напряжения с 80 кВ до 90 кВ. В случае рез. № 2 с рабочей частотой 394,5 ГГц мощность выходного излучения можно поднять в 4 раза (с 65 Вт до 260 Вт) при увеличении напряжения на 4 кВ. При соответствующей подстройке возможна генерация излучения на других частотах в соответствии с размерами резонаторов.

Работа с «изолированными» пучками позволяет осуществить одновременную пропорциональную перестройку. Анализ возможности плавной перестройки частоты в рассматриваемой системе выполнен в предположении тонкого приосевого пучка. Плавная перестройка частоты может быть реализована при помощи изменения магнитного поля или парциального изменения ускоряющего напряжения каждого пучка системы. Расчётные диапазоны перестройки частоты приведены в таблице 3.8. Максимальный диапазон перестройки частоты при одновременной кратной трехчастотной генерации ограничен диапазоном перестройки на частоте 526 ГГц. В случае моды $TE_{4,7}$ он составляет около 0,29 ГГц на частоте 526 ГГц и соответственно 0,145 ГГц на частоте 263 ГГц.

Таблица 3.8 Расчётный диапазон плавной перестройки частоты в многоствольной системе при выводе излучения в сторону коллектора и электронной пушки

| | | Вывод излучения в сторону коллектора | | Вывод излучения в сторону МИП | |
|------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| Мода | f , ГГц | L , мм | Δf , ГГц | L , мм | Δf , ГГц |
| $TE_{2,4}$ ($n = 2$) | 263,0 | 18 | 0,97 | 18 | 0,99 |
| $TE_{3,5}$ ($n = 3$) | 394,5 | 20 | 0,55 | 20 | 0,53 |
| $TE_{4,7}$ ($n = 4$) | 526,0 | 26 | 0,29 | 26 | 0,28 |

3.4.3 Особенности электронно-волнового взаимодействия в МСГ с обращённой электродинамической системой (режим giro-ЛОВ)

В предложенной выше схеме многоствольного гиротрона помимо вывода излучения в сторону коллектора, в качестве альтернативы, ниже рассмотрен вариант с выводом излучения в сторону электронной пушки. Данный режим работы гиротрона можно реализовать, в частности, используя электродинамическую систему с выходным расширением со стороны электронной пушки и закритическим сужением со стороны коллектора [184, 185].

Плавная перестройка частоты в гиротроне осуществляется путем возбуждения серии мод с разным количеством продольных вариаций. Причем, при возбуждении высоких продольных мод гиротрон работает в так называемом «ЛОВ-режиме», то есть электронный пучок взаимодействует с распространяющейся навстречу ему волной. Переход к работе в «ЛОВ-режиме», используя обращённую электродинамическую систему с выводом излучения в сторону МИП, позволит, с одной стороны, снизить дифракционную добротность и уменьшить долю омических потерь при той же длине резонатора, или, с другой стороны, увеличить длину резонатора при сохранении доли омических потерь на приемлемом уровне. В последнем случае увеличение длины резонаторов при малом токе электронного пучка приведёт к росту количества возбуждаемых продольных мод и, таким образом, увеличению диапазона плавной перестройки. Указанные особенности делают вывод излучения с раскрывом резонатора в сторону электронной пушки перспективным при построении многоствольных гиротронов субтерагерцового и терагерцового диапазонов, работающих на высоких циклотронных гармониках.

С целью анализа перспективности данного подхода выполнены расчёты электронно-волнового взаимодействия для генерации излучения на частотах 263, 395 и 526 ГГц. При оптимизации геометрии резонаторов с выводом излучения в сторону электронной пушки длины регулярных участков не менялись. На рисунке 3.23 показаны зависимости мощности выходного излучения от магнитного поля для трёх рассматриваемых резонаторов. Во всех случаях наибольшая мощность в случае использования обращённой электродинамической системы уступает соответствующим вариантам с обычной электродинамической системой. В случае резонатора с частотой генерации 526 ГГц более эффективным становится режим работы на второй продольной моде, несмотря на то что для обычной электродинамической системы оптимальным остается режим на первой продольной моде. Расчётные параметры, полученные в рамках рассматриваемых двух подходов для режима генерации на частоте 526 ГГц, показаны в таблице 3.9.

На рисунках 3.24 и 3.25 показаны геометрия резонаторов и продольные структуры ВЧ-поля моды $TE_{4,7}$ в магнитных полях 5,415 и 5,447 Тл. В случае обращённой электродинамической системы, при работе вблизи критической частоты режим возбуждения эквивалентен гиротрону с обычной электродинамической системой. При этом излучение будет отражаться от коллекторного конца в сторону пушки. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к плавному переходу от режима работы с одной продольной вариацией к режиму гиро-ЛОВ. Подход с раскрывом резонатора в сторону пушки позволяет увеличить средний уровень мощности в рабочей полосе и значительно уменьшить изрезанность зависимости выходной мощности от частоты генерации.

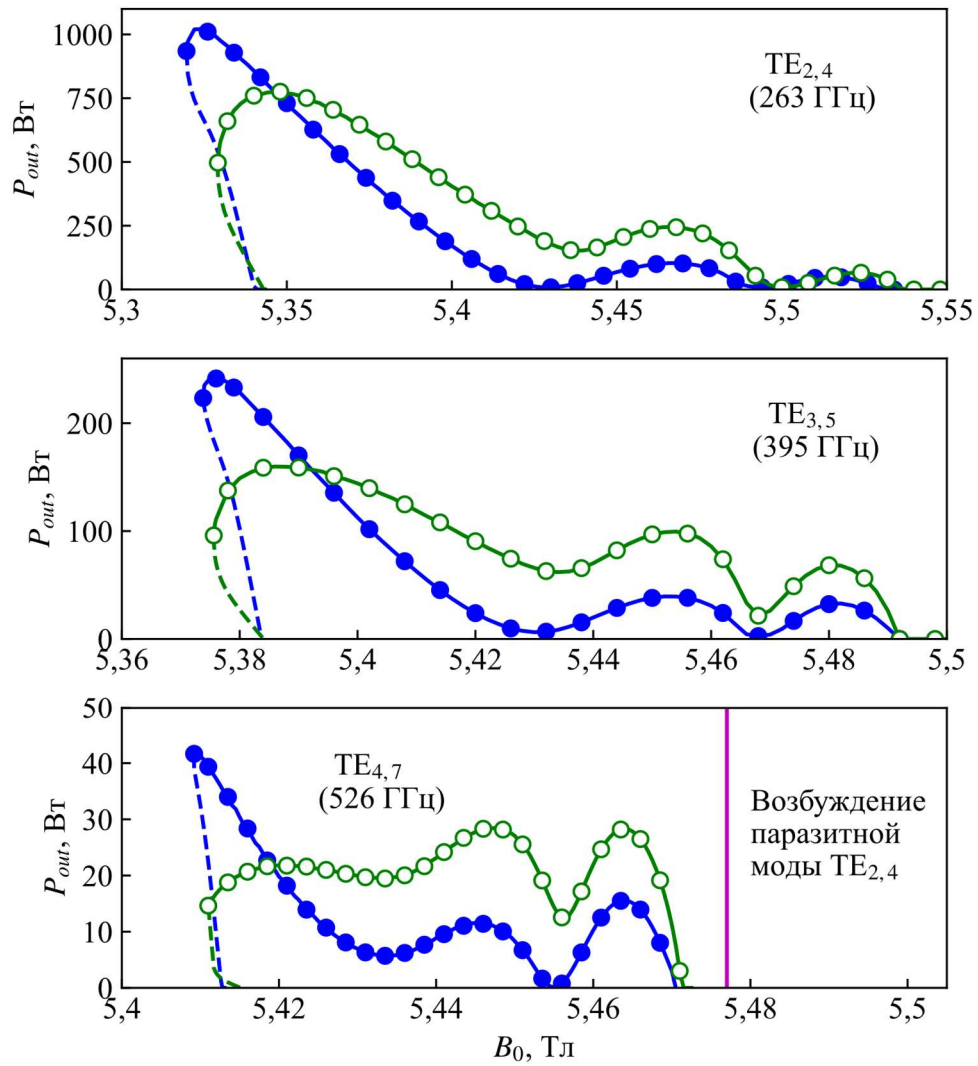


Рисунок 3.23 — Зависимость выходной мощности от магнитного поля при выводе излучения в сторону коллектора (заполненные маркеры) и в сторону электронной пушки (полые маркеры).

Фиолетовым цветом показана граница области возбуждения паразитной моды TE_{2,4}

Таблица 3.9 Сравнение двух подходов при работе на частоте 526 ГГц на четвёртой циклотронной гармонике

| | Вывод излучения в сторону коллектора | Вывод излучения в сторону эл. пушки |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Длина резонатора, мм | 26 | 26 |
| Электронный КПД, % | 2,2 | 0,95 |
| Волновой КПД, % | 0,35 | 0,24 |
| Максимальная удельная тепловая нагрузка в режиме с наибольшим КПД, кВт/см ² | 0,11 | 0,042 |
| Доля омических потерь, % | 84 | 75 |
| Диапазон плавной перестройки, ГГц | 0,29 | 0,28 |

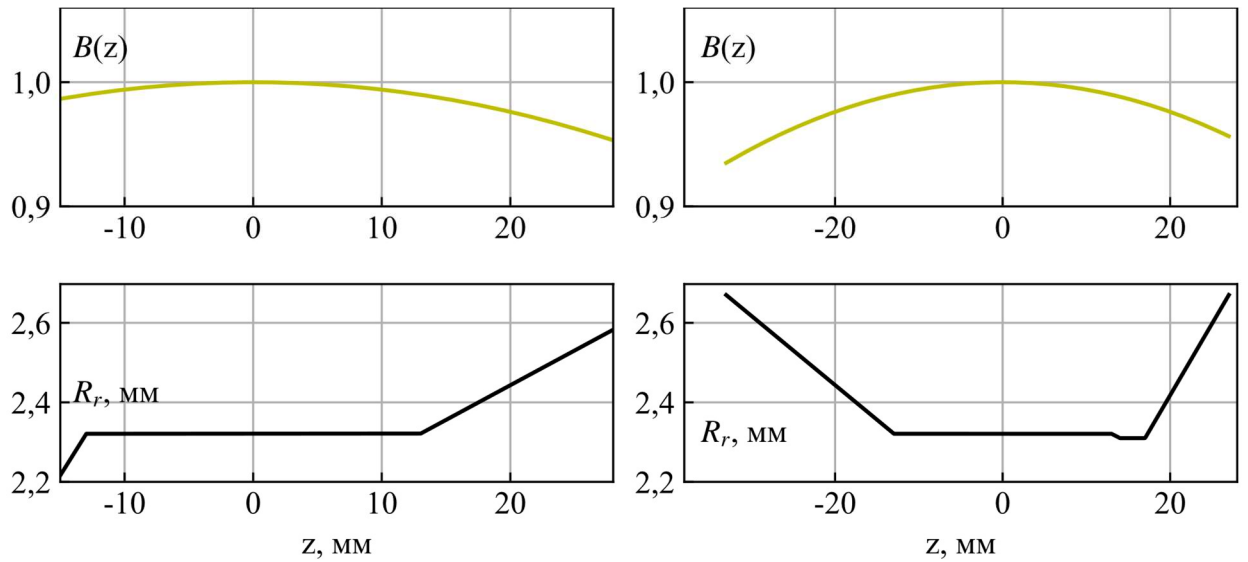


Рисунок 3.24 — Распределение неоднородного магнитного поля от криомагнита JASTEC-10T100 и профиль резонатора с раскрытием в сторону коллектора (слева) и в сторону пушки (справа)

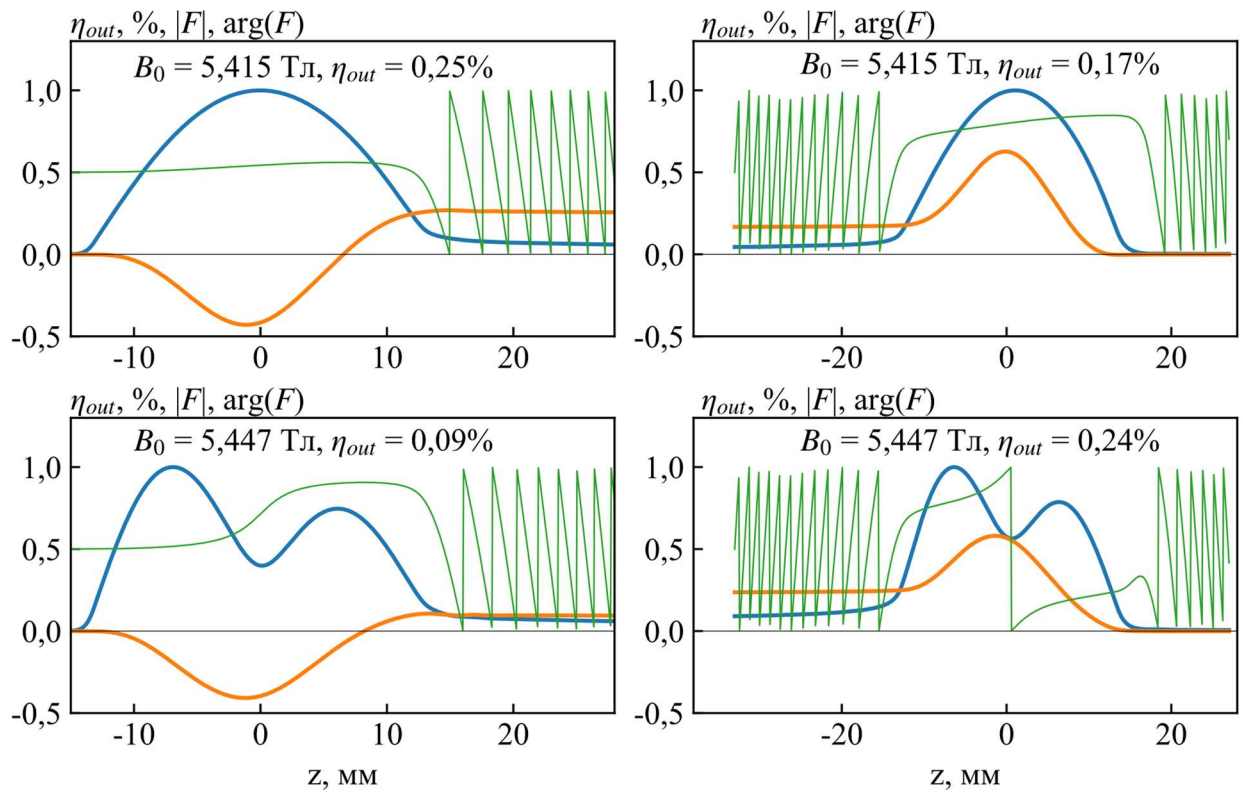


Рисунок 3.25 — Продольная структура ВЧ-поля (синие линии — амплитуды, зеленые — фазы) и волновой КПД (оранжевые линии) в магнитных полях 5,415 и 5,447 Тл при выводе излучения в сторону коллектора (слева) и в сторону электронной пушки (справа). Амплитуда и фаза ВЧ-поля указаны в нормированных единицах

3.4.4 Влияние качества внутренней поверхности резонатора

Важным фактором, влияющим на работу гиротрона, является качество внутренней поверхности резонатора, особенно, в случае рез. № 3 с режимом работы на частоте 526 ГГц. С целью исследования влияния микронеровностей на поверхности резонатора на эффективность работы гиротрона параметр шероховатости k_{skin} менялся в диапазоне от 1,4 до 4,5. Очевидно, ухудшение качества внутренней поверхности резонатора приводит к снижению волнового КПД (рисунок 3.26). При параметре $k_{skin} = 4$ волновой КПД составляет 0,09%, а расчётная мощность равна 11 Вт, что является достаточным для спектроскопических приложений.

Кроме улучшения качества внутренней поверхности дополнительные возможности снижения омических потерь и повышения КПД связаны с выбором материала резонатора и его охлаждения до низких температур [A9].

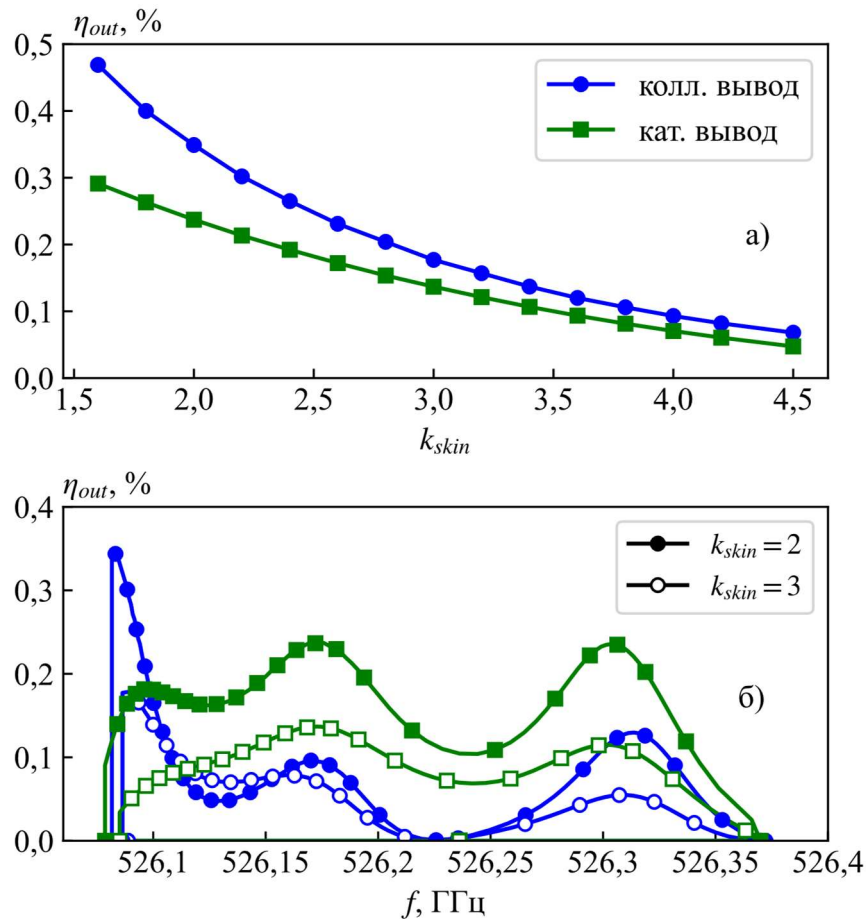


Рисунок 3.26 — Зависимость наибольшего волнового КПД от значения параметра k_{skin} (а) и зоны генерации при $k_{skin} = 2$ и $k_{skin} = 3$ (б) при выводе излучения в сторону коллектора (круги) и в сторону эл. пушки (квадраты) в случае рез. № 3 с режимом работы на частоте 526 ГГц

3.4.5 Возможности рекуперации на коллекторе и система вывода излучения

Широко используемым методом повышения эффективности мощных гиротронов является рекуперация остаточной энергии на CPD (Collector Potential Depression) — коллекторе. Далее рассмотрена возможность рекуперации остаточной энергии отработанных электронных пучков в многоствольном гиротроне. Спектр энергии электронных пучков после взаимодействия показан на рисунке 3.27. Приведённые спектры электронных пучков являются типичными для гиротронов, работающих на высоких циклотронных гармониках [186]. Отметим, из-за слабоэффективного электронно-волнового взаимодействия в результатах численного моделирования отсутствовали фракции электронов, которые за время пролёта смогли бы отдать или приобрести значительную часть энергии. Это приводит к низкому КПД и к отсутствию «хвоста» распределения с высокоэнергетическими частицами, который характерен для мощных гиротронов, работающих на основном гирорезонансе [187].

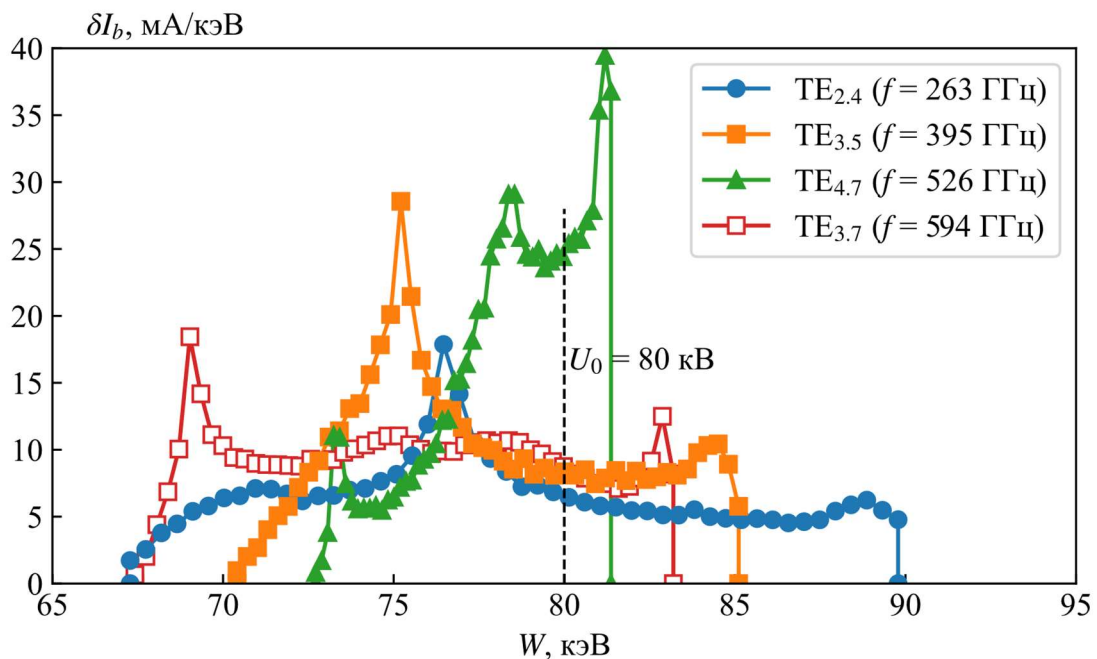


Рисунок 3.27 — Энергетический спектр отработанных электронных пучков в многоствольном гиротроне в режиме одновременной работы мод $TE_{2,4}$, $TE_{3,5}$, $TE_{4,7}$ при $B_0=5,41$ Тл и в случае работы моды $TE_{3,7}$ при $B_0=8,1$ Тл

В режиме одновременной многочастотной генерации тормозящее напряжение может превышать 65 кВ. При этом итоговый КПД с учётом рекуперации вырастает в пять раз по сравнению с волновым КПД без рекуперации. Согласно расчётам, максимальная энергия попадающих на коллектор электронов после одноступенчатой рекуперации не превышает 25 кэВ (энергия электрона после взаимодействия составляет не более 90 кэВ). Генерация рентгеновского излучения на коллекторе в этом случае незначительна, и при умеренной защите

коллектора прибор является достаточно безопасным для человека. Некоторое усложнение конструкции гиротрона в этом случае сопровождается существенным упрощением системы источников высоковольтного питания и всего гиротронного комплекса.

Нетривиальной задачей в многоствольном гиротроне является реализация многочастотной системы вывода излучения. В принципе, может быть реализован вывод излучения через общий волновод с широкополосным выходным окном [188]. Но на данном этапе для каждого резонатора многоствольной системы рассматривается отдельная система вывода энергии. Такая система может быть реализована либо в виде прямой системы вывода как показано на рисунке 3.1а, либо при помощи серии профилированных зеркал с возможностью преобразования поперечной структуры волновых пучков. Данный гиротрон разрабатывается для спектроскопических приложений, в которых требуются волновые пучки с поперечной структурой в виде функции Гаусса, поэтому в качестве примера рассмотрим схему квазиоптического вывода излучения.

Пример схемы вывода энергии в многоствольном гиротроне на качественном уровне показан на рисунке 3.28. Как ранее замечено, варианты решения задачи не ограничены выводом излучения в сторону коллектора. Поэтому, для примера, в случае резонаторов № 3 и № 4 может быть реализован вывод излучения в сторону электронной пушки, а для резонаторов № 1 и № 2 — в сторону коллектора. Данная схема позволяет осуществить вывод излучения из четырёх стволов резонаторной системы через два выходных окна. Благодаря низкому уровню мощности выходного излучения в качестве материала выходного окна может быть использован нитрид бора, в этом случае реализация выходного окна с полосами прозрачности на двух заданных частотах не представляет особой сложности.

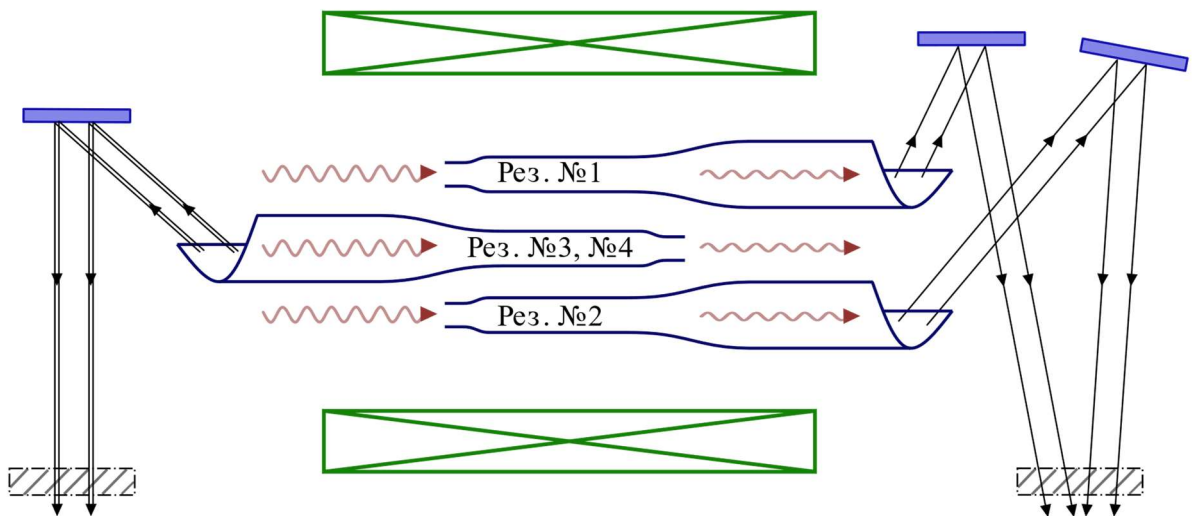


Рисунок 3.28 — Пример схемы вывода энергии в многоствольном гиротроне

3.5 Основные выводы по главе 3

В работе рассмотрена новая перспективная схема многоствольного гиротрона. Главным преимуществом многоствольных гиротронов по сравнению с набором отдельных гиротронов с аналогичными выходными характеристиками является использование одной магнитной системы, что не только уменьшает стоимость гиротронной установки, но и упрощает её. Предложенная схема включает в себя преимущества как канонического гиротрона, если говорить о системе формирования винтовых электронных пучков, так и ГБО с эффективной селекцией рабочей моды. Многоствольные гиротроны перспективны, например, для увеличения диапазона перестройки частоты или продвижения в терагерцовый диапазон, путем возбуждения мод, работающих на высоких циклотронных гармониках. Кроме того, данная схема МГС может быть использована для одновременной или последовательной генерации на кратных друг к другу частотах.

В многоствольных гиротронах терагерцового диапазона существенно ограничен ток каждого электронного пучка системы, что снижает уровень мощности выходного излучения. Тем не менее, для большинства приложений субтерагерцового и терагерцового диапазонов требуются частотно-перестраиваемые источники излучения с мощностью порядка 10 Вт и даже менее. Как показали исследования такой уровень мощности заведомо достижим в рассматриваемых приборах.

В работе подробно рассмотрены ЭОС многоствольных гироприборов с симметричным положением секторов эмиссии, но предложенную схему можно распространить и на всевозможные несимметричные системы с помощью смещения различных секторов в разных направлениях, в том числе до центральной оси симметрии магнитной системы (в этом случае прибор принимает вид, подобный описанному в [170, 189]), с целью реализации новых приборов с уникальными характеристиками.

Выше мы ограничились рассмотрением многоствольных гиротронов в варианте автономных генераторов. Рассмотренная схема ЭОС применима для любых других многоствольных приборов, основанных на магнитотормозном излучении. Разумеется, в рамках данной концепции могут быть разработаны и синхронизованные генераторы (включая случай взаимной синхронизации) и усилители. Например, несколько стволы могут быть использовано в качестве гироклистронов (для увеличения коэффициента усиления или полосы), а один ствол с электронным пучком, имеющим пониженное значение питч-фактора, — как электронный поглотитель с насыщением. В этом случае система может быть использована для генерации ультракоротких импульсов, подобно [190].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $\kappa = \omega/c$ — волновое число;
 κ_{\perp} — поперечное волновое число;
 κ_{\parallel} — продольное волновое число;
 Q_{dif} — дифракционная добротность;
 $Q_{dif,min}$ — минимальная дифракционная добротность;
 Q_{ohm} — омическая добротность;
 Q_{tot} — полная добротность;
 λ — длина волны;
 L — длина регулярного участка резонатора гиротрона;
 e_0 — заряд электрона;
 m, p, q — азимутальный, радиальный и продольный индексы моды $TE_{m,p}$;
 η_{\perp} — поперечный КПД;
 η_{el} — электронный КПД;
 η_{out} — волновой КПД;
 η_{CPD} — КПД гиротрона с учётом рекуперации;
 γ — Лоренца-фактор;
 γ_0 — Лоренц-фактор до начала взаимодействия;
 m_0 — масса покоя электрона;
 P_{out} — мощность выходного излучения;
 U_a — напряжение между анодом и катодом (анодное напряжение);
 U_0 — ускоряющее напряжение на электроде резонатора относительно катода;
 n — номер гармоники гирочастоты ($n \geq 1$);
 g — отношение осцилляторной и продольной скоростей электронного пучка (питч-фактор);
 B_0 — магнитное поле в центре магнитной системы;
 B_c — магнитное поле на эмиттере;
 E_c — электрическое поле на эмиттере;
 c — скорость света;
 v_{\perp} — осцилляторная скорость электронов;
 v_{\parallel} — продольная скорость электронов;
 R_0 — средний радиус ведущих центров электронных орбит в пространстве взаимодействия (радиус встрела);

R_r — радиус регулярного участка резонатора;

R_c — средний радиус эмиссионного пояса на катоде;

j — плотность тока на эмиттере;

I_b — ток электронного пучка;

I_{st} — наименьшее значение тока электронного пучка, при которой происходит возбуждение ВЧ-колебаний в гиротроне (стартовый ток);

$\omega_H = e_0 B_0 / \gamma m_0$ — релятивистская циклотронная частота электронов;

ω — угловая частота выходного излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ВЧ — высокочастотный;
- ВЭП — винтовой электронный пучок;
- ГБО — гиротрон с большой орбитой;
- ГГц / ТГц — гигагерцы / терагерцы;
- ГИКОМ — Закрытое акционерное общество Научно-производственное предприятие «Гиком»;
- гиро-ЛБВ — гиротронная лампа бегущей волны;
- гиро-ЛОВ — гиротронная лампа обратной волны;
- ДПЯ — динамическая поляризация ядер;
- ИПФ РАН — Институт прикладной физики Российской академии наук;
- кВт / МВт — киловатты / мегаватты;
- КПД — коэффициент полезного действия;
- МИП — магнетронно-инжекторная пушка;
- МСГ — многоствольный гиротрон;
- СРТМ — связанный резонатор с трансформацией мод;
- УТС — управляемый термоядерный синтез;
- ЭОС — электронно-оптическая система;
- ЭЦР — электронный циклотронный резонанс;
- ЯМР — ядерный магнитный резонанс;
- ANGEL — комплекс программ «ANGEL» (ANalyser of a Gyrating Electrons);
- CPD — коллектор с рекуперацией (Collector Potential Depression);
- CVD — химическое осаждение из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition);
- КИТ — Технологический институт Карлсруэ (нем. Karlsruher Institut für Technologie);
- $TE_{m,p}$ — собственная мода цилиндрического волновода с продольной составляющей магнитного поля (Transverse Electric mode).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaponov-Grekhov, A. V. Applications of high-power microwaves / A. V. Gaponov-Grekhov, V. L. Granatstein. — Boston, London : Artech House. 1994. — 364 p.
2. Братман, В. Л. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения / В. Л. Братман, А. Г. Литвак, Е. В. Суворов // Успехи физических наук. — 2011. — Т. 181, № 8. — С. 867–874.
3. Запевалов, В. Е. Терагерцовые технологии и их приложения / В. Е. Запевалов, А. Е. Храмов // Статья в коллективной монографии. Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона. Под редакцией А. Е. Храмова, А. Г. Баланова, В. Д. Еремки, В. Е. Запевалова, А. А. Короновского. — Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т., 2016. — С. 8–67.
4. Booske, J. H. Vacuum electronic high power terahertz sources / J. H. Booske [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2011. — Vol. 1, no. 1. — P. 54–75.
5. Lewis, R. A. A review of terahertz sources / R. A. Lewis // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2014. — Vol. 47, no. 37. — P. 374001.
6. Глявин, М. Ю. Источники мощного терагерцового излучения для спектроскопии и диагностики различных сред / М. Ю. Глявин [и др.] // Успехи физических наук. — 2016. — Т. 186, № 6. — С. 667–677.
7. Гольденберг, А. Л. Мазеры на циклотронном резонансе: состояние и перспективы / А. Л. Гольденберг [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1996. — Т. 39, № 6. — С. 635–669.
8. Nusinovich, G. S. Introduction to the Physics of Gyrotron / G. S. Nusinovich. — Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. — 336 p.
9. Запевалов, В. Е. Эволюция гиротронов / В. Е. Запевалов // Известия вузов. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 8–9. — С. 559–572.
10. Цимринг, Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Ш. Е. Цимринг; [перевод с англ.]. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2012. — 576 с.
11. Nusinovich, G. S. The gyrotron at 50: historical overview / G. S. Nusinovich, M. K. A. Thumm, M. I. Petelin // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2014. — Vol. 35, № 4. — P. 325–381.
12. Братман, В. Л. К теории релятивистского гиротрона / В. Л. Братман, Н. С. Гинзбург, Г. С. Нусинович // Письма в ЖТФ. — 1977. — Т. 3, № 18. — С. 961–965.
13. Денисов, Г. Г. Гиротроны мегаваттного уровня мощности для системы электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в установках УТС / Г. Г. Денисов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, № 10. — С. 845–858.

14. Abubakirov, E. B. W-band 5 MW pulse relativistic gyrotron / E. B. Abubakirov [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2017. — Vol. 64, no. 4. — P. 1865–1867.
15. Litvak, A. G. Russian gyrotrons: achievements and trends / A. G. Litvak, G. G. Denisov, M. Y. Glyavin // *IEEE Journal of Microwaves*. — 2020. — Vol. 1, no. 1. — P. 260–268.
16. Глявин, М. Ю. Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы / Глявин М. Ю. [и др.] // *Радиотехника и электроника*. — 2014. — Т. 59, № 8. — С. 745–751.
17. Glyavin, M. Yu. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and high-power THz technologies / M. Yu. Glyavin, T. Idehara, S. P. Sabchevski // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. — 2015. — Vol. 5, no. 5. — P. 788–797.
18. Запевалов, В. Е. Терагерцовые гиротроны / В. Е. Запевалов, М. Ю. Глявин // *Статья в коллективной монографии. Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона. Под редакцией А. Е. Храмова, А. Г. Баланова, В. Д. Еремки, В. Е. Запевалова, А. А. Короновского*. — Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т., 2016. — С. 68–107.
19. Kumar, N. A review on the sub-THz/THz gyrotrons / N. Kumar [et al.] // *Infrared Physics & Technology*. — 2016. — Vol. 76. — P. 38–51.
20. Blank, M. Millimeter-wave sources for DNP-NMR / M. Blank, K. L. Felch // *eMagRes*. — 2018. — Vol. 7, no. 4 — P. 155–166.
21. Sabchevski, S. Development and application of THz gyrotrons for advanced spectroscopic methods / S. Sabchevski, M. Glyavin // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10. — P. 189–219.
22. Granatstein, V. L. Detecting excess ionizing radiation by electromagnetic breakdown of air / V. L. Granatstein, G. S. Nusinovich // *Journal of Applied Physics*. — 2010. — Vol. 108, no. 6. — P. 063304.
23. Glyavin, M. Yu. A point-like source of extreme ultraviolet radiation based on a discharge in a non-uniform gas flow, sustained by powerful gyrotron radiation of terahertz frequency band / M. Yu. Glyavin [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2014. — Vol. 105, no. 17. — P. 174101.
24. Becerra, L. R. Dynamic nuclear polarization with a cyclotron resonance maser at 5 T / L. R. Becerra // *Physical Review Letters*. — 1993. — Vol. 71, no. 21. — P. 3561–3564.
25. Bajaj, V. S. Dynamic nuclear polarization at 9 T using a novel 250 GHz gyrotron microwave source / V. S. Bajaj [et al.] // *Journal of Magnetic Resonance*. — 2003. — Vol. 160, no. 2. — P. 85–90.
26. Ni, Q. High frequency dynamic nuclear polarization / Q. Ni [et al.] // *Accounts of Chemical Research*. — 2013. — Vol. 46, no. 9. — P. 1933–1941.
27. Dumbrajs, O. Electron cyclotron heating and current drive control by means of frequency step tunable gyrotrons / O. Dumbrajs, J. A. Heikkinen, H. Zohm // *Nuclear Fusion*. — 2001. —

Vol. 41, no. 7. — P. 927–944.

28. Thumm, M. K. A. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive / M. K. A. Thumm [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2019. — Vol. 59, no. 7. — P. 073001.

29. Запевалов, В. Е. Неканонические гиротроны / В. Е. Запевалов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2018. — Т. 61, № 4. — С. 305–314.

30. Паршин, В. В. Криовакуумный резонаторный комплекс / В. В. Паршин [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2013. — Т. 56, № 8–9. — С. 614–621.

31. Torrezan, A. C. Operation of a continuously frequency-tunable second-harmonic CW 330-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization / A. C. Torrezan [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2011. — Vol. 58, no. 8. — P. 2777–2783.

32. Qi, X.-B. Broadband continuous frequency tuning in a terahertz gyrotron with tapered cavity / X.-B. Qi, C.-H. Du, P.-K. Liu // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2015. — Vol. 62, no. 12. — P. 4278–4284.

33. Sabchevski, S. P. A numerical study on finite-bandwidth resonances of high-order axial modes (HOAN) in gyrotron cavity / S. P. Sabchevski, T. Idehara // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2015. — Vol. 36, no. 7. — P. 628–653.

34. Fedotov, A. E. Frequency tunable sub-THz gyrotron for direct measurements of positronium hyperfine structure / A. E. Fedotov [et al.] // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2018. — Vol. 39, no. 10. — P. 975–983.

35. Глявин, М. Ю. Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором / М. Ю. Глявин [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2018. — Т. 61, № 11. — С. 895–899.

36. Братман, В. Л. Перестройка частоты в гиромонотроне с электродинамической системой в виде конического волновода / В. Л. Братман, С. Л. Новожилов, М. И. Петелин // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. — 1976. — № 11. — С. 46–49.

37. Колосов, С. В. Исследование перестраиваемого гиротрона на конусообразном волноводе / С. В. Колосов, В. Е. Запевалов, И. Е. Зайцева // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. — 2018. — Vol. 63, no. 3. — P. 358–367.

38. Bandurkin, I. V. Frequency-tunable sub-terahertz gyrotron with external mirror: design and simulations / I. V. Bandurkin [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2023. — Vol. 70, no. 4. — P. 1936–1941.

39. Brand, G. F. Tuneable millimeter-wave gyrotrons / G. F. Brand [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 1982. — Vol. 3, no. 5. — P. 725–734.

40. Hong, K. D. A 150–600 GHz step-tunable gyrotron / K. D. Hong, G. F., Brand, T. Idehara // *Journal of Applied Physics*. — 1993. — Vol. 74, no. 8. — P. 5250–5258.

41. Idehara, T. Development of frequency tunable, medium power gyrotrons (Gyrotron FU series) as submillimeter wave radiation sources / T. Idehara [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 1999. — Vol. 27, no. 2. — P. 340–354.
42. Запевалов, В. Е. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105–156 ГГц / В. Е. Запевалов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2004. — Т. 47, № 5–6. — С. 443–452.
43. Thumm, M. Frequency step-tunable (114–170 GHz) megawatt gyrotrons for plasma physics applications / M. Thumm [et al.] // *Fusion Engineering and Design*. — 2001. — Vol. 53, no. 1–4. — P. 407–421.
44. Pan, S. Broadband terahertz-power extracting by using electron cyclotron maser / S. Pan [et al.] // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — P. 7265.
45. Yamaguchi, Y. Super multi-frequency oscillations at fundamental harmonics with a complex cavity gyrotron / Y. Yamaguchi [et al.] // *IEEE Electron Device Letters*. — 2020. — Vol. 41, no. 8. — P. 1241–1244.
46. Samsonov, S. V. Cyclotron resonance maser with zigzag quasi-optical transmission line: concept and modeling / S. V. Samsonov [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2021. — Vol. 68, no. 11. — P. 5846–5850.
47. Chirkov, A. V. Multifrequency gyrotron with high-efficiency synthesized waveguide converter / A. V. Chirkov [et al.] // *Technical Physics Letters*. — 2007. — Vol. 33, no. 4. — P. 350–352.
48. Chirkov, A. V. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes / A. V. Chirkov, G. G. Denisov, A. N. Kuftin // *Applied Physics Letters*. — 2015. — Vol. 106, no. 26. — P. 263501.
49. Denisov, G. Concept design of the megawatt power level gyrotron stabilized by a low-power signal for DEMO project / G. Denisov [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2022. — Vol. 62. — P. 036020.
50. Власов, С. Н. Об одной возможности просветления границ диэлектрика для нормально падающей волны независимо от её поляризации / С. Н. Власов, Е. В. Копосова // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2009. — Т. 52, № 10. — С. 804–808.
51. Kariya, T. Development of high power gyrotrons for advanced fusion devices / T. Kariya [et al.] // *Nuclear Fusion*. — 2019. — Vol. 59, no. 6. — P. 066009.
52. Соболев, Д. И. Широкополосные окна для СВЧ-излучения с малым отражением, изготовленные при помощи 3D-печати / Д. И. Соболев [и др.] // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. — 2021. — № 1. — С. 52–56.
53. Каценеленбаум, В. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися

параметрами / В. З. Каценеленбаум. — М. : Изд-во АН СССР, 1961. — 216 с.

54. Власов, С. Н. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения / С. Н. Власов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1969. — Т. 12, № 8. — С. 1236–1244.

55. Nusinovich, G. S. Field formation in the interaction space of gyrotrons / G. S. Nusinovich, O. Dumbrajs // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2016. — Vol. 37, no. 1. — С. 111–122.

56. Гапонов, А. В. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике / А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов // Известия вузов. Радиофизика. — 1967. — Т. 10, № 9–10. — С. 1414–1451.

57. Гинзбург, Н. С. Установление автоколебаний в электронных СВЧ генераторах с дифракционным выводом излучения / Н. С. Гинзбург [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1986. — Т. 29, № 1. — С. 106–114.

58. Moiseev, M. A. Numerical simulation of mode interaction in 170 GHz/1 MW gyrotrons for ITER / M. A. Moiseev [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 1997. — Vol. 18, no. 11. — P. 2117–2128.

59. Botton, M. MAGY: a time-dependent code for simulation of slow and fast microwave sources / M. Botton [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1998. — Vol. 26, no. 3. — P. 882–892.

60. Завольский, Н. А. О достижении высокого КПД релятивистского гиротрона / Н. А. Завольский, В. Е. Запечалов, М. А. Моисеев // Известия вузов. Радиофизика. — 2001. — Т. 44, № 4. — С. 345–352.

61. Завольский, Н. А. Численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в резонаторах мощных гиротронов с частотой 300 ГГц / Н. А. Завольский, В. Е. Запечалов, М. А. Моисеев // Известия вузов. Радиофизика. — 2021. — Т. 64, № 3. — С. 192–205.

62. Avramides, K. A. EURIDICE: a code-package for gyrotron interaction simulations and cavity design / K. A. Avramides [et al.] // EPJ Web of Conferences — 2012. — Vol. 32. — P. 04016.

63. Колосов, С. Оптимизация электронных приборов СВЧ с нерегулярными волноводами / С. Колосов. — Германия : LAP Lambert Academic Publishing, 2018. — 204 с.

64. Wang, P. GYROCOMPU: toolbox designed for the analysis of gyrotron resonators / P. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2020. — Vol. 48, no. 9. — P. 3007–3016.

65. Нусинович Г. С. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля / Г. С. Нусинович, Р. Э. Эрм // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ. — 1972. — № 8. — С. 55–60.

66. Кисунько, Г. В. Электродинамика полых систем / Г. В. Кисунько. — Ленинград :

Военная Краснознаменная Академия Связи, 1949. — 422 с.

67. Цимринг, Ш. Е. К теории неоднородных электромагнитных волноводов, содержащих критические сечения / Ш. Е. Цимринг, В. Г. Павельев // Радиотехника и электроника. — 1982. — Т. 27, № 6. — С. 1099–1102.

68. Павельев, В. Г. О методе плоских поперечных сечений в теории сильно нерегулярных сверхразмерных электромагнитных волноводов / В. Г. Павельев, Ш. Е. Цимринг // Радиотехника и электроника. — 1987. — Т. 32, № 5. — С. 1121–1124.

69. Павельев, В. Г. Исследование СВЧ колебательных систем на основе связанных резонаторов : диссертация на степень канд. физ.-мат. наук : 01.04.03 / Павельев Владимир Геннадьевич. – Горький: ИПФ РАН, 1982. — 183 с.

70. Запевалов, В. Е. Дифракционная добротность слабokonических резонаторов гиротронов / В. Е. Запевалов, О. В. Малыгин // Известия вузов. Радиофизика. — 1983. — Т. 26, № 7. — С. 903–905.

71. Nusinovich, G. S. Self-excitation of a tapered gyrotron oscillator / G. S. Nusinovich [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2010. — Vol. 38, no. 6. — P. 1200–1207.

72. Планкин, О. П., Семенов Е. С. Комплекс программ ANGEL-2DS для моделирования электронной пушки гиротрона. Инструкция для пользователя / О. П. Планкин, Е. С. Семенов. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2011. — 32 с.

73. Семенов, Е. С. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии / Е. С. Семенов, О. П. Планкин, Р. М. Розенталь // Известия вузов. ПНД. — 2015. — Т. 23, № 3. — С. 94–105.

74. Ильин, В. П. Численные методы решения задач электрофизики / В. П. Ильин. — М. : Наука, 1985. — 335 с.

75. Лыгин, В. К. Траекторный анализ протяжённых винтовых электронных пучков с учетом сил пространственного заряда / В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг // Известия вузов. Радиофизика. — 1978. — Т. 21, № 9. — С. 1364–1370.

76. Мануилов, В. Н. Об учете сил пространственного заряда при траекторном анализе протяженных электронных пучков / В. Н. Мануилов, Ш. Е. Цимринг // Известия вузов. Радиофизика. — 1981. — Т. 24, № 4. — С. 491–497.

77. Лыгин, В. К. О методах интегральных уравнений и вспомогательных зарядов в траекторном анализе интенсивных электронных пучков / В. К. Лыгин, В. Н. Мануилов, Ш. Е. Цимринг // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. — 1987. — № 7(401). — С. 36–38.

78. Lygin, V. K. Numerical simulation of intense helical electron beams with the calculation of the velocity distribution functions / V. K. Lygin // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 1995. — Vol. 16, no. 2. — P. 363–376.

79. Лещева, К. А. Численное 3D-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков giroприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии / К. А. Лещева, В. Н. Мануилов // *Успехи прикладной физики*. — 2019. — Т. 7, № 3. — С. 298–308.
80. Петелин, М. И. Самовозбуждение колебаний в гиротроне / М. И. Петелин // *Статья в сборнике научных трудов. Гиротрон*. Под ред. А. В. Гапонова-Грехова. — Горький : ИПФ АН СССР, 1981. — С. 5–25.
81. Венедиктов, Н. П. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер / Н. П. Венедиктов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2010. — Т. 53, № 4 — С. 260–268.
82. Ананичев, А. А. Использование одновременной перестройки нескольких управляющих параметров для стабилизации мощности излучения субтерагерцового гиротрона при перестройке частоты генерации / А. А. Ананичев [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. — 2022. — № 2. — С. 68–72.
83. Fix, A. Sh. The problems of increase in power, efficiency and frequency of gyrotrons for plasma investigations / A. Sh. Fix [et al.] // *International Journal of Electronics*. — 1984. — Vol. 57, no. 6. — P. 821–826.
84. Sakamoto, K. Major improvement of gyrotron efficiency with beam energy recovery / K. Sakamoto [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1994. — Vol. 73, no. 26. — P. 3532–3535.
85. Piosczyk, B. Single-stage depressed collectors for gyrotrons / B. Piosczyk [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 1996. — Vol. 24, no. 3. P. 579–585.
86. Glyavin, M. Yu. Experimental investigation of a 110 GHz/1 MW gyrotron with the one-step depressed collector / M. Yu. Glyavin [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 1997. — Vol. 18, no. 11. — P. 2129–2136.
87. Denisov, G. G. On the resonant scattering at guide dielectric windows / G. G. Denisov [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 1996. — Vol. 17, no. 5. — P. 933–945.
88. Parshin, V. V. Dielectric materials for gyrotron output windows / V. V. Parshin // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 1994. — Vol. 15, no 2. — P. 339–348.
89. Serov, E. A. Modern dielectric materials for output windows of high-power microwave and terahertz sources / E. A. Serov [et al.] // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2020. — Vol. 41, no. 12 — P. 1450–1459.
90. Denisov, G. G. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics / G. G. Denisov [et al.] // *Review of Scientific*

Instruments. — 2018. — Vol. 89, no 8. — P. 084702.

91. Запевалов, В. Е. Численное моделирование и экспериментальное исследование электронно-оптической системы гиротрона мегаваттного уровня мощности со ступенчатой перестройкой частоты в диапазоне 100–170 ГГц / В. Е. Запевалов, А. Н. Куфтин, В. К. Лыгин // Известия вузов. Радиофизика. — 2007. — Т. 50, № 9. — С. 773–784.

92. Нусинович, Г. С. Способы подачи напряжений на импульсный гиромонотрон, обеспечивающие высокий К.П.Д. в режиме одномодовой генерации / Г. С. Нусинович // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1974. — № 3. — С. 44–49.

93. Мануилов, В. Н. Ионная компенсация пространственного заряда в винтовых электронных пучках гиротронов / В. Н. Мануилов, В. Е. Семёнов // Известия вузов. Радиофизика. — 2016. — Т. 19, № 1. — С. 37–48.

94. Запевалов, В. Е. Низкочастотные гиротроны для термоядерных исследований / В. Е. Запевалов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2006. — Т. 49, № 3. — С. 207–218.

95. Manuilov, V. N. Gyrotron collector systems: types and capabilities / V. N. Manuilov [et al.] // Infrared Physics & Technology. — 2018. — Vol. 91. — P. 46–54.

96. Dumbrajs, O. Influence of reflections on mode competition in gyrotrons / O. Dumbrajs [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2000. — Vol. 28, no. 3. — P. 588–596.

97. Agusu, La. Detailed design of a CW 1 THz gyrotron (gyrotron FU CW III) using a 20 T superconducting magnet / La. Agusu [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 2007. — Vol. 28, no. 5. — P. 315–328.

98. Idehara, T. The first experiment of a THz gyrotron with pulse magnet / T. Idehara [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 2006. — Vol. 27, no. 3. — P. 319–331.

99. Глявин, М. Ю. Генератор импульсного магнитного поля для гироприборов терагерцового диапазона / М. Ю. Глявин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2011. — № 1. — С. 84–87.

100. Глявин, М. Ю. Экспериментальное исследование импульсного терагерцового гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности / М. Ю. Глявин [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2013. — Т. 56, № 8. — С. 550–561.

101. Завольский, Н. А. Оптимизация резонатора непрерывного гиротрона на второй гирогармонике с рабочей частотой 258 ГГц / Н. А. Завольский [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2009. — Т. 52, №5–6. — С 418–424.

102. Temkin, R. J. Development of terahertz gyrotrons for spectroscopy at MIT / R. J. Temkin // Terahertz Science and Technology. — 2014. — Vol. 7, no. 1. — P. 1–9.

103. Idehara, T. Development and Application of Gyrotrons at FIR UF / T. Idehara, S. P. Sabchevski // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2018. — Vol. 46, no. 7. — P. 2452–2459.

104. Гольденберг, А. Л. Мощный гиротрон на высоких модах связанных резонаторов с трансформацией мод / А. Л. Гольденберг [и др.] // Статья в сборнике научных трудов. Гиротроны. Под ред. В. А. Флягина. — Горький : ИПФ АН СССР, 1989. — С. 40–54.
105. Власов, С.Н. Аксиально-симметричные ступенчатые резонаторы / С.Н. Власов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2009. — Т. 52, № 9. — С. 716–729.
106. Melnikova, M. M. Electromagnetic modeling of a complex-cavity resonator for the 0.4-THz second-harmonic frequency-tunable gyrotron / M. M. Melnikova [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2017. — Vol. 64, no. 12. — P. 5141–5146.
107. Власов, С. Н. Гиротроны с эшелеттными резонаторами / С. Н. Власов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1996. — Т. 39, № 6. — С. 691–698.
108. Белоусов, В. И. Исследование гиротрона с эшелеттным резонатором / В. И. Белоусов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2014. — Т. 57, № 6 — С. 497–506.
109. Власов, С. Н. Открытые коаксиальные резонаторы для гиротронов / С. Н. Власов, Л. И. Загрядская, И. М. Орлова // Радиотехника и электроника. — 1976. — Т. 21, № 7. — С. 1485–1492.
110. Dumbrajs, O. Coaxial gyrotrons: past, present, and future (review) / O. Dumbrajs and G. S. Nusinovich // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2004. — Vol. 32, no. 3. — P. 934–946.
111. Глявин, М. Ю. Плавная широкополосная перестройка рабочей частоты гиротрона / М. Ю. Глявин [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2008. — Т. 51, № 1. — С. 63–70.
112. Shcherbinin, V. I. Improved mode selection in coaxial cavities for subterahertz second-harmonic gyrotron / V. I. Shcherbinin [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2020. — Vol. 67, no. 7. — P. 2933–2939.
113. Bandurkin, I. V. Simulations of sectioned cavity for high-harmonic gyrotron / I. V. Bandurkin [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2017. — Vol. 64, no. 1. — P. 300–305.
114. Bandurkin, I. V. Demonstration of a selective oversized cavity in a terahertz second-harmonic gyrotron / I. V. Bandurkin [et al.] // IEEE Electron Device Letters. — 2020. — Vol. 41, no. 9. — P. 1412–1415.
115. Sprangle, P. A. A classical electron cyclotron quasioptical maser / P. A. Sprangle, J. L. Vomvoridis, W. M. Manheimer // Applied Physics Letters. — 1981. — Vol. 38. — P. 310–313.
116. Fliflet, A.W. Review of quasi-optical gyrotron development / A. W. Fliflet [et al.] // Journal of Fusion Energy. — 1990. — Vol. 9, no. 1. — P. 31–58.
117. Nusinovich, G. S. To the theory of gyrotrons with confocal resonators / G. S. Nusinovich // Physics of Plasmas. — 2019. — Vol. 26, no. 5. — P. 053107.
118. Bandurkin, I. V. Mode selective azimuthally asymmetric cavity for terahertz gyrotrons /

I. V. Bandurkin [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2021. — Vol. 68, no. 1. — P. 347–352.

119. Данилов, Ю. Ю. Высокоселективные сверхразмерные щелевые резонаторы для релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона / Ю. Ю. Данилов [и др.] // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. — 2022. — Т. 504, № 1. — С. 3–9.

120. Jory, H. R. Charged-particle motion in large-amplitude electromagnetic fields / H. R. Jory, A. W. Trivelpiece // *Journal of Applied Physics*. — 1968. — Vol. 39, no. 7. — P. 3053–3060.

121. Harriet, S. B. Cusp gun TE/sub 21/ second-harmonic Ka-band gyro-TWT amplifier / S. B. Harriet [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2002. — Vol. 30, no. 3. — P. 909–914.

122. Idehara, T. Development of a high harmonic gyrotron with an axis-encircling electron beam and a permanent magnet / T. Idehara [et al.] // *Vacuum*. — 2005. — Vol. 77, no. 4. — P. 539–546.

123. Bratman, V. L. Design of a powerful and compact THz oscillator / V. L. Bratman [et al.] // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. — 2006. — Vol. 27, no. 8. — P. 1063–1071.

124. Братман, В. Л. Субтерагерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой / В. Л. Братман, Ю. К. Калынов, В. Н. Мануилов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2009. — Т. 52, № 7. — С. 525–535.

125. Bratman, V. L. Large-orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range / V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, V. N. Manuilov // *Physical Review Letters*. — 2009. — Vol. 102, no. 24. — P. 245101.

126. Kalynov, Yu. K. Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic / Yu. K. Kalynov [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2019. — Vol. 114, no. 21. — P. 213502.

127. Запевалов, В. Е. Многолучевые гиротроны / В. Е. Запевалов, Ш. Е. Цимринг // *Известия вузов. Радиофизика*. — 1990. — Т. 33, № 11. — С. 1288–1295.

128. Запевалов, В. Е. Мощный двухлучевой гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты / В. Е. Запевалов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 1994. — Т. 37, № 3. — С. 387–392.

129. Запевалов, В. Е. Мощные гиротроны на второй гармонике циклотронной частоты / В. Е. Запевалов, С. А. Малыгин, Ш. Е. Цимринг // *Известия вузов. Радиофизика*. — 1993. — Т. 36, № 6. — С. 543–551.

130. Liu, D. Experimental and theoretical investigations on coaxial gyrotron with two electron beams / D. Liu [et al.] // *Terahertz Science and Technology*. — 2015. — Vol. 8, no. 2. — P. 50–57.

131. Ginzburg, N. S. Improvement of stability of high cyclotron harmonic operation in the double-beam THz gyrotrons / N. S. Ginzburg [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2016. — Vol. 44, no. 8. — P 1303–1309.

132. Idehara, T. A novel THz-band double-beam gyrotron for high-field DNP-NMR spectroscopy / T. Idehara // *Review of Scientific Instruments*. — 2017. — Vol. 88, no. 9. — P. 094708.

133. Bandurkin, I. V. Double-beam gyrotron with frequency multiplication / I. V. Bandurkin [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2019. — Vol. 66, no. 5. — P. 2396–2400.

134. Ginzburg, N. S. A proposal to use reflection with delay for achieving the self-modulation and stochastic regimes in millimeter-wave gyrotrons / N. S. Ginzburg [et al.] // *Technical Physics Letters*. — 1998. — Vol. 24, no. 6. — P. 436–438.

135. Rozental R. M. Novel source of the chaotic microwave radiation based on the gyro-backward-wave oscillator / R. M. Rozental [et al.] // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. — 2006. — Vol. 54, no. 6. — P. 2741–2744.

136. Богдашов, А. А. Экспериментальное исследование влияния отражений от нерезонансной нагрузки на режимы генерации гиротрона / А. А. Богдашов [и др.] // *Электромагнитные волны и электронные системы*. — 2019. — № 2. — С. 42–49.

137. Глявин, М. Ю. Стабилизация частоты гиротрона слабой отражённой волной / М. Ю. Глявин [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2015. — Т. 58, № 9 — С. 747–758.

138. Зотова И. В. Режимы захвата и стабилизации частоты генерации в мощных гиротронах с низкодобротными резонаторами / И. В. Зотова [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 759–769.

139. Melnikova, M.M. Theoretical analysis of frequency stabilization and pulling effects in a gyrotron with delayed reflection / M. M. Melnikova, A. V. Tyshkun, N. M. Ryskin // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. — 2021. — Vol. 42 — P. 446–461.

140. Bykov, Yu. 28 GHz 10 kW gyrotron system for electron cyclotron resonance ion source / Yu. Bykov [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. — 2004. — Vol. 75, no. 5. — P. 1437–1438.

141. Bykov, Y. 24–84-GHz Gyrotron Systems for Technological Microwave Applications / Y. Bykov [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. — 2004. — Vol. 32, no. 1. — P. 67–72.

142. Vikharev, A. L. Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor / A. L. Vikharev [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2006. — Vol. 15, no. 4–8. — P. 502–507.

143. Denisov, G. G. A 45-GHz/20-kW Gyrotron-Based Microwave Setup for the Fourth-Generation ECR Ion Sources / G. G. Denisov [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2018. — Vol. 65, no. 9. — P. 3963–3969.

144. Братман, В. Л. К теории гиротронов с нефиксированной структурой высокочастотного поля / В. Л. Братман [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 1973. — Т. 16, № 4. — С. 622–630.
145. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; [перевод с англ.]. — 2-е изд., испр. — М. : Изд-во «НАУКА», 1973. — 720 с.
146. Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers / M. Thumm // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2020. — Vol. 41, no. 1. — P. 1–140.
147. Запевалов, В. Е. Дифракционная добротность слабokonических резонаторов гиротронов / В. Е. Запевалов, О. В. Малыгин // Известия вузов. Радиофизика. — 1983. — Т. 26, № 76. — С. 903–905.
148. Glyavin, M. Yu. A 250-Watts, 0.5-THz continuous-wave second-harmonic gyrotron / M. Yu. Glyavin [et al.] // IEEE Electron Device Letters. — 2021. — Vol. 42, no. 11. — P. 1666–1669.
149. Glyavin, M. Yu. Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media / M. Yu. Glyavin [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2015. — Vol. 86, no. 5. — P. 054705.
150. Глявин, М. Ю. Особенности оптимизации подсистем непрерывного гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц на основном циклотронном резонансе / М. Ю. Глявин [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 720–731.
151. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. — 2-е издание, перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1988. — 440 с.
152. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т. X. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под общ. ред. Л. П. Питаевского. — 2-е изд., испр. — М. : ФИЗМАЛИТ, 2002. — 536 с.
153. Бушминский, И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. Волноводы и волноводные устройства. / И. П. Бушминский. — М. : Высшая школа, 1974. — 304 с.
154. Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника / А. Д. Григорьев. — 2-е изд., доп. — СПб. : Издательство Лань, 2007. — 704 с.
155. Нусинович, Г. С. Теория гиротронов субмиллиметрового диапазона длин волн / Г. С. Нусинович, Т. Б. Панкратова // Статья в сборнике научных трудов. Гиротрон. Под ред. А. В. Гапонова-Грехова. — Горький : ИПФ АН СССР, 1981. — С. 169–184.
156. Моисеев, М. А. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне / М. А. Моисеев, Г. С. Нусинович // Известия вузов. Радиофизика. — 1974. — Т. 17, № 11. — С. 1709–1717.
157. Зарницина, И. Г. Об устойчивости одномодовых автоколебаний в гиромонотроне / И. Г. Зарницина, Г. С. Нусинович // Известия вузов. Радиофизика. — 1974. — Т. 17, № 12. —

С. 1858–1867.

158. Завольский, Н. А. Возможности оптимизации резонатора мощного непрерывного гиротрона / Н. А. Завольский [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2004. — Т. 47, № 8. — С. 675–687.

159. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. — 6-е изд., перераб. — Ленинград : Энергия, 1977. — 352 с.

160. Стандарт. ГОСТ 19880—74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. М. : Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР, 1974. 34 с.

161. Geist, T. Materials and machining processes for 140 GHz gyrotron resonators / T. Geist // Proceedings of 15th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. — 1990. — Vol. 1514. — P. 15142A.

162. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Липецкий. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.

163. Осинцев, О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение, 2016. — 360 с.

164. Serov, E. A. Reflectivity of metals in the millimeter wavelength range at cryogenic temperatures / E. A. Serov, V. V. Parshin, G. M. Bubnov // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2016. — Vol. 64, no. 11. — P. 3828–3838.

165. Jerby, E. Cyclotron-resonance-maser arrays / E. Jerby [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 1999. — Vol. 27, no. 2. — P. 445–455.

166. Palmer, R. B. The cluster klystron demonstration experiment / R. B. Palmer [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 1995. — Vol. 366, no. 1. — P. 1–16.

167. Борисов, Л. М. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ / Л. М. Борисов [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. — 1993. — № 1 (455). — С. 12–20.

168. Фрейдович, И. А. Перспективы развития многолучевых клистронов / И. А. Фрейдович [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — 2014. — № 1. — С. 25–31.

169. Запевалов, В. Е. Электронно-оптические системы двухлучевых гиротронов / В. Е. Запевалов, В. Н. Мануилов, Ш. Е. Цимринг // Известия вузов. Радиофизика. — 1991. — Т. 34, № 2. — С. 205–212.

170. Bott, I. B. A powerful source of millimetre wavelength electromagnetic radiation / I. B. Bott // Physics Letters. — 1965. — Vol. 14, no. 4 — P. 293–294.

171. Samsonov, S. V. Multitube helical-waveguide gyrotron traveling-wave amplifier: device concept and electron-optical system modeling / S. V. Samsonov, K. A. Leshcheva, V. N. Manuilov //

IEEE Transactions on Electron Devices. — 2020. — Vol. 67, no. 8. — P. 3385–3390.

172. Idehara, T. Study of electron beam misalignment in a submillimeter wave gyrotron / T. Idehara [et al.] // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. — 1998. — Vol. 19, no. 10. — P. 1303–1316.

173. Dumbrajs, O. Effect of electron beam misalignments on the gyrotron efficiency / O. Dumbrajs and G. S. Nusinovich. // Physics of Plasmas. — 2013. — Vol. 20, no. 7. — P. 073105.

174. Лыгин, В. К. Формирование винтовых электронных пучков / В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. — 1971. — № 6. — С. 59–71.

175. Manuilov, V. N. Electron-optical systems for planar gyrotrons / V. N. Manuilov [et al.] // Physics of Plasmas. — 2014. — Vol. 21, no. 2. — P. 023106.

176. Вилков, М. В. Магнетронно-инжекторная пушка с экстракцией отраженных электронов / М. В. Вилков [и др.] // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, № 14. — С. 80–85.

177. Kuftin, A. N. Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons / A. N. Kuftin [et al.] // International Journal of Electronics. — 1992. — Vol. 2, no. 5–6. — P. 1145–1151.

178. Завольский, Н. А. Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона / Н. А. Завольский [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 6. — С. 444–450.

179. Братман, В. Л. Электронно-оптическая система терагерцового гиротрона / В. Л. Братман, Ю. К. Калынов, В. Н. Мануилов // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 4. — С. 537–544.

180. Thankamony, A. S. L. Dynamic nuclear polarization for sensitivity enhancement in modern solid-state NMR / A. S. L. Thankamony [et al.] // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. — 2017. — Vol. 102–103. — P. 120–195.

181. Rosay, M. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR / M. Rosay, M. Blank, F. Engelke // Journal of Magnetic Resonance. — 2016. — Vol. 264. — P. 88–98.

182. Дюбуа, Б. Ч. Современные эффективные катоды (к истории их создания на ФГУП “НПП ИСТОК”) / Б. Ч. Дюбуа, А. Н. Королев // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. — 2011. — № 1 (508). — С. 5–24.

183. Лыгин, В. К. О диокотронной неустойчивости винтовых электронных пучков / В. К. Лыгин, Ш. Е. Цимринг, Б. И. Шевцов // Известия вузов. Радиофизика. — 1991. — Т. 34, № 4. — С. 419–425.

184. Завольский, Н. А. Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН / Н. А. Завольский [и др.] // Известия вузов. Прикладная нелинейная

динамика. — 2012. — Т. 20. № 3. — С. 70–80.

185. Братман, В. Л. Компактный источник ТГц-излучения для повышения чувствительности ядерного магнитного резонанса путем динамической поляризации ядер / В. Л. Братман [и др.] // Известия вузов. Серия Физическая. — 2018. — Т. 82, № 12. — С. 1760–1765.

186. Глявин, М. Ю. КПД гиротронов на второй гармонике гирочастоты с многоступенчатыми системами рекуперации остаточной энергии электронов / М. Ю. Глявин, В. Н. Мануилов, М. В. Морозкин // Журнал технической физики. — 2015. — Т. 85, № 5. — С. 127–130.

187. Запевалов, В. Е. Влияние послерезонаторного взаимодействия на КПД гиротрона / В.Е. Запевалов, М.А. Моисеев // Известия вузов. Радиофизика. — 2004. — Т. 47, № 7. — С. 584–592.

188. Богдашов, А. А. Система ввода-вывода излучения в десятицикловольтной гиротронной лампе бегущей волны W-диапазона со спирально-гофрированными волноводами / А. А. Богдашов, С. В. Самсонов // Известия вузов. Радиофизика. — 2022. — Т. 65, № 5. — С. 370–381.

189. Пат. 1096921 Великобритания, МПК H01j 25/00. Radiation Generators: 12348/63: заявл. 28.03.1963; опубл. 29.12.1967 / Bott I.V. 6 с.

190. Вилков, М. Н. Сценарии включения генератора ультракоротких импульсов на основе двух связанных винтовых гиро-ЛБВ, работающих в режимах усиления и нелинейного поглощения / М. Н. Вилков [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. — 2018. — Т. 81, № 1. — С. 61–66.

191. Бахвалов, Н. С. Численные методы: Учеб. пособие / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. — М.: Наука, 2008. — 636 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

A1. Завольский, Н. А. Анализ методов дискретной и плавной перестройки частоты в гиротронах для спектроскопии на примере генератора диапазона 0,2–0,27 ТГц / Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, А. С. Седов, Е. С. Семенов // Известия вузов. Радиофизика. — 2018. — Т. 61, № 6. — С. 494–504.

A2. Зуев, А. С. Оптимизация перестраиваемого в широком диапазоне частот субтерагерцового гиротрона высокой мощности при ограничениях, налагаемых магнитной системой / А. С. Зуев, В. Е. Запевалов, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Известия вузов. Радиофизика. — 2019. — Т. 62, № 4. — С. 309–318.

A3. Zuev, A. S. Realization of an octave frequency step-tuning of sub-terahertz gyrotron for advanced fusion research / A. S. Zuev, A. P. Fokin, A. A. Ananichev, E. S. Semenov, O. P. Plankin, A. N. Kuftin, V. E. Zapevalov, M. Yu. Glyavin // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. — 2021. — Vol. 42. — P. 1131–1141.

A4. Semenov, E. Methods for Simulation the Nonlinear Dynamics of Gyrotrons / E. Semenov, V. Zapevalov, A. Zuev // Communications in Computer and Information Science. — 2021. — Vol. 1413. — P. 49–62.

A5. Семенов, Е. С. Расчёт электродинамических характеристик и электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов на основе комплекса программ ANGEL / Е. С. Семенов, А. С. Зуев, А. П. Фокин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2022. — № 1 (25). — С. 35–47.

A6. Sedov, A. S. The project of W-band gyrotron at third cyclotron harmonic with an annular diaphragm / A. S. Sedov, A. S. Zuev, E. S. Semenov, A. A. Bogdashov, A. P. Fokin // Results in Physics. — 2018. — Vol. 11. — P. 158–161.

A7. Fokin, A. P. Experimental demonstration of the third cyclotron harmonic excitation in technological gyrotron with delayed selective feedback / A. P. Fokin, A. S. Sedov, A. S. Zuev // Review of Scientific Instruments. — 2020. — Vol. 91. — P. 024706.

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

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

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

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

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

Тезисы и другие публикации в трудах конференций

A13. Запевалов, В. Е. Субтерагерцовые многочастотные гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев // Труды Девятнадцатой научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2015. — С. 52–53.

A14. Завольский, Н. А. Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы / Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. С. Седов // Тезисы докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2016. — С. 131–132.

A15. Завольский, Н. А. Численное моделирование процессов в резонаторах субтерагерцовых многочастотных гиротронов для спектроскопии и диагностики плазмы / Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Седов, А. С. Зуев // Труды Двадцатой научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2016. — С. 60–61.

A16. Запевалов, В. Е. Проектирование электронно-оптических систем для субтерагерцовых многочастотных гиротронов / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Труды Двадцатой научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2016. — С. 62–63.

A17. Завольский, Н. А. Многочастотные субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы / Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. С. Седов // Сборник статей V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 2. — Санкт-Петербург, 2016. — С. 247–250.

A18. Запевалов, В. Е. Двухлучевые субтерагерцовые гиротроны для спектроскопии и диагностики плазмы / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев // Труды Двадцать первой научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2017. — С. 75–76.

A19. Глявин, М. Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование многолучевых гиротронов / М. Ю. Глявин, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, И. В. Зотова, В. Н. Мануилов, А. М. Малкин, А. С. Седов, А. С. Сергеев, А. П. Фокин // Материалы XVII международной

зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. — Саратов, 2018. — С. 31–32.

A20. Запевалов, В. Е. Многочастотные многолучевые и многоствольные гиротроны / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев // Труды Двадцать второй научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2018. — С. 103–105.

A21. Запевалов, В. Е. Применение многолучевых систем для разработки частотно перестраиваемых терагерцовых гиротронов / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. С. Седов, А. П. Фокин // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 2018. — С. 705–708.

A22. Glyavin, M. Yu. Development of middle-power W-band gyrotron in IAP RAS / M. Yu. Glyavin, M. D. Proyavin, A. S. Sedov, E. S. Semenov, A. S. Zuev, A. I. Tsvetkov // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — Japan, Toyama, 2018. — P. 1391–1394.

A23. Bogdashov, A. A. The third harmonic medium power W-band gyrotron for various applications / A. A. Bogdashov, A. P. Fokin, A. S. Sedov, A. S. Zuev // Book of abstracts of ALT'18. — Spain, Tarragona, 2018. — P. 170.

A24. Zuev, A. S. The project of third harmonic medium power W-band gyrotron / A. S. Zuev, A. P. Fokin, M. Y. Glyavin, R. M. Rozental, A. S. Sedov, E. S. Semenov // EPJ Web of Conferences — 2018. — Vol. 195. — P. 01024.

A25. Запевалов, В. Е. Секционирование активной среды для перестройки и повышения рабочей частоты гиротронов (многолучевые и многоствольные схемы) / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2019. — С. 19–20.

A26. Власов, С. Н. Исследование электронной перестройки частоты в гиротроне с эшелетным резонатором / С. Н. Власов, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин, Е. В. Копосова, А. Б. Павельев // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2019. — С. 67–68.

A27. Запевалов, В. Е. Уменьшение омических потерь в резонаторах субтерагерцовых гиротронов малой мощности / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, В. В. Паршин, Е. А. Серов // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2019. — С. 71–72.

A28. Запевалов, В. Е. Уменьшение доли омических потерь в резонаторах маломощных гиротронов субтерагерцового диапазона / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, В. В. Паршин, Е. А. Серов // Труды Двадцать третьей научной конференции по радиофизике. — Нижний Новгород, 2019. — С. 107–109.

A29. Власов, С. Н. Исследование частотно-перестраиваемых гиротронов с эшелетными

резонаторами / С. Н. Власов, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин, Е. В. Копосова, А. Б. Павельев // Труды научно-технической конференции «Мощные вакуумные СВЧ приборы-2019». — Москва, 2019. — С. 15.

A30. Запевалов, В. Е. Разработка многочастотного субтерагерцового гиротрона высокой мощности в условиях ограничений, налагаемых магнитной системой / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Труды научно-технической конференции «Мощные вакуумные СВЧ приборы-2019». — Москва, 2019. — С. 16.

A31. Запевалов, В. Е. Секционирование активной среды для перестройки и повышения рабочей частоты гиротронов (многолучевые и многоствольные схемы) / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин // Тезисы докладов 29-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2019. — С. 125.

A32. Власов, С. Н. Исследование электронной перестройки частоты в гиротроне с эшелеттным резонатором / С. Н. Власов, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, А. Н. Куфтин, Е. В. Копосова, А. Б. Павельев // Тезисы докладов 29-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2019. — С. 128.

A33. Семенов, Е. С. Самосогласованные модели электрон-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона / Е. С. Семенов, А. С. Зуев // Сборник материалов международной конференции «КРОМШ-2019». — Крым, Батилиман, 2019. — С. 275–278.

A34. Власов, С. Н. Проблемы и решения при численном моделировании и экспериментальном исследовании эшелеттных резонаторов для гиротронов / С. Н. Власов, Н. А. Завольский, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, Е. В. Копосова, А. Н. Куфтин, А. Б. Павельев, В. В. Паршин, Е. С. Семенов // Тезисы 30-ой Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2020. — С. 331–332.

A35. Зуев, А. С. Возбуждение рабочей моды на третьей циклотронной гармонике в гиротроне с обратной связью / А. С. Зуев, А. С. Седов, Е. С. Семенов, А. П. Фокин // Труды VII Всероссийской Микроволновой конференции. — Москва, 2020. — С. 106–110.

A36. Запевалов, В. Е. Анализ устойчивости работы терагерцовых гиротронов / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, Е. С. Семенов // Труды XX Международной конференции «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии». — Нижний Новгород, 2020. — С. 158–162.

A37. Fokin, A. Excitation of third cyclotron harmonics in a gyrotron with feedback / A. Fokin, A. Sedov, E. Semenov, A. Zuev // The 7th All-Russian Microwave Conference. — Moscow, 2020. — P. 87–90.

A38. Зуев, А. С. Анализ возможности широкополосной перестройки частоты в мощном

субтерагерцовом гиротроне / А. С. Зуев, А. П. Фокин, В. Е. Запевалов // Сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. — Санкт-Петербург, 2021. — С. 215–219.

A39. Parshin, V. V. Method to decrease ohmic losses in cavities of low-power terahertz gyrotrons / V. V. Parshin, E. S. Semenov, E. A. Serov, V. E. Zapevalov, A. S. Zuev // The 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). — China, Chengdu, 2021. — P. 1–2.

A40. Fokin, A. P. Possibilities to control the diffraction Q-factor in cavities of sub-terahertz gyrotrons / A. P. Fokin, M. Yu. Glyavin, A. S. Sedov, E. S. Semenov, A. S. Zuev // The 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). — China, Chengdu, 2021. — P. 1–2.

A41. Zuev, A. S. Frequency Tuning in a Powerful Gyrotron for Fusion / A. S. Zuev, A. P. Fokin, A. A. Ananichev, A. N. Kuftin, V. E. Zapevalov, M. Yu. Glyavin // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — China, Hangzhou, 2021. — P. 1605–1607.

A42. Zapevalov, V. E. New Gyrotron Concept: Multi-Barrel Gyrotron / V. E. Zapevalov, A. S. Zuev, O. P. Plankin, E. S. Semenov // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). — China, Hangzhou, 2021. — P. 1527–1530.

A43. Семенов, Е. С. Метод поперечных сечений для расчёта трансформации мод в сверхразмерных нерегулярных волноводах / Е. С. Семенов, А. С. Зуев // Труды XXI Международной конференции и молодежной школы «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии». — Нижний Новгород, 2021. — С. 304–308.

A44. Зайцева, И. Е. Возможности реализации широкополосной плавной перестройки частоты в гиротронах с конусообразными резонаторами / И. Е. Зайцева, В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, С. В. Колосов, Е. С. Семенов // Тезисы докладов XII всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2022. — С. 63.

A45. Запевалов, В. Е. Перспективы использования многоствольного гиротрона для освоения терагерцового диапазона / В. Е. Запевалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Тезисы докладов XII всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2022. — С. 31–32.

A46. Зуев, А. С. Реализация дискретной перестройки частоты в диапазоне 133–250 ГГц в мощном гиротроне для перспективных плазменных приложений / А. С. Зуев, А. П. Фокин, А. А. Ананичев, Е. С. Семенов, О. П. Планкин, А. Н. Куфтин, В. Е. Запевалов, М. Ю. Глявин // Тезисы докладов XII всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2022. — С. 43–44.

A47. Зуев, А. С. Анализ специфики терагерцовых гиротронов с выводом излучения в

сторону катода / А. С. Зуев, М. И. Петелин, А. С. Седов, Е. С. Семенов // Тезисы докладов XII всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2022. — С. 61–62.

A48. Семенов, Е. С. Численное моделирование электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов на основе комплекса программ ANGEL / Е. С. Семенов, А. С. Зуев, А. П. Фокин // Тезисы XXVII Байкальской Всероссийской конференции с международным участием. Иркутск, 2022. — С. 60–61.

A49. Зуев, А. С. Экспериментальное исследование широкополосной перестройки частоты в мощном субтерагерцовом гиротроне / А. С. Зуев, А. П. Фокин, А. А. Ананичев, Е. С. Семенов, А. Н. Куфтин, А. В. Чирков, В. Е. Запечалов, М. Ю. Глявин // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 2022. — С. 235–238.

A50. Зуев, А. С. Оценка перспектив широкополосной перестройки частоты в гиротронах на гармониках / А. С. Зуев, А. П. Фокин, Е. С. Семенов // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 2022. — С. 444–446.

A51. Запечалов, В. Е. Многоствольный гиротрон для ДПЯ/ЯМР спектроскопии высокого разрешения / В. Е. Запечалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 2022. — С. 193–196.

A52. Fokin, A. P. Prospects of wideband frequency tuning in multi-beam sub-THz gyrotrons / A. P. Fokin, A. S. Zuev, A. S. Sedov, E. S. Semenov, V. E. Zapevalov, M. Yu. Glyavin // Abstract book. The 5-th International Conference «Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications» (TERA-2023). — Moscow, 2023. — P. 65–66.

A53. Запечалов, В. Е. Оптимизация многоствольного гиротрона терагерцового диапазона / В. Е. Запечалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 2023. — С. 277–281.

A54. Запечалов, В. Е. Проект многоствольного гиротрона терагерцового диапазона для ДПЯ/ЯМР спектроскопии / В. Е. Запечалов, А. С. Зуев, О. П. Планкин, Е. С. Семенов // Тезисы докладов 33-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2023. — С. 161–162.

A55. Запечалов, В. Е. Мощный гиротрон со ступенчатой перестройкой частоты в диапазоне 133–250 ГГц / В. Е. Запечалов, А. С. Зуев, А. П. Фокин, А. А. Ананичев, Е. С. Семенов, О. П. Планкин, А. Н. Куфтин, М. Ю. Глявин // Тезисы докладов 33-й

Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, 2023. — С. 173–174.

Патенты

A56. Запевалов Владимир Евгеньевич, Зуев Андрей Сергеевич. Многоствольный гиротрон. – Россия. – Патент 2755826. – 22.09.2021. – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН) (RU).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчётные модели, используемые для описания электронно-волнового взаимодействия в гиротроне

Для описания электронно-волнового взаимодействия на интервале $[z_{in}, z_{out}]$ использовались стационарные одномодовые самосогласованные уравнения поля и движения электронов [60, 61, А4, А5]. Электроны в пучке представлены фракциями: N_θ начальных фаз влёта (относительно поля), N_V групп с различными осцилляторными скоростями v_\perp (но с постоянной начальной энергией пучка). Статическое магнитное поле может иметь неоднородное распределение $B(z)$. Совместно решались $N_\theta \times N_V$ пар уравнений движения электронов

$$\begin{aligned} \frac{dp_c}{dz} + i \frac{p_c}{p_\parallel} \left(\frac{\kappa}{n} \gamma - \frac{\omega_{Ho}}{c} \right) &= \kappa_\perp J_{m-n}(\kappa_\perp R_0) \left(\frac{i\gamma F}{p_\parallel} \right) (p_c^*)^{n-1} \cdot \left(\frac{J_{n-1}(\xi)}{2p_\perp^{n-1}} \right) + \frac{p_c}{2B} \frac{dB}{dz}, \\ \frac{dp_\parallel}{dz} &= - \frac{p_\perp^2}{p_\parallel \cdot 2B} \frac{dB}{dz} \end{aligned} \quad (\text{П1})$$

и уравнение для продольной структуры поля, согласованного с электронным пучком

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + \kappa_\parallel^2 F = I \kappa \kappa_\perp \left[J_{m-n}(\kappa_\perp R_0) \cdot \frac{p_c^n}{p_\parallel} \cdot \left(\frac{J'_n(\xi)}{p_\perp^{n-1}} \right) \right] \quad (\text{П2})$$

с начальными условиями

$$F(z_{in}) = F_{in}, \quad p_c(z_{in}) = p_{\perp, in} \cdot e^{\frac{i\theta_0}{n}}, \quad p_\parallel(z_{in}) = p_{\parallel, in} \quad (\text{П3})$$

и граничными условиями излучения

$$\frac{dF}{dz} = i\kappa_\parallel F, \quad z = z_{in}; \quad \frac{dF}{dz} = -i\kappa_\parallel F, \quad z = z_{out}. \quad (\text{П4})$$

Здесь используются следующие обозначения: $p_\perp = \gamma \frac{v_\perp}{c}$, $p_\parallel = \gamma \frac{v_\parallel}{c}$ — нормированные поперечный и продольный импульсы электронов в винтовом пучке, $\gamma(z)$ — Лоренц-фактор, $\gamma_0 = \gamma(z_{in})$, $\gamma = 1 + e_0 U_0 / m_0 c^2$, U_0 — ускоряющее напряжение, $\omega_{Ho} = e_0 B / m_0$ — нерелятивистская гирочастота, J_m — функция Бесселя, $\xi = p_\perp \cdot \omega_{co} / \omega_{Ho}$, $\omega_{co}(z) = c \kappa_\perp$, $R_r(z)$ — текущий радиус резонатора, R_0 — средний радиус ведущих центров электронных орбит, $B(z)$ — внешнее неоднородное магнитное поле. Продольное волновое число κ_\parallel с учётом омических потерь имеет вид

$$\kappa_\parallel^2(z) = \kappa^2 - \kappa_\perp^2(z) \cdot \Omega(z), \quad \Omega(z) = (1 + i/Q_{ohm}), \quad (\text{П5})$$

где $\kappa = \omega/c$ — волновое число, $\kappa_\perp(z) = v_{mp} / R_r(z)$ — поперечное волновое число в поперечном сечении z , собственные числа v_{mp} определяются граничным условием на стенке резонатора ($J'_m(v_{mp}) = 0$); комплексный множитель $\Omega(z)$ позволяет учесть потери энергии на нагрев резонатора. Омическая добротность Q_{ohm} оценивается по формуле

$$Q_{ohm} = \frac{R_r}{k_{skin} \cdot \delta_{skin}} \left(1 - \frac{m^2}{v_{mp}^2} \right), \quad (\text{П6})$$

где δ_{skin} – толщина скин-слоя гладкого металла (без шероховатостей), k_{skin} — коэффициент потерь, учитывающий влияние микронеровностей на поверхности резонатора. Скобки [...] в уравнении (П2) означают усреднение по всем $N_\theta \times N_V$ фракциям пучка с учётом соответствующих функций распределения. Нормированный ток I определён выражением

$$I = \frac{8 e_0}{c m_0} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_b(A)}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}, \quad (\text{П7})$$

где I_b — ток пучка в амперах

Собственными значениями задачи (П1)–(П4) являются частота ω и нормированная амплитуда поля F_{in} при $z = z_{in}$. Поиск пары (ω, F_{in}) , удовлетворяющей граничному условию (П4) при $z = z_{out}$, выполнялся двумерным методом Ньютона [5]. Система уравнений движения и поля интегрируются методом Рунге-Кутты 4-го порядка. При этом электронный и волновой КПД гиротрона определяется по формулам:

$$\eta_{el} = \frac{\gamma_0 - \llbracket \gamma \rrbracket}{\gamma_0 - 1}, \quad z \in [z_{in}, z_{out}]; \quad (\text{П8})$$

$$\eta_{out} = -Im \left\{ F^* \frac{dF}{dz} \right\} \cdot \frac{1}{\kappa I (\gamma_0 - 1)}, \quad z \in [z_{in}, z_{out}]. \quad (\text{П9})$$

Самосогласованные уравнения для стартовых токов с учётом нефиксированной структуры поля получены путем линеаризации усреднённых уравнений (П1)–(П4) в приближении малой амплитуды. При определении стартового тока совместно решались N_V троек уравнений движения электронов

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_x}{dz} + i \left(\frac{\kappa}{n} \gamma_0 - \frac{\omega_{Ho}}{c} \right) \frac{n\Psi_x - \Psi_z}{p_{\parallel}} + i\kappa \frac{p_{\perp}^2 \Psi_x + \Psi_y + 2p_{\parallel}^2 \Psi_z}{2n\gamma_0 p_{\parallel}} = \\ = \kappa_{\perp} J_{m-n}(k_{\perp} R_0) \left(\frac{i\gamma F}{p_{\parallel}^2} \right) p_{\perp}^{2n-2} \cdot \left(\frac{J_{n-1}(\xi)}{2p_{\perp}^{n-1}} \right) + \left(n + \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel}^2} \right) \frac{\Psi_x}{2B} \frac{dB}{dz}, \\ \frac{d\Psi_y}{dz} + i \left(\frac{\kappa}{n} \gamma_0 - \frac{\omega_{Ho}}{c} \right) \frac{n\Psi_y + p_{\perp}^2 \Psi_z}{p_{\parallel}} - i\kappa \frac{p_{\perp}^2 \Psi_x + \Psi_y + 2p_{\parallel}^2 \Psi_z}{2n\gamma_0 p_{\parallel}} p_{\perp}^2 = \\ = \left(n + 2 + \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel}^2} \right) \frac{\Psi_y}{2B} \frac{dB}{dz}, \\ \frac{d\Psi_z}{dz} + i \left(\frac{\kappa}{n} \gamma_0 - \frac{\omega_{Ho}}{c} \right) \frac{n\Psi_z}{p_{\parallel}} = \left\{ \left(n + 3 \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel}^2} \right) \Psi_z - \frac{p_{\perp}^2 \Psi_x + \Psi_y}{p_{\parallel}^2} \right\} \frac{1}{2B} \frac{dB}{dz} \end{aligned} \quad (\text{П10})$$

и уравнение для продольной структуры поля, согласованного с электронным пучком

$$\frac{d^2 F}{dz^2} + \kappa_{\parallel}^2 F = I \kappa \kappa_{\perp} \left[J_{m-n}(\kappa_{\perp} R_0) \left\{ \left(\frac{J'_n(\xi)}{p_{\perp}^{n-1}} \right) \cdot (n \Psi_x - \Psi_z) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\left(\frac{J''_n(\xi) \xi}{2 p_{\perp}^{n+1}} \right) - (n-1) \left(\frac{J'_n(\xi)}{2 p_{\perp}^{n+1}} \right) \right) \cdot (p_{\perp}^2 \Psi_x + \Psi_y) \right\} \right] \quad (\text{П11})$$

с начальными условиями

$$F(z_{in}) = 1, \quad \Psi_x(z_{in}) = 0, \quad \Psi_y(z_{in}) = 0, \quad \Psi_z(z_{in}) = 0 \quad (\text{П12})$$

и граничными условиями излучения (П4). При этом использовались следующие обозначения:

$$\Psi_x = \frac{\langle p_c^{n-1} \cdot \delta p_c \rangle_{\theta_0}}{p_{\parallel}}, \quad \Psi_y = \frac{\langle p_c^{n+1} \cdot \delta p_c^* \rangle_{\theta_0}}{p_{\parallel}}, \quad \Psi_z = \frac{\langle p_c^n \cdot \delta p_{\parallel} \rangle_{\theta_0}}{p_{\parallel}^2}. \quad (\text{П13})$$

Здесь скобки $\langle \dots \rangle_{\theta_0}$ означают усреднение импульсов электронов по фазе влёта θ_0 , скобки $[\dots]$ — усреднение по N_V фракциям пучка. Нормированный ток I определён выражением

$$I = \frac{8 e_0}{c m_0} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_{st}(A)}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}. \quad (\text{П14})$$

Поперечная $p_{c,tot}$ и продольная $p_{\parallel,tot}$ компоненты импульса разделены на две части: основные части, зависящие лишь от неоднородного статического магнитного поля (p_c , p_{\parallel}), и малые поправки (δp_c , δp_{\parallel}), получаемые частицами при взаимодействии с СВЧ полем:

$$p_{c,tot}(z) = p_c(z) + \delta p_c(z), \quad |\delta p_c| \ll |p_c| \forall z, \quad \delta p_c(z_{in}) = 0, \\ p_{\parallel,tot}(z) = p_{\parallel}(z) + \delta p_{\parallel}(z), \quad |\delta p_{\parallel}| \ll |p_{\parallel}| \forall z, \quad \delta p_{\parallel}(z_{in}) = 0. \quad (\text{П15})$$

Распределение поперечной $p_{\perp}(z) \equiv |p_c(z)|$ и продольной компонент импульса вдоль оси находится из системы ОДУ для каждой скоростной и энергетической фракции:

$$\begin{cases} \frac{dp_{\perp}}{dz} = \frac{p_{\perp}}{2B} \frac{dB}{dz}, \\ \frac{dp_{\parallel}}{dz} = -\frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel} \cdot 2B} \frac{dB}{dz}. \end{cases} \quad (\text{П16})$$

с начальными импульсами $p_{\perp,in} = p_0 g_0 / \sqrt{1 + g_0^2}$, $p_{\parallel}(z_{in}) = \sqrt{\gamma_0^2 - 1 - p_{\perp,in}^2}$, $p_0 = \sqrt{\gamma_0^2 - 1}$, где $g_0 = v_{\perp}/v_{\parallel}$ — питч-фактор электронной фракции.

Поиск пары (ω, I_{st}) , удовлетворяющей граничному условию (П4) при $z = z_{out}$ выполнялся двумерным методом Ньютона [191]. Система уравнений движения и поля интегрируются методом Рунге—Кутты 4-го порядка. Уравнения приведены в системе единиц СИ.