

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

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Новые схемы гироприборов терагерцового частотного диапазона»**

**Аспирант:** Ошарин Иван Владимирович

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Савилов Андрей Владимирович, д. ф.-м. н.,  
доцент, зав. лаб. 112 ИПФ РАН

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.03 Радиофизика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2018

## Оглавление

Актуальность темы.....	3
Цели диссертации.....	4
Научная новизна.....	5
Практическая значимость .....	5
Положения, выносимые на защиту:.....	5
Апробация результатов работы .....	6
Личный вклад автора в проведенные исследования.....	7
Структура и объем диссертации.....	7
Краткое содержание диссертации .....	7
Список трудов автора по теме диссертации.....	14

### **Актуальность темы**

Одним из важных направлений развития современной прикладной физики является создание и активное продвижение источников когерентного электромагнитного излучения, работающих на относительно высоких уровнях мощности в субтерагерцовом и терагерцовом частотных диапазонах. Это вызвано потребностями в таких источниках в ряде важных и перспективных фундаментальных и практических приложений. Тут можно упомянуть использование таких источников, например, во всевозможных спектроскопических, биохимических и биофизических приложениях (в частности, динамическая поляризация ядерных спинов в спектроскопии ядерного магнитного резонанса), в установках термоядерного синтеза для нагрева и диагностики плазмы, диагностика различных сред, в современных ускорительных приложениях и т.д..

Большинство таких приложений требует не только повышения частоты излучения, но и увеличения выходной мощности создаваемых источников. В настоящее время наиболее доступными для потребителей источниками субтерагерцового и терагерцового частотного диапазона являются главным образом низковольтные лампы обратной волны и твердотельные источники (диоды Ганна и квантовые каскадные лазеры) с мощностью от микроватт до нескольких десятков милливатт. На другом «полюсе» (с точки зрения доступности потребителю) находятся терагерцовые лазеры на свободных электронах, которые демонстрируют очень высокую импульсную мощность и возможность широкополосной частотной перестройки. В то же время, эти генераторы основаны на использовании электронных пучков с очень высокой энергией электронов (2-12 МэВ), для чего необходимы большие и дорогостоящие ускорители.

С точки зрения сочетания компактности и доступности потребителю (с одной стороны) и высоких КПД и мощности выходного излучения (с другой стороны) во многих случаях наиболее перспективным вариантом являются гиротроны – разновидность мазеров на циклотронном резонансе, основанная на возбуждении квазикритических мод открытых резонаторов винтовыми электронными пучками. Главные достоинства гиротрона обусловлены именно использованием квазикритических волн в качестве рабочих волн этого генератора. Это обеспечивает высокую эффективность электронно-волнового взаимодействия электронов с такими волнами, а также слабую чувствительность гиротрона к скоростному разбросу частиц в пучке. Кроме того, высокая дифракционная добротность таких волн даже в открытых резонаторах без каких-либо дополнительных элементов обратной связи обеспечивает селективность возбуждения таких волн.

При определенных обстоятельствах перечисленные выше достоинства могут становиться недостатками. В гиротронах с относительно слабым электронно-волновым взаимодействием (что может быть обусловлено как относительно низкими уровнями мощности и тока рабочего электронного пучка, так и работой на высокой гармонике циклотронной частоты) для старта рабочих колебаний приходится использовать резонаторы с протяженными (десятки длин волн) резонаторами. В таких системах дифракционная добротность рабочих волн может существенно превышать их омическую добротность. Это приводит к тому, что большая часть излучения, вырабатываемого электронным пучком, поглощается в стенках резонатора. Попытка же перейти к работе на относительно далеких от отсечки продольных модах, обладающих пониженными дифракционными добротностями, приводит, как правило, к существенному снижению эффективности гиротрона.

Высокая селективность возбуждения квазикритической волны приводит к трудности обеспечения частотной подстройки гиротрона даже в относительно узкой полосе. Кроме того, при переходе к работе на высоких гармониках циклотронной частоты сопутствующее этому переходу ослабление электронно-волнового взаимодействия (сопровождающееся, как правило, необходимостью удлинения рабочего резонатора) приводит к проблеме селективности возбуждения высоких гармоник и, соответственно, подавления паразитных колебаний, возбуждающихся на низких гармониках.

Настоящая работа направлена на исследование новых схем гиротронов, которые разрабатываются с целью решения описанных выше проблем.

### **Цели диссертации**

1. Изучение особенностей процессов электронно-волнового взаимодействия в субтерагерцовых гиротронах с относительно слабым электронно-волновым взаимодействием (низкие рабочие токи, работа на высоких гармониках циклотронной частоты. Исследование новых схем гиротронов как путь повышения электронного и выходного КПД в таких гиротронах.
2. Исследование новых схем гиротронов с повышенной селективностью возбуждения высоких циклотронных гармоник.
3. Исследование особенностей электронно-волнового взаимодействия в маломощных коротковолновых гиротронах с низкими унергиями рабочих электронов.
4. Разработка численного кода, моделирующего пространственно-временную динамику возбуждения гиротронов. Разработка и расчет экспериментальных макетов гиротронов

терагерцового частотного диапазона, включая гиротроны со сложными микроволновыми системами.

### **Научная новизна**

1. Предложена и исследована схема гиротрона с секционированным резонатором с фазовыми корректорами, обеспечивающая эффективное гиротронное возбуждение относительно далеких от отсечки продольных мод.
2. Предложены и исследованы гиротронные резонаторы с короткими селектирующими элементами, обеспечивающими повышенную селективность возбуждения высоких циклотронных гармоник.
3. Выявлены особенности частотной перестройки в различных схемах гиротронов с низкими ускоряющими напряжениями рабочих электронных пучков.
4. Разработан и рассчитан ряд экспериментальных макетов терагерцовых гиротронов со сложными микроволновыми системами.

**Практическая значимость** работы обусловлена ее направленностью на создание субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов с относительно высокими уровнями мощности, включая гиротроны, работающие на высоких гармониках циклотронной частоты. Применение предложенных в данной работе методов и подходов позволит создать новые приборы с уникальными характеристиками.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование схемы гиротрона с секционированным резонатором с фазовыми корректорами обеспечивает устойчивое селективное возбуждение относительно далеких от отсечки продольных мод в высокоэффективном гиротронном режиме. Такой подход может быть перспективен для использования в гиротронах с относительно слабым электронно-волновым взаимодействием (и. как следствие, с протяженными резонаторами) как метод снижения дифракционной добротности рабочей моды и, соответственно, повышения эффективности генератора за счет снижения доли омических потерь.
2. Использование коротких селектирующих элементов в гиротронных резонаторах открывает возможность селективного возбуждения на высоких циклотронных гармониках пространственно развитых поперечных мод.

3. В коротковолновых гиротронах с протяженными резонаторами возбуждения высоких циклотронных гармоник селективность может быть существенно увеличена за счет использования двухпучковой системы в определенной ее конфигурации, а именно – два раскачанных электронных пучка со слегка разными энергиями частиц.
4. В гиротронах с низкими ускоряющими напряжениями рабочих электронных пучков возбуждение высоких продольных мод в режиме «Лампа бегущей волны» (т.е. когда электроны взаимодействуют с попутной бегущей компонентой стоячей резонаторной волны) может быть путем достижения режимов стабильной генерации с высоким КПД, существенно превышающим КПД в гиротронном режиме.
5. В низковольтных гиротронах с выводом излучения в сторону катодного конца возможна эффективная (без резких скачков выходной мощности в зависимости от величины рабочего магнитного поля) работа на высоких продольных модах в режиме лампы обратной волны, что является привлекательным с точки зрения реализации частотно-перестраиваемых источников на основе гиросприборов средней мощности.

#### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах [A1 – A25] и докладывались на 40-42-й Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Гонконг, Китай, 2015; Копенгаген, Дания, 2016; Канкун, Мексика, 2017), 18-й Международной конференции по вакуумной электронике (Лондон, Великобритания, 2017), 32-й Генеральной ассамблее Международного Радиофизического Союза (Монреаль, Канада, 2017), совместном Российско-Германском семинаре по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Нижний Новгород, 2016), 26-27-й Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2016, 2017), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород, 2017), 10-м Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2016), 15-й и 17-й Всероссийских школах-семинарах «Физика и применение микроволн» (Можайск, 2015, 2017), 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2018).

## **Личный вклад автора в проведенные исследования**

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A25] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электронно-волнового взаимодействия в гиротронных резонаторах различных конфигураций, построении теоретических моделей гиротронов со сложными электродинамическими системами, численном моделировании процессов электронно-волнового взаимодействия и режимов генерации. На основе оригинальных численных кодов, написанных автором, был спроектирован и рассчитан ряд экспериментальных макетов терагерцовых гиротронов со сложными микроволновыми системами. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

## **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка трудов по диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 136 страниц, включая 59 иллюстраций, 3 таблицы и список литературы из 104 наименований. Список публикаций автора по теме работы содержит 25 наименований.

## **Краткое содержание диссертации**

**Глава I** посвящена исследованию новых методов понижению дифракционной добротности протяженных резонаторов гиротронов на высоких гармониках, работающих в терагерцовом частотном диапазоне. В таких гиротронах для обеспечения старта возбуждения на более высокой циклотронной гармонике требуется увеличение длины рабочего резонатора. Это влечет за собой проблему роста дифракционной добротности рабочей моды и, соответственно, роста омических потерь в стенках резонатора. Основой описанных в первой главе подходов, направленных на решение данной проблемы, является использование гиротронных резонаторов секционированного типа, в которых обеспечивается пониженная дифракционная добротность гиротронной волны.

В *разделе 1.1* приведены основные уравнения, на основе которых были разработаны численные коды для исследования нестационарной пространственно-временной динамики возбуждения и установившихся режимов гиротронов.

В *подразделе 1.1.1* приведенная система уравнений гиротрона, в которых учтены различные конфигурации рабочего электронного пучка (приосевой пучок, традиционный для большинства гиротронов трубчатый пучок с произвольным радиусом ведущих центров, многопучковая система), произвольные скоростной и позиционный разбросы частиц, взаимодействие частиц со всеми компонентами поля волны, а также с учетом искажений «холодной» структуры свч поля вследствие электронно-волнового взаимодействия, неоднородность рабочего магнитостатического поля в резонаторе, послерезонаторное электронно-волновое взаимодействие.

В *подразделе 1.2* дается система, основанная на универсальных асимптотических уравнениях движения электронов (фактически, уравнений маятника). Такой подход является достаточно точным лишь для гиротронов на высоких гармониках с протяженными резонаторами, в которых КПД электронно-волнового взаимодействия невелик, а влияние т.н. «силового» члена на группировку частиц в воле волны мало. В то же время, универсальность таких уравнений делает их удобными для общего анализа ряда задач.

*Раздел 1.2* посвящен исследованию достаточно простого и технологичного метода снижения дифракционной добротности рабочей гиротронной волны, основанного на использовании резонатора с периодической системой фазовых корректоров, представляющих собой расширение радиуса резонатора. Физический механизм работы таких нерегулярностей описан в *подразделе 1.2.1*. Параметры каждого фазового корректора (ширина и увеличение радиуса) подбираются так, чтобы обеспечить набег фазы  $\delta\phi \approx \pi$  для квазикритических волн. Такая нерегулярность эквивалентна смене знака амплитуды волны в месте расположения фазового корректора. В таком секционированном резонаторе гиротронный режим электронно-волнового взаимодействия реализуется не для низшей аксиальной моды, а для моды с более высоким аксиальным индексом, который совпадает с числом секций резонатора. Такая моды имеет существенно меньшую дифракционную добротность по сравнению с низшей продольной модой регулярного резонатора.

Качественное исследование гиротронного возбуждения высоких продольных мод в квазирегулярных резонаторах на основе асимптотических уравнений движения электронов приведено в *подразделе 1.2.2*. Асимптотические уравнения достаточно корректны для гиротронов с протяженными резонаторами, работающих на высоких циклотронных гармониках, с относительно низким КПД. В нелинейном моделировании были использованы уравнения движения с пространственно-временным уравнением для волны. Моделирование



было проведено для гиротрона с параметрами, близкими к параметрам экспериментально реализованного терагерцового слаборелятивистского (80 кВ, 0.7 А) гиротрона с большой орбитой, работающего на третьей циклотронной гармонике на относительно высокой поперечной моде  $TE_{3,7}$ . Моделирование показало, что использование рабочих волн с пониженной дифракционной добротностью позволяет значительно увеличить выходной КПД в силу заметного снижения доли омических потерь. Так, эта доля падает с 85-90% в регулярной системе до 20% в секционированном резонаторе при возбуждении аксиальной моды с пятью вариациями в гиротронном режиме.

В *подразделе 1.2.3* исследуется возможность использования секционированных резонаторов с фазовыми корректорами в гиротронах экспериментального стенда «МЦАР» ИПФ РАН: слаборелятивистских непрерывного и импульсного гиротронов с большой орбитой (ГБО). Для импульсного ГБО показано, что использование секционированных систем слегка уменьшает электронный КПД (с 10% до 7.5%), однако выходная мощность увеличивается из-за понижения дифракционной добротности возбуждаемых волн и, следовательно, снижения омических потерь. Кроме того, описанный подход к проблеме снижения дифракционной добротности был использован для проектирования непрерывного маломощного (30 кВ / 0.7 А) гиротрона на частоте 0.5 ТГц. Для этой установки были спроектированы и детально промоделированы трех- и пятисекционный резонаторы (в зависимости от итоговых параметров рабочего электронного пучка) с значительно меньшей дифракционной добротностью. В ходе моделирования было показано, что схема с коррекцией фазы обеспечивает трехкратный выигрыш в выходной мощности по сравнению с традиционной схемой. Кроме того, расчеты предсказывают очень низкую чувствительность генерации к ошибкам изготовления фазовых корректоров.

*Раздел 1.3* посвящен еще одному возможному методу реализации гиротрона с протяженным пространством электронно-волнового взаимодействия и одновременно низкой дифракционной добротностью. Данный метод основан на использовании секционированной системы с клистронным характером электронно-волнового взаимодействия. Такой резонатор состоит из трех секций. Рабочая волна близка к отсечке во входной и в выходной секциях системы. Промежуточная секция, в которой рабочая волна далека от отсечки, обеспечивает СВЧ связь между входной и выходной секциями, а также обеспечивает группировку частиц. Дифракционная и омическая добротности в такой схеме определяются в основном комбинированной длиной входного и выходного резонаторов, тогда как стартовый ток определяется общей длиной системы.

Реализация секционированной системы клистронного типа требует анализа проблемы селективности продольных мод. В *подразделе 1.3.1* проанализированы спектр и добротности

собственных мод секционированного резонатора клистронного типа. Теоретически показано, что омическая и дифракционная добротности секционированной системы практически не зависят от длины дрейфовой секции и приблизительно совпадают с добротностями регулярного резонатора. Это подразумевает, что проблема конкуренции продольных мод в секционированной системе близка аналогичной проблеме для регулярного резонатора гиротрона. Следовательно, если превышение рабочего тока над стартовым не слишком велико, тогда моды с высокими продольными индексами, не возбуждаются.

В *подразделе 1.3.2.* приведен вариант резонатора клистронного типа, предложенный в ходе разработки непрерывного маломощного ГБО. Моделирование такой конфигурации показало, что в маломощном (30 кВ / 0.5 А) гиротроне с реалистичным питч-фактором электронов 1.5 и приосевым электронным пучком выходная мощность излучения может составлять 65 Вт на частоте 527 ГГц.

**Глава II** посвящена исследованию методов повышения селективности возбуждения рабочей циклотронной гармонике, основанных на использовании квазирегулярных резонаторов с фазовыми корректорами, а также двухпучковой схемы. Поскольку наиболее доступные криомагниты способны обеспечить поля с интенсивностями на уровне 10–15 Тл, что в диапазоне частот, для гиротронов терагерцового частотного диапазона переход к работе на высоких циклотронных гармониках практически неизбежен. Однако при этом остро стоит проблема подавления паразитных мод, возбуждаемых на основном циклотронном резонансе.

В *разделе II.1* приведен достаточно простой метод подавления паразитной генерации на первой циклотронной гармонике, основанный на использовании резонатора с одной или несколькими неоднородностями (фазовыми корректорами). Принцип работы таких фазовых корректоров изложен в *подразделе II.1.1.* Параметры каждой такой неоднородности (величина расширения радиуса резонатора и ее длина) подбираются таким образом, чтобы обеспечить на такой неоднородности набег фазы, близкий к  $\pi$ , для квазикритических волн с частотой, близкой с циклотронной частоте электронов рабочего пучка гиротрона. Это приводит к существенному ухудшению электронно-волнового взаимодействия на основном циклотронном резонансе. Действительно, скачок фазы соответствует резкому переходу электронного сгустка, сформированному резонансным полем возбуждаемой электромагнитной волны, из тормозящей фазы в ускоряющую, что приводит к «смене знака» электронно-волнового взаимодействия, то есть переходу от излучения волны к ее поглощению. В то же время для волн на удвоенной частоте (соответствующей генерации на второй циклотронной гармонике) та же самая неоднородность обеспечивает вдвое больший набег фазы (т. е. близкий к  $2\pi$ ), что в первом

приближении соответствует отсутствию влияния таких неоднородностей на эффективность возбуждения рабочей волны на второй гармонике.

В *подразделе II.1.2* описана модель, на основе которой проведен анализ конкуренции двух разночастотных волн, возбуждаемых на разных циклотронных гармониках. Фактически, эта она представляет собой обобщение описанной в разделе I.1.2 модель самосогласованной модели с универсальными асимптотическими уравнениями движения на случай взаимодействия электронов одновременно с двумя волнами.

В *подразделе II.1.3* приведен анализ возбуждения паразитных волн в режиме малого сигнала. Поскольку рабочая и паразитная волны имеют разные частоты, они возбуждаются независимо, тогда как взаимодействие между двумя волнами возникает только в нелинейном режиме. Таким образом, можно исследовать взаимодействие двух волн с пучком по отдельности. Если добротности волн достаточно велики, можно использовать приближение, в котором продольная структура каждой волны фиксирована и совпадает с «холодной» структурой продольной моды закрытого резонатора. Уравнения движения рассматривались в приближении, когда в приближении фиксированной продольной структуры поля возбуждается только паразитная волна. Анализ показал, что присутствие одного фазового корректора соответствует уменьшению стартового тока паразитной волны на первой гармонике в 3-4 раза в зависимости от расстройки паразитной волны. При наличии двух нерегулярностей стартовые токи паразитной волны увеличиваются в 5-8 раз. Следует подчеркнуть, что присутствие двух нерегулярностей не меняет стартовый ток рабочей волны на второй гармонике, поскольку для нее набег фазы равен  $2\pi$  в приближении бесконечно малой длины фазового корректора.

Подробное моделирование конкуренции волн, возбуждаемых на второй гармонике и на основном циклотронном резонансе, учитывающее совместное взаимодействие (конкуренцию) двух волн на нелинейной стадии работы гиротрона проведено *подразделе II.1.4*. Моделирование показало, что использование резонатора с одним фазовым корректором увеличивает стартовый ток паразитной волны в 4-8 раз по сравнению с регулярной системой. Использование резонатора с двумя нерегулярностями увеличивает стартовый ток «паразита» до примерно 30 раз по сравнению с регулярной системой. Стоит отметить, что квазианалитическая одномодовая теория в приближении малого сигнала дает меньшее предсказывает увеличение стартовых токов: 3-4 раза для резонатора с одной нерегулярностью и 5-8 раз для системы с двумя. Следовательно, лучшее подавление паразитной волны, предсказываемое нелинейным двухволновым моделированием, может быть объяснено влиянием конкуренции между рабочей и паразитной волной.

В *подразделе II.1.5* исследовалась возможность применения описанного метода повышения селективности исследовалась в конкретной системе – релятивистском гиротроне на

второй циклотронной гармонике, работающем в длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Исследовался электронный циклотронный мазер с трубчатым релятивистским электронным пучком (напряжение – 280 кэВ, ток – до 50 А, средний питч-фактор электронов – 1,3). Моделирование показало, что в квазирегулярном резонаторе обеспечивается селективная генерация на второй циклотронной гармонике сразу в двух диапазонах рабочих полей. Как показывают численные расчеты, наличие короткого селектирующего элемента, обеспечивающего подавление паразитных волн, оказывается слабо заметным с точки зрения генерации рабочих волн на второй гармонике не только в стартовом режиме, но и в нелинейном режиме установившейся генерации. Расчеты предсказывают достижение КПД генерации рабочих волн на уровне 10% при токах 10-20 А.

При разработке квазирегулярного резонатора следует учесть, что нерегулярность может быть источником нежелательного рассеяния рабочей моды в низшие поперечные моды. Подробное исследование этой проблемы приведено в *разделе II.2*. Предложенный метод подавления паразитных низкочастотных колебаний на первой гармонике основан на одномодовом приближении, когда корректор представлен достаточно коротким расширением радиуса резонатора и сдвиг фазы волны может быть посчитан приближением Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Этот подход может быть использован в достаточно длинных резонаторах при низких модах. Однако при достаточно коротком резонаторе для рабочих мод с высокими радиальными индексами, что типично для гиротронов субмиллиметрового диапазона, такой подход не может быть реализован. Это связано с тем, что ограничение максимальной длины корректора накладывает ограничение на его минимальную глубину. В *подразделе II.2.1* предложена модификация метода подавления низкочастотных паразитных волн, возбуждаемых на основном циклотронном резонансе. В данном случае, как и ранее, в качестве селектирующего элемента предлагается использовать прямоугольную канавку на стенке резонатора. Если радиус резонатора внутри канавки близок к критическому для одной из мод, радиальный индекс которой на единицу больше радиального индекса рабочей моды, а азимутальный индекс такой же, как у рабочей, тогда, выбрав ширину канавки, возможно достигнуть почти полного отсутствия рассеяния рабочей моды на такой нерегулярности. Описанный элемент является резонансным и, таким образом, обеспечивает отсутствие рассеяния только для конкретной моды. В результате паразитные волны, возбуждаемые на основном циклотронном резонансе, имеющие вдвое меньшее поперечное волновое число, будут испытывать сильное рассеяние на канавке, что приводит к уменьшению их добротности, искажению их продольной структуры и увеличению их стартовых токов.

В *подразделе II.2.2* приведена модификация регулярного резонатора реализованного в ИПФ РАН гиротрона с частотой 670 ГГц, работающего на возбуждаемой на основном

циклотронном резонансе моде  $TE_{31,8}$ . Анализ спектра собственных мод резонатора показывает, что в рабочем диапазоне магнитных полей возможен резонанс на второй циклотронной гармонике с модой  $TE_{63,15}$  на частоте 1.34 ТГц. Чтобы продемонстрировать метод, было предложено использовать канавку глубиной 0.12 мм в резонаторе, радиус которого 4.54 мм. Моделирование этой системы проведено с помощью метода конечных элементов в двумерной области ( $r-z$ ). Выбирая геометрию канавки, можно достичь почти полного отсутствия ее влияния на возбуждение моды  $TE_{63,15}$ , сохраняя как добротность этой моды, так продольный профиль поля по отношению к электронному пучку (рис. П.12 а и б). Расчет стартовых токов подтверждает эффективность подавления паразитных мод в предложенном резонаторе. Деформация низкочастотных мод оказалась настолько сильной, что их стартовые токи стали в несколько раз выше, чем практически не изменившийся стартовый ток рабочей моды на второй гармонике.

**Раздел П.3** посвящен исследованию подавления низкочастотных паразитных колебаний, возбуждаемых на основном циклотронном резонансе, в работающих на второй гармонике гиротронах с двумя электронными пучками. В разделе проведен анализ двух подходов к использованию двухпучковой схемы. В этом случае два пучка инжектируются в два максимума фактора связи пучка с полем рабочей волны на высокой гармонике. В первом случае предполагалось, что один из двух пучков является прямолинейным. Моделирование, проведенное на основе модели нестационарного одномодового гиротрона, модифицированной для случая двух пучков, показало, что недостатком этого подхода является большая величина тока пучка, которая требуется для обеспечения значительного увеличения стартового тока паразитных мод. Для улучшения этой ситуации было предложено использовать для поглощения паразитной волны не прямолинейный, а закрученный пучок, который сильнее взаимодействует с волной. Поглощение обеспечивается в том случае, если энергия дополнительного пучка слегка меньше энергии рабочего пучка.

**Список трудов автора по теме диссертации**

- A1. I.V. Bandurkin, Yu.K. Kalynov, I.V. Osharin, and A.V. Savilov, Gyrotron with a sectioned cavity based on excitation of a far-from-cutoff operating mode, *Physics of Plasmas* 23, 013113 (2016).
- A2. Yu. K. Kalynov, I. V. Osharin, and A. V. Savilov, A method for suppression of spurious fundamental-harmonic waves in gyrotrons operating at the second cyclotron harmonic, *Physics of Plasmas* 23, 053116 (2016).
- A3. Yury K. Kalynov, Ivan V. Osharin, Andrey V. Savilov, Nikolai A. Zavolsky, Relativistic second-harmonic gyrotron with a selective quasi-regular cavity, *IEEE Transactions on Electron Devices*, volume: 63, issue: 12, page(s): 4968 – 4974, 2016.
- A4. И.В. Бандуркин, М.Ю. Глявин, Н.А. Завольский, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Использование квазирегулярных резонаторов с короткими фазовыми корректорами в гиротронах, работающих на высоких циклотронных гармониках, том 54, № 8–9, 2016 г.
- A5. Ilya V. Bandurkin, Yury K. Kalynov, Petr B. Makhlov, Ivan V. Osharin, Andrey V. Savilov, Ilya V. Zhelezov, Simulations of Sectioned Cavity for High-Harmonic Gyrotron, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 1, 2017.
- A6. V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Yu.K. Kalynov, P.B. Makhlov, I.V. Osharin, Numerical Study of a Low-Voltage Gyrotron (“Gyrotino”) for DNP/NMR Spectroscopy, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, no. 4, 2017.
- A7. Ilya V. Bandurkin, Mikhail Yu Glyavin, Sergey V. Kuzikov, Petr B. Makhlov, Ivan V. Osharin, and Andrey V. Savilov, Method of Providing the High Cyclotron Harmonic Operation Selectivity in a Gyrotron With a Spatially Developed Operating Mode, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 9, 2017.
- A8. Yury K. Kalynov, Ivan V. Osharin, A.V. Savilov, Stability of excitation of travelling waves in gyrotrons with low-relativistic electron beams, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 11, 2017.
- A9. V. L. Bratman, A. E. Fedotov , Yu. K. Kalynov, I. V. Osharin, and N. A. Zavolsky, Smooth Wideband Frequency Tuning in Low-Voltage Gyrotron With Cathode-End Power Output, *IEEE Transactions on Electron Devices* (Volume: 64, Issue: 12, Dec. 2017).
- A10. V. L. Bratman, A. E. Fedotov, A. P. Fokin, M. Yu. Glyavin, V. N. Manuilov, and I. V. Osharin, Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage, *Physics of Plasmas*, Vol. 24, P. 113105 (2017).

A11. I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, Y.K. Kalynov, I.V. Osharin, A.V. Savilov, Terahertz Large-Orbit High-Harmonic Gyrotrons at IAP RAS: Recent Experiments and New Designs (2018) IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 65, No. 6, 2018.

A12. I. V. Bandurkin, V. L. Bratman, Yu. K. Kalynov, I. V. Osharin, and A. V. Savilov, High-Harmonic Large Orbit Gyrotrons in IAP RAS, в сборнике «40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves», 2015.

A13. A.V. Savilov, I.V. Bandurkin, Yu.K. Kalynov, I.V. Osharin, High-Harmonic Terahertz Gyrotrons Based On The Use Of Quasi-Regular Cavities With Short Wave Phase Correctors, in Proc. «41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves», 2016.

A14. И.В. Ошарин, И.В. Бандуркин, Ю.К. Калынов, А.В. Савилов, Гиротроны на высоких гармониках с квазирегулярными резонаторами, труды 26-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2016.

A15. Бандуркин И.В., Калынов Ю.К., Ошарин И.В., Савилов А.В. Гиротрон, основанный на возбуждении бегущей волны в резонаторе с фазовыми корректорами, X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2016.

A16. Ошарин И.В., Завольский Н.А., Калынов Ю.К., Савилов А.В. Использование квазирегулярных резонаторов с короткими неоднородностями для повышения селективности гиротронов, работающих на второй циклотронной гармонике, X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2016.

A17. Н.А. Завольский, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, Ю.К. Калынов, И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Гиротрон на второй гармонике гирочастоты с селекцией рабочей моды с помощью фазового корректора, Сборник трудов 23-й научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, 2016.

A18. И.В. Ошарин, А.В. Савилов, Ю.К. Калынов, И.С. Кулагин, Е.В. Иляков, Релятивистский гиротрон на второй циклотронной гармонике с квазирегулярным резонатором, XVII Всероссийская школа-семинар «Волны-2017», сборник тезисов докладов, Можайск, 2017.

A19. I.V. Osharin, I.V. Bandurkin, Yu.K. Kalynov, A.V. Savilov, Terahertz gyrotrons with quasi-regular cavities, Сборник «32nd URSI GASS», Montreal, 2017.

A20. I.V. Osharin, I.V. Bandurkin, Yu.K. Kalynov, S.V. Kuzikov, A.V. Savilov, Terahertz gyrotrons with quasi-regular cavities, in Proc. 10th Int. Workshop ‘Strong Microw. Terahertz Waves, Sour. Appl.’ EPJ Web Conf., vol. 149. Nizhny Novgorod–Moscow, Russia, Jul. 2017, Art. no. 05018.

A21. I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, Yu.K. Kalynov, I.V. Osharin, A.V. Savilov, Terahertz large-orbit high-harmonic gyrotrons at IAP RAS: recent experiments and new designs, IVEC 2017 – 18th International Vacuum Electronics Conference» London, 2017.

A22. I.V. Bandurkin, V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Yu.K. Kalynov, I.V. Osharin, A.V. Savilov, N.A. Zavolsky, Efficient excitation of high axial modes in simulations of low-voltage gyrotron, IVEC 2017 – 18th International Vacuum Electronics Conference» London, 2017.

A23. V. L. Bratman, A. E. Fedotov, Y. K. Kalynov, V. N. Manuilov, and I. V. Osharin, “Progress in the development of low-voltage gyrotron for integration with NMR spectrometer,” in Proc. 10th Int. Workshop ‘Strong Microw. Terahertz Waves, Sour. Appl.’ EPJ Web Conf., vol. 149. Nizhny Novgorod–Moscow, Russia, Jul. 2017, Art. no. 04039.

A24. A.E. Fedotov, V.L. Bratman, Yu.K. Kalynov, P.B. Makhlov, V.N. Manuilov, I.V. Osharin, A.V. Savilov, Low-voltage Gyrotron For DNP Applications: Project And Features, in Proc. «IRMMW-THz 2017 – 42st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves», Cancun, Mexico, 2017.

A25. V. Manuilov, A.Fokin, V. Zaslavsky, I. Zotova, I.Osharin, A. Savilov, T. Idehara, M. Glyavin Possibilities of Mode Selection in Double-Beam Gyrotrons with Additional Absorbing Beam. Submitted to Proc. of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) 9 – 14 September, 2018, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.