

На правах рукописи



ЛУКША Олег Игоревич

**ВИНТОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ ГИРОТРОНОВ:
ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА**

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН
Трубецков Дмитрий Иванович

доктор физико-математических наук
Абубакиров Эдуард Булатович

доктор технических наук
профессор
Григорьев Андрей Дмитриевич

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова

Защита состоится 01 декабря 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II уч. корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " ____ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук
профессор



Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время, при повсеместном распространении твердотельных полупроводниковых устройств, приборы вакуумной СВЧ электроники остаются востребованными для ряда приложений, в которых требуется обеспечить высокий уровень выходной мощности в диапазоне от дециметровых до субмиллиметровых длин волн излучения. Новый этап в освоении коротковолновой части этого диапазона связан с открытием в конце 50-х годов механизма когерентного излучения электронов-осцилляторов, вращающихся в постоянном магнитном поле [1–3]. Данный механизм лежит в основе работы устройств, получивших название мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) или гирорезонансных приборов (гиروприборов). Уникальные возможности гиросприборов в наибольшей степени проявляются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн (например, [4–7]), где с их помощью был достигнут уровень выходной мощности, значительно превышающий мощность "классических" вакуумных СВЧ приборов (клистронов, магнетронов, ЛБВ, ЛОВ и др.).

Вектор развития гирорезонансных устройств определяется в первую очередь прикладными потребностями. Важнейшей областью их применения является нагрев плазмы и управление током в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС). Для этих целей, как правило, требуются гирорезонансные генераторы (гиротроны) с выходной мощностью порядка 1 МВт и частотой 110÷170 ГГц, работающие в квазинепрерывном режиме с длительностью импульса в десятки минут (например, [7–14]). При этом имеется тенденция дальнейшего увеличения их мощности до 2÷4 МВт с целью повышения эффективности использования гиротронных комплексов, состоящих из нескольких приборов, в крупных установках УТС. Сфера применения гиросприборов включает также дальнюю радиолокацию, высокотемпературную обработку материалов, плазмохимию, спектроскопию высокого разрешения, ускорение заряженных частиц и др. (например, [4–7, 15–18]).

Эффективность и предельные достижимые параметры гиросприборов определяются качеством электронного потока, который, наряду с электродинамической структурой, является одним из двух ключевых компонентов любого вакуумного устройства СВЧ. Формирование сильноточных электронных потоков с заданным стабильным положением в конфигурационном и фазовом пространствах предполагает решение ряда физических проблем,

относящихся к корпускулярной оптике, эмиссионной и вакуумной электронике, теории колебаний и волн, нелинейной динамике и другим разделам физической электроники и радиофизики. Применительно к мощным МЦР требуются винтовые электронные потоки (ВЭП), сочетающие высокие значения тока и осцилляторной энергии электронов с малым разбросом скоростей и требуемой поперечной структурой пучка. Несмотря на специфику различных типов электронно-оптических систем (ЭОС) для giroприборов, закономерности формирования высококачественных ВЭП в этих системах достаточно общи и в совокупности образуют базу для создания эффективных источников мощного СВЧ излучения. Изучению данных закономерностей, представляющих интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, посвящена настоящая диссертационная работа.

Характеристики ВЭП в ЭОС giroприборов, как и в других системах с интенсивными электронными пучками, определяются, среди прочих, такими физическими процессами, как развитие неустойчивостей в пространственном заряде, изменение свойств поверхностей ограничивающих электродов, генерация и усиление паразитного излучения, образование вторичных частиц. Указанные процессы ведут к снижению качества ВЭП, а вместе с этим к падению КПД и ухудшению параметров выходного излучения приборов, выводу их из строя. Теоретическое исследование этих процессов, даже с использованием современных численных методов расчета, зачастую наталкивается на непреодолимые трудности. Важная роль поэтому отводится физическому эксперименту, успех которого в значительной степени определяется применением слабозмущающих и высокоинформативных методов диагностики.

Коллективные процессы в электронном пространственном заряде giroприборов являются следствием развития неустойчивостей различного типа – как высокочастотных с частотой, близкой к электронной циклотронной частоте, так и низкочастотных с частотой в диапазоне десятков-сотен мегагерц (например, [19–30]). Среди механизмов возникновения низкочастотных колебаний (НЧК) в ВЭП можно выделить неустойчивость, которая развивается в объемном заряде, захваченном в специфическую ловушку между катодом и магнитной пробкой – конечным участком области перемагничивания пучка перед его поступлением в резонатор. Переменные поля, связанные с развитием паразитных колебаний, обуславливают дополнительный скоростной разброс электронов в ВЭП, вызывают появление разброса по полной скорости (энергетический разброс), изменяют поперечную структуру пучка, приводят к электронной бомбардировке по-

верхности катода и появлению вторичных электронов [20, 22, 31–37]. В результате снижается качество формируемого электронного потока и, как следствие, эффективность преобразования энергии электронов в энергию выходного СВЧ излучения. Добиться требуемого качества пучка, поступающего в резонатор, возможно в том случае, когда подавлены паразитные динамические процессы в электронном пространственном заряде. В частности, при условии подавления паразитных НЧК в ловушке может быть увеличено рабочее значение питч-фактора^{*}, что при сохранении на низком уровне скоростного и энергетического разбросов позволит реализовать работу приборов с повышенным КПД.

Важным фактором, определяющим качество электронного пучка в гиросприборах, является неоднородность термоэлектронной эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП), которая в большинстве случаев используется в качестве источника электронов в этих приборах. Как правило, такие пушки работают в режиме температурного ограничения эмиссии. Поэтому неоднородности работы выхода и температуры приводят к неоднородному распределению плотности тока электронов в поперечном сечении ВЭП. Это является причиной появления неоднородных полей, которые, в свою очередь, увеличивают скоростной разброс электронов, способствуют возбуждению паразитных НЧК и появлению разброса частиц ВЭП по энергии [31, 40–46]. Неоднородная структура пучка ответственна также за неоднородный нагрев коллектора и развитие паразитных мод в резонаторе [47–49].

К началу исследований, выполненных в рамках настоящей диссертационной работы, отсутствовали или были недостаточны знания о закономерностях указанных выше физических процессов в ВЭП гиросприборов. В частности, были мало изучены характеристики низкочастотных колебаний пространственного заряда; не были определены механизмы нарастания низкочастотных возмущений в электронном пучке; отсутствовали данные о влиянии паразитных НЧК на характеристики потоков электронов, поступающих в резонатор и бомбардирующих катод; не исследовалась связь параметров формируемого в ЭОС гиросприборов электронного пучка с эмиссионными неоднородностями термокатодов; были недостаточно изучены

* Величиной питч-фактора $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$ (v_{\perp} и v_{\parallel} – поперечная и продольная компоненты скорости электрона) принято характеризовать долю сосредоточенной в поперечном движении электронов энергии, из которой "черпается" энергия выходного СВЧ излучения в гирорезонансных приборах. Как правило, значения величины α в рабочих режимах мощных гиросприборов не превышают 1.2÷1.4 (например, [9, 11, 14, 38, 39]).

закономерности влияния регулируемых неоднородностей электрического и магнитного полей на низкочастотные коллективные процессы в ВЭП и возможности подавления паразитных НЧК при оптимизации распределений этих полей. Такие знания являются необходимой основой для проектирования и практической реализации систем формирования высококачественных ВЭП в мощных гироприборах, а также могут быть использованы в других устройствах с интенсивными электронными пучками. В определенной степени препятствовали получению требуемой информации ограничения, присущие имеющимся методам экспериментального исследования физических процессов в электронных потоках гироприборов и методикам расчета динамики пространственного заряда в этих потоках.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью настоящей работы являлось определение закономерностей формирования винтовых электронных потоков высокого качества для гирорезонансных устройств, а также выявление на этой основе возможностей повышения эффективности генерации в мощных устройствах такого типа. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие основные задачи.

1. Разработка и реализация комплекса экспериментальных методов, предназначенных для изучения основных характеристик винтовых электронных пучков в гирорезонансных устройствах.
2. Экспериментальное определение закономерностей возбуждения и развития низкочастотных коллективных процессов в пространственном заряде ВЭП. Обоснование общности выявленных закономерностей при сопоставлении данных, полученных в различных устройствах гиротронного типа.
3. Разработка методики численного моделирования динамики объемного заряда в области формирования ВЭП между катодом и резонатором гироприборов и определение с использованием данной методики закономерностей процессов накопления и группировки электронов в этой области.
4. Теоретическое и экспериментальное определение закономерностей воздействия низкочастотных колебаний объемного заряда на основные характеристики ВЭП, в частности на пространственную структуру пучка и на распределения электронов по компонентам скорости и по энергии.
5. Определение закономерностей формирования неоднородностей термоэлектронной эмиссии катодов в гироприборах и влияния эмиссионных

неоднородностей на качество ВЭП. Разработка методов диагностики гиротронных катодов и повышения их эмиссионной однородности.

6. На базе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработка эффективных методов повышения качества ВЭП. Выявление возможностей достижения высокого КПД гиротронов в результате подавления паразитных низкочастотных колебаний и повышения эмиссионной однородности катодов.

Научная новизна

Основные результаты, полученные в процессе исследований и описанные в диссертационной работе, являются новыми. Среди наиболее важных оригинальных результатов можно выделить следующие.

1. Впервые реализован комплекс слабозмущающих методов экспериментального исследования, позволяющих получать информацию о динамических характеристиках и пространственной структуре объемного заряда, распределении электронов ВЭП по компонентам скорости и по энергии, характеристиках поверхности термоэммиттера МИП в устройствах гиротронного типа.
2. Получен комплекс новых экспериментальных и теоретических данных об условиях самовозбуждения и характеристиках низкочастотных колебаний пространственного заряда ВЭП. Определены закономерности развития низкочастотных неустойчивостей в электронном пространственном заряде и эффективные методы управления коллективными процессами в пучке.
3. Получены данные о влиянии низкочастотных колебаний на важнейшие характеристики ВЭП: энергетический разброс электронов, структуру пучка в плоскости поперечного сечения, плотность тока и спектр энергий электронов, бомбардирующих катод.
4. Экспериментально определено влияние эмиссионных неоднородностей термокатода МИП на пороговые условия возбуждения и амплитудно-частотные характеристики колебаний пространственного заряда, на пространственную структуру пучка и разброс поперечных скоростей электронов, а также на величину достижимого КПД гиротрона.
5. Разработаны и экспериментально реализованы методы повышения качества формируемого в ЭОС гиротрона электронного пучка с помощью регулируемых неоднородностей электрического и магнитного полей.

6. Экспериментально продемонстрирована возможность существенного (примерно в 1.3 раза) повышения КПД экспериментального гиротрона по сравнению с КПД в расчетном рабочем режиме в условиях формирования высококачественного ВЭП при подавленных паразитных колебаниях пространственного заряда.

Научно-практическая ценность результатов работы

Разработанные методы диагностики, отличаясь универсальностью, могут быть использованы для исследования характеристик ВЭП в giro-приборах широкого диапазона параметров, а также в других устройствах с интенсивными электронными потоками.

Выявленные закономерности динамических процессов в пространственном заряде ВЭП обладают достаточной степенью общности, что доказано результатами экспериментов в различных системах гиротронного типа и данными численного моделирования. На основе полученных данных определены условия формирования ВЭП высокого качества в ЭОС мощных гирорезонансных устройств, которые следует учитывать при их проектировании и эксплуатации. Разработанные методы подавления паразитных колебаний пространственного заряда и улучшения качества ВЭП могут быть использованы для повышения эффективности и предельных достижимых параметров giroприборов различного назначения.

Опробованные в работе методы диагностики и обработки гиротронных термокатодов применимы для катодных систем с различными размерами и разным типом эмиссионного покрытия. Выработанные в результате исследований требования к эмиссионным характеристикам термокатодов могут быть использованы на этапах их начальной отбраковки и последующей эксплуатации в мощных гирорезонансных устройствах.

Результаты работ, составившие основу диссертации, были использованы при реализации совместных проектов СПбГПУ с организациями, специализирующимися на проектировании, изготовлении и эксплуатации мощных устройств гиротронного типа, – ИПФ РАН (Нижний Новгород), ЗАО НПП "Гиком" (Нижний Новгород, Москва), НПО "Исток" (Фрязино), Исследовательский центр и Институт технологии (Карлсруэ, Германия). Отдельные результаты диссертационной работы вошли в учебный курс "Физические основы СВЧ электроники", читаемый на радиофизическом факультете СПбГПУ.

Положения, выносимые на защиту

1. Новые сведения, необходимые для развития представлений о закономерностях формирования ВЭП высокого качества в гирорезонансных устройствах, позволяет получать разработанный и реализованный комплекс слабозмущающих методов диагностики, обладающих высокими показателями чувствительности, временного и пространственного разрешения.
2. Разработанная модель численного моделирования позволяет рассчитывать в типичных режимах работы giroприборов динамику накопления электронов в ловушке между катодом и магнитной пробкой, а также развитие в захваченном в ловушку пространственном заряде коллективных процессов с характерными частотами в диапазоне десятков-сотен мегагерц.
3. Механизм возникновения низкочастотных колебаний в захваченном в ловушку пространственном заряде, определенный на основании полученных экспериментальных и расчетных данных, связан с развитием неустойчивости в ансамбле неизохронных электронных осцилляторов, подобной неустойчивости отрицательной массы.
4. Низкочастотные колебания пространственного заряда возникают в электронно-оптической системе giroприборов при превышении питч-фактором порогового значения и ведут к ухудшению качества ВЭП, проявляющемуся в уширении спектра энергий электронов, в изменении пространственной структуры пучка вследствие смещения электронов поперек силовых линий магнитного поля, в бомбардировке катода и появлении вторичных электронов.
5. При уровне эмиссионных неоднородностей термокатода магнетронно-инжекторной пушки, превышающем предельное значение, возрастание этих неоднородностей приводит к увеличению скоростного разброса электронов и снижению порогового питч-фактора возбуждения низкочастотных колебаний пространственного заряда, а в присутствии этих колебаний – к увеличению их амплитуды и разброса электронов по энергии.
6. Снижение амплитуды низкочастотных колебаний и повышение качества ВЭП, необходимые для увеличения рабочего питч-фактора и КПД гиротрона, могут быть достигнуты за счет выработанных в работе методов оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП, а также при повышении эмиссионной однородности термокатода с помощью термической и ионной обработки.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях, семинарах: Всесоюзная конференция "Методы и средства диагностирования изделий электронной техники" (Москва, 1989); Всесоюзный семинар "Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа" (Ленинград, 1990); Всесоюзное совещание-семинар "Диагностика поверхности ионными пучками" (Москва, 1990); Всесоюзная конференция по эмиссионной электронике (Ленинград, 1990); Всесоюзная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью" (Москва, 1991); Всесоюзный семинар по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии (Харьков, 1991); 9, 12, 13 и 14-я зимние школы-семинары по электронике СВЧ и радиофизике (Саратов, 1993; 2003; 2006; 2009); 20-я международная конференция по инфракрасным и миллиметровым волнам (Orlando, USA, 1995); 11-я и 12-я международные конференции по мощным пучкам заряженных частиц (Prague, Czech Rep., 1996; Haifa, Israel, 1998); Международная конференция по вакуумным электронным источникам (Eindhoven, The Netherlands, 1996); Всероссийская межвузовская конференция "Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ" (Саратов, 1997); Международное совещание "Мазеры на циклотронном резонансе и гиротроны" (Kibbutz Ma'ale Nachamisha, Israel, 1998); Международная межвузовская конференция "Электроника и радиофизика СВЧ" (Санкт-Петербург, 1999); 5-й и 6-й международные симпозиумы "Мощные микроволны в плазме" (Нижний Новгород, 2002; 2005); 10-я международная конференция по вакуумной электронике и дисплеям (Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004); совместные 29, 31 и 32-я международные конференции по инфракрасным и миллиметровым волнам и 12, 14-я и 15-я международные конференции по терагерцовой электронике (Karlsruhe, Germany, 2004; Shanghai, China, 2006; Cardiff, UK, 2007); 7-й семинар по мощному высокочастотному излучению (Kalamata, Greece, 2005); 18-й совместный российско-германский семинар по гиротронам и электронному циклотронному нагреву (Нижний Новгород, 2006); 35-я международная конференция по физике плазмы (Karlsruhe, Germany, 2008); 35-я международная конференция по инфракрасным, миллиметровым и терагерцовым волнам (Rome, Italy, 2010).

Представленные в диссертации результаты были получены в рамках работ, выполненных в СПбГПУ по договорам с НПО "Исток" в период с 1986 по 1989 г., договорам с ЗАО НПП "Гиком" и ИПФ РАН (Нижний

Новгород) в период с 1989 по 1998 г., грантам РФФИ (№№ 98-02-18323, 01-02-17081, 05-02-08024, 08-02-00324), гранту INTAS (№ 03-51-3861), контрактам с Исследовательским центром и Институтом технологии (Карлсруэ, Германия) в период с 2000 по 2010 г. Материалы данных работ докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах в СПбГПУ, НПО "Исток", ИПФ РАН, ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Университете г. Карлсруэ (Германия).

Публикации

По материалам, изложенным в диссертационной работе, автором опубликовано 58 работ [А1–А58], включая 19 статей в отечественных и зарубежных журналах, 15 статей в сборниках докладов конференций, 4 авторских свидетельства, 20 тезисов докладов на конференциях. 16 статей опубликовано в журналах из списка ВАК ведущих российских рецензируемых изданий.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты были получены автором лично либо под его непосредственным руководством в период с 1986 по 2010 г. Постановка задач исследований, выбор методов и инструментов достижения поставленных целей, анализ полученных результатов осуществлялись совместно с проф. Г.Г. Соминским, а на первом этапе (до 1992 г.) – также совместно с проф. О.Ю. Цыбиным. Все работы, состоящие в (1) конструировании, контроле изготовления и сборки экспериментальных приборов и установок; (2) разработке и практической реализации экспериментальных диагностик; (3) разработке методики численного моделирования; (4) проведении экспериментов и расчетов; (5) обработке полученных данных, были выполнены автором лично при участии аспирантов Д.В. Касьяненко и Д.Б. Самсонова, а также студентов кафедры физической электроники СПбГПУ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитированной литературы (296 наименований) и списка авторских публикаций (58 наименований). Объем диссертации составляет 285 страниц, включая 95 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту, приводится информация о личном вкладе и публикациях автора диссертации, кратко излагается ее содержание.

В каждой из *глав 1–6* вначале приведен краткий литературный обзор, в котором обобщаются накопленные к настоящему времени знания по теме соответствующей главы и формулируются актуальные проблемы, не решенные на момент проведения исследований в рамках диссертационной работы.

Глава 1 посвящена описанию приборов и установок, с использованием которых была выполнена экспериментальная часть работы. Были сконструированы и изготовлены:

- экспериментальные приборы ЭОСГ-1, ЭОСГ-2, ЭОСГ-3, представляющие собой электронно-оптические системы гиротронного типа без высокочастотного резонатора [A12, A15, A18, A21, A34];
- экспериментальный импульсный гиротрон с рабочей частотой 74.7 ГГц и средним (около 100 кВт) уровнем выходной СВЧ мощности (рис. 1) [A35, A38, A42, A43, A49, A58];
- высоковакуумный стенд для диагностики и обработки гиротронных термокатодедов [A52, A56].

Для формирования ВЭП в экспериментальных приборах применялись адиабатические ЭОС, включающие магнетронно-инжекторную пушку и область магнитной компрессии пучка. Вариантами магнитных систем были сверхпроводящий криосоленоид и импульсные соленоиды, работающие при комнатной температуре. Прибор ЭОСГ-1 по своей геометрии и режимам работы был подобен гиротронам, применяемым в технологических комплексах (например, [7, 17, 18]). Системы формирования ВЭП в приборах ЭОСГ-2 и ЭОСГ-3 были аналогичны ЭОС мощных мегаваттных гиротронов (например, [7, 8, 50]). Эти приборы работали в режимах, которые являлись моделирующими* по отношению к рабочим режимам мощных гиротронов. Выбор для исследований приборов с умеренным уровнем энергии, запасенной в ВЭП, (например, в рабочем режиме эксперимен-

* В моделирующих режимах выбор значений ускоряющего напряжения, тока пучка и индукции магнитного поля, уменьшенных по сравнению со значениями этих параметров в рабочем режиме, осуществляется на основе масштабных соотношений, обеспечивающих неизменность статических электронных траекторий (например, [20]).

Магнитная система гиротрона:

ОС - основной соленоид; КаС - катодный соленоид;
КоС - коллекторный соленоид; АС - соленоид
анализатора; УС - управляющий соленоид

Анализатор энергий электронов:

1 - входное отверстие анализатора (диаметр = 1 мм);
2 - электрод под задерживающим потенциалом;
3 - экранирующая сетка;
4 - коллектор анализатора

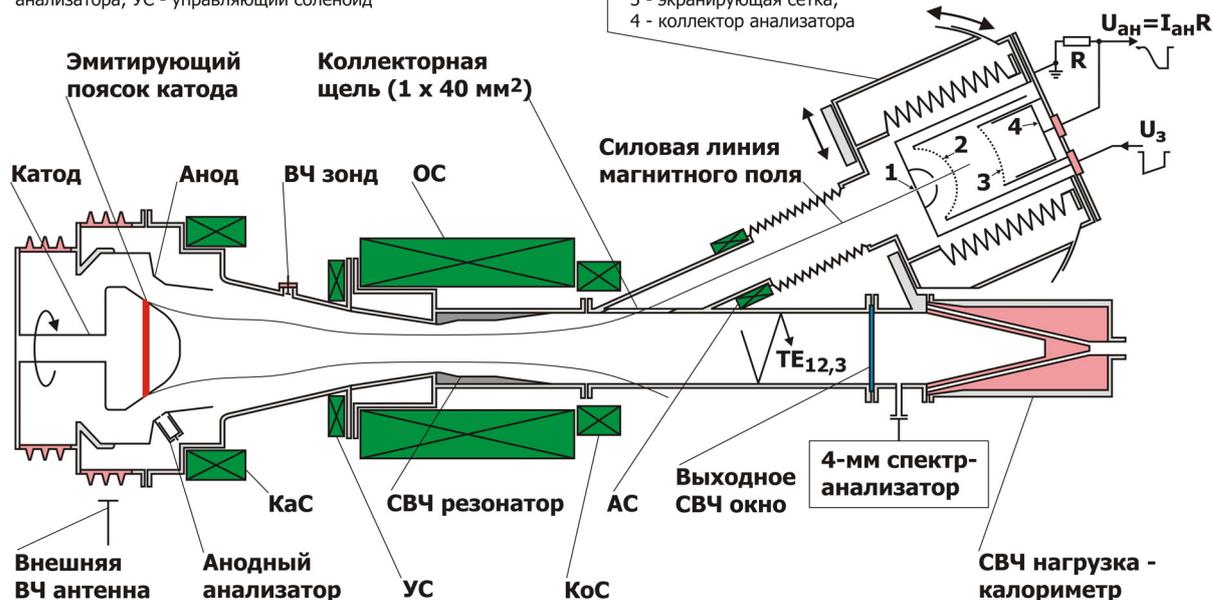


Рис. 1. Схематическое изображение сечения экспериментального гиротрона.

тального гиротрона: ускоряющее напряжение – 30 кВ, ток пучка – 10 А, длительность импульса – 40 мкс) значительно упрощал реализацию диагностик и проведение многих измерений. Сопоставление данных, полученных в приборах с различающимися геометрией ЭОС и режимами работы, служило основанием для вывода об общности выявленных закономерностей физических процессов в пространственном заряде ВЭП и о возможности использования разработанных методов повышения качества пучка в различных гирорезонансных устройствах.

Для определения характеристик ВЭП был использован набор слабо-возмущающих методов диагностики, большая часть из которых были новыми. Некоторые из экспериментальных методик, которые основывались на опробованных ранее подходах [35, 36, 51, 52], были реализованы с учетом специфики ЭОС гироприборов и требований к чувствительности и разрешающей способности измерительных систем. В совокупности разработанные методы образуют уникальный диагностический комплекс, предназначенный для определения:

- эмиссионных характеристик термокатодов МИП на основе анализа пространственного распределения электронного тока и характеристик потоков ионов с поверхности эмиттера [A13, A14, A17, A31, A41, A52];
- параметров распределения электронов ВЭП по компонентам скорости и по энергии с помощью анализаторов с тормозящим полем, установленных в коллекторной области приборов [A15, A38, A42, A43];

- пространственной структуры ВЭП при регистрации излучения, возникающего при взаимодействии электронов с мишенью из малых частиц люминофора, и при измерении азимутального распределения плотности тока пучка в области его осаждения на коллекторе [A2, A3, A15];
- амплитудно-частотных и пространственно-временных характеристик динамических процессов в объемном заряде ВЭП в диапазоне частот 10÷1500 МГц с помощью ВЧ зондов, локально связанных с электронным пучком, и внешних ВЧ антенн [A12, A15, A18, A21, A35, A42, A43];
- плотности тока и энергетического спектра электронов в потоке, бомбардирующем поверхность катода [A33, A34].

Разработанные методы повышения качества формируемого электронного потока были реализованы в экспериментальных приборах с помощью дополнительных управляющих электродов и магнитных катушек, предназначенных для регулирования распределений электрического и магнитного полей в области МИП и на участке магнитной компрессии пучка.

В заключении первой главы обобщаются результаты исследований эмиссионных характеристик термокатодов, которые использовались при проведении экспериментов. В приборах ЭОСГ-2, ЭОСГ-3, экспериментальном гиротроне и на специальном высоковакуумном стенде протестировано в общей сложности 25 гексаборид-лантановых (LaB_6) и металлопористых вольфрамо-бариевых (W-Ba) эмиттеров, изготовленных по различным технологиям. Определены типичные эмиссионные характеристики катодов в исходном состоянии, а также изменение этих характеристик в процессе эксплуатации катодов, в том числе после термической и ионной обработки. Полученные данные были использованы изготовителями гиротронных катодов для совершенствования технологии их изготовления и активирования. На технологической базе ЗАО НПП "Гиком-М" были созданы металлопористые эмиттеры для мощных гиротронов с требуемыми параметрами по эмиссионной активности, долговечности и степени неоднородности эмиссии [A27, A28]. Выполненные исследования позволили обосновать возможность применения ионной обработки термокатодов для повышения их эмиссионной однородности, в том числе непосредственно в условиях работающего гиротрона.

В *главе 2* представлены результаты экспериментальных исследований низкочастотных коллективных процессов в ВЭП, выполненных в электронно-оптических системах гиротронного типа и в эксперименталь-

ном гиротроне. Основное внимание в этих исследованиях было уделено паразитным НЧК с частотой в диапазоне $20 \div 160$ МГц. В широком диапазоне изменения рабочих параметров (ускоряющее напряжение U_0 , индукция магнитного поля на полке B_0 , ток пучка I_n , коэффициент магнитной компрессии B_0/B_k , длительность импульса τ) определены амплитудно-частотные и фазовые характеристики, а также пороговые условия возбуждения этих колебаний. Результаты измерений дали доказательства связи НЧК с продольным движением сгустков пространственного заряда в электронном облаке, захваченном в ловушку между катодом и магнитной пробкой. Характерное время достижения квазистационарного состояния, в котором амплитуда колебаний изменяется незначительно, составляло $50 \div 100$ периодов продольных осцилляций единичного электрона в ловушке. Преимущественно локализованные в области магнитной компрессии ВЭП, низкочастотные колебания присутствуют также и в потоке электронов, прошедших через магнитную пробку и поступающих в область резонатора.

Показано, что величина питч-фактора α является параметром, характеризующим влияние напряжения U_0 , индукции магнитного поля B_0 и коэффициента B_0/B_k на амплитуду и пороговые условия возникновения паразитных НЧК в выбранной ЭОС гироприбора. О качестве формируемого ВЭП можно судить по значению порогового питч-фактора α_n , при превышении которого в электронном пространственном заряде существуют данные колебания. Экспериментально определена зависимость, характеризующая снижение порогового питч-фактора при возрастании скоростного разброса электронов в пучке. Значения величины α определялись по соотношениям адиабатической дрейфовой теории (например, [53]), а также рассчитывались в процессе численного моделирования с помощью программы EGUN [54].

В экспериментальном гиротроне выявлена область существования паразитных НЧК и определены условия, когда эти колебания возбуждаются при значениях магнитного поля, соответствующих зоне генерации на рабочей моде $TE_{12,3}$. На рис. 2 приведены типичные зависимости амплитуды колебаний $A_{НЧК}$, выходной СВЧ мощности P_0 на рабочей моде и рассчитанного с помощью кода EGUN питч-фактора α от индукции магнитного поля B_0 при рабочих значениях параметров U_0 , I_n , B_0/B_k . Приведенные зависимости характерны для гиротрона с относительно однородным

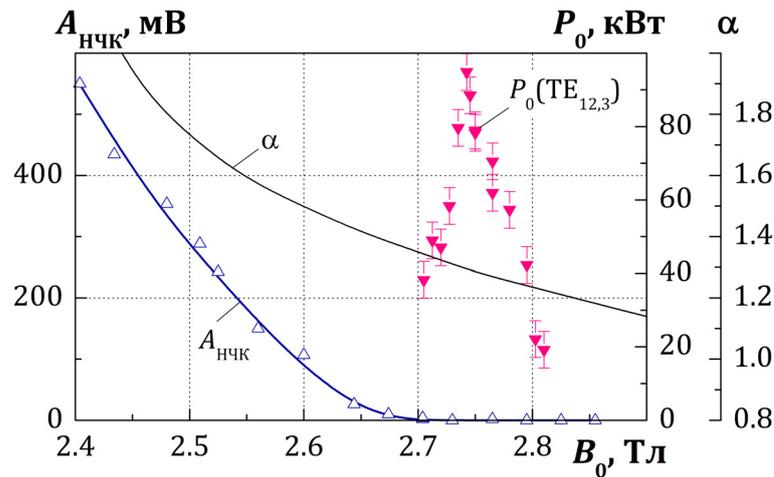


Рис. 2. Зависимости амплитуды колебаний $A_{\text{НЧК}}$, выходной мощности P_0 на рабочей моде $\text{TE}_{12,3}$, а также рассчитанного питч-фактора α от индукции магнитного поля B_0 ($U_0 = 30$ кВ, $I_{\text{п}} = 10$ А, $B_0/B_{\text{к}} = 18.02$).

термокатодом (коэффициент эмиссионной неоднородности δj_j^* менее 20÷25 %). Для таких катодов в рабочем режиме при $\alpha = 1.28$ экспериментальные значения выходной мощности и КПД приблизительно совпадали с их расчетными значениями, определенными при моделировании процессов взаимодействия электронов с ВЧ полем в резонаторе гиротрона.

Исследованы спектры низкочастотных колебаний при различной величине потока электронов, отражающихся от магнитной пробки. Показано, что с ростом коэффициента отражения от пробки происходит усложнение спектров НЧК, а при интенсивном потоке частиц в ловушку захваченный в нее пространственный заряд является источником широкополосных хаотических сигналов.

Проанализирована связь возбуждающихся в ВЭП низкочастотных колебаний с внешними цепями, соединяющими лампу с источниками питания и измерительной аппаратурой. В отличие от полученных в других гироприборах данных (например, [20, 38, 39]), в экспериментальном гиротроне не было зафиксировано заметного изменения амплитудно-частотных характеристик НЧК при варьировании в широких пределах резонансной частоты и добротности внешнего контура. Наблюдалось плавное изменение основной частоты в спектре колебаний при варьировании ускоряющего напряжения. Отсутствие влияния внешних цепей на характеристики

* Коэффициент δj_j определялся по измеренной зависимости плотности тока эмиссии от азимутальной координаты $j_j(\theta)$ как относительное среднеквадратичное отклонение величины j_j от среднего значения (например, [A41, A43]).

низкочастотных коллективных процессов в ВЭП экспериментального гиротрона объясняется спецификой геометрии МИП и особенностями конструкций катодного и анодного блоков данного прибора.

Эксперименты показали, что электронный поток в гироприборах может быть источником более высокочастотных колебаний с частотой в диапазоне 600÷900 МГц. Колебания возбуждались при повышенных значениях тока ВЭП, при которых концентрация электронов в области полки магнитного поля близка к значениям данной величины в пучках мощных гиротронов. Дано экспериментальное подтверждение связи этих колебаний с конвективным усилением волн пространственного заряда на участке дрейфа ВЭП. Уменьшить вероятность возбуждения данных паразитных колебаний возможно при снижении степени эмиссионных неоднородностей катода.

Глава 3 посвящена теоретическому исследованию процессов накопления и группировки пространственного заряда в ловушке ЭОС гиротронного типа. Разработанный автором подход к моделированию коллективных процессов в ВЭП [А29, А55] позволил принципиально сократить затраты машинного времени на один шаг интегрирования и существенно увеличить время анализа по сравнению с двумерным моделированием (например, [20, 22, 37, 55–58]). Базирующийся на методе крупных частиц, данный подход ориентирован на изучение процессов, характерный период которых сопоставим с периодом осцилляций единичного электрона в ловушке. Доступные временные интервалы моделирования, составляющие сотни таких периодов, дают возможность анализировать динамику накопления в ловушке объемного заряда и развития неустойчивости для рабочих параметров ВЭП в гиротронах, независимо от их геометрии, мощности, рабочей длины волны и т.д.

На примере ЭОС различных гироприборов исследованы пороговые условия возбуждения и амплитудно-частотные характеристики колебаний, связанных с развитием неустойчивости в накопленном в ловушке объемном заряде. Определены значения времени возникновения колебаний и суммарного электронного заряда, накопленного в ловушке к этому моменту времени, в зависимости от величины коэффициента отражения электронов от магнитной пробки R_0 в "холодном" ВЭП. Варьирование величины R_0 осуществлялось за счет изменения питч-фактора и разброса поперечных скоростей электронов в пучке. Установлено, что для ЭОС экспериментального гиротрона регулярные НЧК возникают при значениях R_0 , пре-

вышающих примерно $5 \cdot 10^{-4}$. Анализ полученных данных показал, что влияние НЧК на работу мощных гиротронов проявляется при меньшем коэффициенте отражения электронов от пробки (т. е. при меньшем питч-факторе в случае одинакового скоростного разброса) по сравнению со слабботочными гиротронами, используемыми, например, для обработки материалов.

Дано обоснование возможности развития неустойчивости в ансамбле неизохронных электронных осцилляторов в ловушке, подобной неустойчивости отрицательной массы. Проанализирован способ воздействия на инкремент данной неустойчивости при регулировании распределения магнитного поля в области компрессии ВЭП. Для конфигураций ЭОС экспериментальных приборов, в которых были исследованы паразитные НЧК, получены оптимальные с точки зрения подавления колебаний расчетные распределения магнитного поля.

Определено влияние паразитных НЧК на характеристики электронного потока, поступающего в область резонатора. Интенсивность колебательного процесса в ловушке характеризовалась значением переменной компоненты потенциала пучка с усреднением по ячейкам, на которые было разбито пространство между катодом и магнитной пробкой. В зависимости от значения данной величины определены разброс энергий электронов, амплитуда высокочастотной модуляции плотности электронного пространственного заряда, степень деформации функции распределения по скоростям и наличие выделенных "пучков" с разными продольными скоростями. Временные зависимости, приведенные на рис. 3, характеризуют

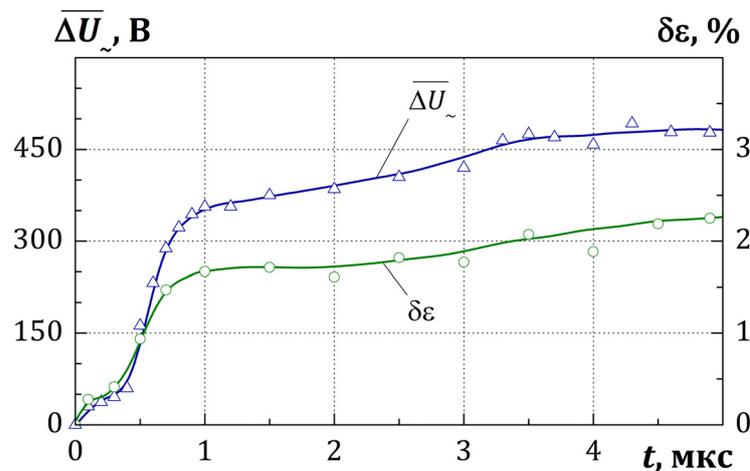


Рис. 3. Зависимости среднего значения переменной компоненты провисания потенциала пучка $\overline{\Delta U}$ и разброса энергий электронов $\delta \epsilon$ от времени t ($R_0 = 6.79 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_0 = 1.5$, $\delta v_{\perp \text{rms}} = 10.6 \%$).

изменение энергетического разброса* электронов по мере увеличения интенсивности низкочастотных колебаний.

Проанализировано изменение составляющих потоков электронов, поступающих в ловушку и выходящих из нее, с течением времени. Выделена одна из этих составляющих, связанная с осаждением электронов на поверхности катода. Полученные данные об энергетических спектрах бомбардирующих катод частиц находятся в согласии с результатами двумерного моделирования (например, [22, 37]), которое показало заметную роль образующихся при бомбардировке катода вторичных электронов в процессах накопления пространственного заряда в ловушке и влияние этих электронов на интенсивность паразитных НЧК.

В целом, результаты проведенного численного моделирования удовлетворительно согласуются с данными экспериментов, которые были выполнены в различных системах гиротронного типа и описаны в других главах настоящей работы. Это касается пороговых условий возбуждения и спектральных характеристик НЧК, в частности эффектов стохастизации коллективных процессов в ловушке, влияния низкочастотных полей пространственного заряда на характеристики формируемого ВЭП, эффективных способов управления колебаниями при регулировании распределений электрического и магнитного полей.

В *главе 4* приведены результаты исследований влияния эмиссионных характеристик термокатодов на качество ВЭП и эффективность генерации СВЧ излучения в гирорезонансных устройствах. Измерения, выполненные в электронно-оптических системах гиротронного типа ЭОСГ-2 и ЭОСГ-3, позволили впервые определить влияние степени эмиссионных неоднородностей катода на порог возникновения и амплитудно-частотные характеристики колебаний пространственного заряда ВЭП, а также на величину разброса поперечных скоростей электронов. Сравнивались данные, которые были получены как для катодов с разной эмиссионной неоднородностью, так и при варьировании эмиссионных характеристик одного и того

* В работе были использованы два принятых способа описания скоростного и энергетического разбросов электронов в ВЭП (например, [34, 35, 55, 59]): (1) по полной ширине соответствующих спектров за вычетом фракций с минимальными и максимальными скоростями (энергиями), количество электронов в которых составляет 10 % от полного числа электронов в пучке (δv_{\perp} , $\delta \epsilon$); (2) с помощью величины среднеквадратичного отклонения (root-mean-square, rms) энергии или скорости частиц от своего среднего значения ($\delta v_{\perp, \text{rms}}$, $\delta \epsilon_{\text{rms}}$). Например, в случае гауссовой функции распределения по скорости выполняется соотношение $\delta v_{\perp} \approx 2.56 \cdot \delta v_{\perp, \text{rms}}$.

же катода. Изменение пространственного распределения плотности тока эмиссии достигалось в результате термической обработки катодов, а также при локальном напылении атомов платины на отдельные участки эмитирующей поверхности. На основании полученных данных сделан вывод, что возрастание скоростного разброса и интенсивности НЧК в случае повышения эмиссионной неоднородности катода связано преимущественно с неоднородной экранировкой внешнего электрического поля пространственным зарядом в области МИП, по крайней мере, для моделирующих режимов работы мощных гиротронов при относительно малом токе электронного пучка.

Сравнение азимутальных распределений плотности тока ВЭП, измеренных в катодной и коллекторной областях экспериментальных приборов, показало, что при транспортировке электронного пучка происходит сглаживание мелкомасштабных неоднородностей структуры ВЭП, обусловленное, видимо, перемешиванием электронных траекторий, при сохранении крупномасштабных особенностей данной структуры. Характерный угловой интервал, в пределах которого происходило перемешивание траекторий электронов при транспортировке пучка от катода до коллектора, составлял $10 \div 20$ град.

В экспериментальном гиротроне определена связь между степенью эмиссионной неоднородности катода, с одной стороны, и характеристиками качества ВЭП и эффективностью преобразования энергии электронов в СВЧ энергию – с другой. Данные о коэффициенте эмиссионной неоднородности δj_3 , пороговом питч-факторе возникновения НЧК $\alpha_{\text{п}}$ и максимальном КПД $\eta_{\text{макс}}$ на рабочей моде $\text{TE}_{12,3}$, измеренном в расчетном режиме работы гиротрона при $\alpha \approx 1.3$, для исследованных катодов сведены в табл. 1. Определенные в эксперименте значения порогового питч-фактора были использованы для оценки разброса поперечных скоростей $\delta v_{\perp \text{rms}}$ электронов в ВЭП, формируемых при использовании разных катодов. Эти оценки были выполнены на основании сравнения измеренных и рассчитанных энергетических спектров электронов в отработанном пучке для катода К-2 и в предположении, что в гиротроне при заданном наборе значений рабочих параметров U_0 , B_0 , $I_{\text{п}}$ и $B_0/B_{\text{к}}$ паразитные НЧК возбуждаются при некотором пороговом коэффициенте отражения от пробки $R_{\text{п}}$, одинаковом для разных катодов. Вычисленные значения разброса поперечных скоростей приведены в последнем столбце табл. 1, по данным которой построена зависимость $\delta v_{\perp \text{rms}}(\delta j_3)$, показанная на рис. 4.

Катод	Тип	$\delta j_3, \%$	$\eta_{\text{макс}}, \%$	$\alpha_{\text{п}}$	$\delta v_{\perp \text{rms}}, \%$
К-4	W-Ba	13	32	1.31	8.8
К-4	W-Ba	20	32	1.31	8.8
К-1	LaB ₆	23	31	1.31	8.8
К-6	LaB ₆	30	30	1.26	9.2
К-4	W-Ba	40	28	1.25	9.6
К-2	LaB ₆	50	26	1.22	10
К-3	W-Ba	74	20	1.11	11.8

Полученные результаты позволяют определить величину предельной степени эмиссионных неоднородностей катода, при превышении которой эти неоднородности могут оказывать заметное негативное влияние на разброс поперечных скоростей электронов и, как следствие, на амплитуду паразитных НЧК. Выполнены оценки предельной степени эмиссионных неоднородностей в зависимости от совокупного вклада других факторов, определяющих скоростной разброс электронов в типичных режимах работы мощных гиротронов.

С использованием данных о влиянии эмиссионных неоднородностей на работу экспериментального гиротрона определена область устойчивой работы прибора, характеризующаяся высоким качеством формируемого ВЭП с малым разбросом по скоростям и отсутствием паразитных колебаний пространственного заряда, и определены возможности расширения

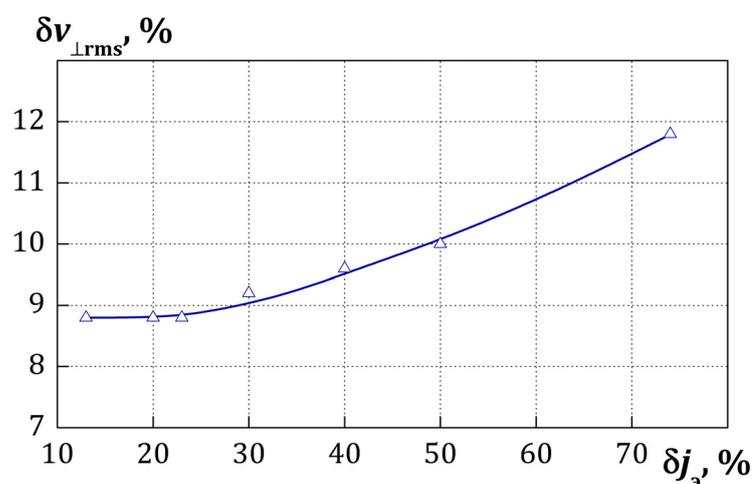


Рис. 4. Зависимость разброса поперечных скоростей электронов $\delta v_{\perp \text{rms}}$ от коэффициента эмиссионной неоднородности катода δj_3 .

этой области в сторону больших питч-факторов для достижения повышенного КПД гиротрона.

Глава 5 посвящена экспериментальным исследованиям влияния низкочастотных коллективных процессов в электронном пространственном заряде на характеристики ВЭП, определяющие эффективность генерации СВЧ излучения в гирорезонансных устройствах. В части экспериментов использовалась модифицированная версия гиротрона, в которой вместо резонатора в области полки магнитного поля был установлен специальный поглотитель с целью подавления возбуждения электромагнитного излучения на частотах циклотронного резонанса. Определено влияние низкочастотных колебаний пространственного заряда на разброс энергий электронов в ВЭП. Показано, что даже при малой амплитуде колебаний вблизи порога их возбуждения уширение энергетического спектра электронов, вызванное действием переменных полей пространственного заряда, может характеризоваться разбросом энергий $\delta\varepsilon$ в 3÷4 %, при котором, согласно имеющимся данным (например, [14, 28, 60, 61]), КПД giroприборов заметно ниже по сравнению со случаем моноэнергетичного ВЭП.

С использованием распределенной мишени, состоящей из малых частиц люминофора, в приборе ЭОСГ-1 определена поперечная структура ВЭП при разной амплитуде паразитных НЧК. Типичные зависимости усредненной по азимуту плотности тока ВЭП от радиальной координаты, полученные при разных значениях коэффициента магнитной компрессии B_0/B_k , приведены на рис. 5. Режим с $B_0/B_k = 14.3$ характеризовался малой амплитудой НЧК ($\alpha \gtrsim \alpha_n$). При повышении B_0/B_k с 14.3 до 16.7 амплитуда колебаний возросла на ~ 20 дБ, что сопровождалось увеличением

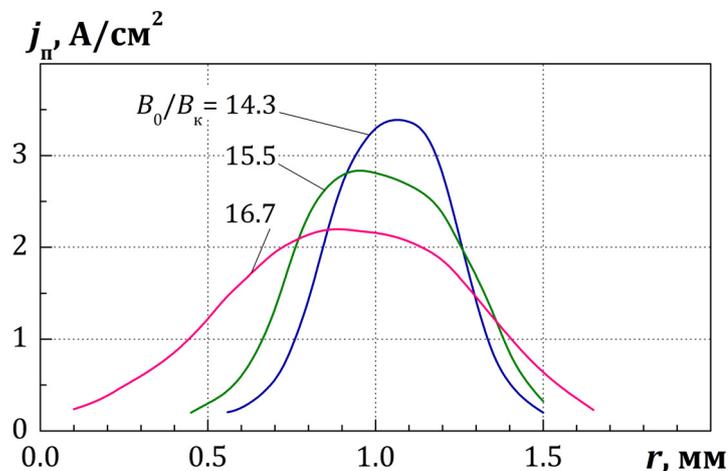


Рис. 5. Радиальные распределения плотности электронного тока $j_n(r)$ при разных значениях коэффициента магнитной компрессии B_0/B_k .

толщины стенки пучка $\Delta R_{\text{ВЭП}}$ примерно в два раза. На основе полученных данных определено возможное радиальное смещение электронов под действием связанного с НЧК переменного поля пространственного заряда, в том числе для пучков мощных гиротронов. При анализе использовались данные расчетов интенсивности колебательного процесса в ловушке для различных ЭОС гиротронного типа (*глава 3*). Показано, что в экспериментальном гиротроне в режимах с интенсивными НЧК величина $\Delta R_{\text{ВЭП}}$ может достигать значений $(0.5 \div 0.7) \cdot \lambda$, где $\lambda = 4$ мм – длина волны выходного СВЧ излучения. Подобное уширение пучка может быть причиной низкой эффективности генерации СВЧ излучения в гироприборах (например, [62]).

В приборе ЭОСГ-3 экспериментально определены плотность тока и спектр энергий электронов в потоке, бомбардирующем катод в присутствии паразитных НЧК. В режимах с интенсивными колебаниями плотность тока бомбардировки составляла примерно 1 % от плотности тока термоэмиссии с катода МИП, а максимальная энергия бомбардирующих электронов достигала ~ 400 эВ при полном ускоряющем напряжении $U_0 = 7.8$ кВ. В целом, полученные экспериментальные данные подтвердили сделанные в рамках теоретического анализа выводы о необходимости учета вторичных электронов, эмитируемых с катода в присутствии НЧК, при моделировании физических процессов в пространственном заряде ВЭП гироприборов.

Глава 6 посвящена методам управления низкочастотными коллективными процессами в пространственном заряде ВЭП. Основная задача исследований состояла в определении возможности подавления паразитных колебаний, развивающихся в захваченном в ловушку пространственном заряде. Разработанные методы основываются на регулировании распределений электрического и магнитного полей в области формирования пучка. Изучена экспериментально и теоретически с использованием методов численного моделирования возможность управления характеристиками НЧК при:

- введении регулируемых неоднородностей электрического поля в области магнитной компрессии ВЭП;
- регулировании распределения электрического поля в прикатодной области МИП, в том числе при изменении потенциала управляющего электрода, изолированного от катодного блока экспериментального гиротрона;

– изменении распределения магнитного поля на участке перемагничивания пучка между пушкой и резонаторной областью гиротрона.

Подавление НЧК реализовано за счет введения дополнительных потерь электронов из ловушки, а также в результате воздействия на инкремент развития неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде.

В экспериментах продемонстрирована возможность снижения амплитуды НЧК, достигающего ~ 10 дБ, при подаче управляющего напряжения на изолированную секцию трубы дрейфа и при введении азимутально-неоднородного электрического поля в конце области магнитной компрессии пучка. Обосновано применение секционированной трубы дрейфа в гироприборах для подавления неустойчивости, связанной с торможением электронов собственным полем пространственного заряда, и для снижения интенсивности ионной бомбардировки катода.

Регулирование продольного распределения магнитного поля $B(z)$ в экспериментальных приборах осуществлялось с помощью управляющих катушек, установленных на участке компрессии ВЭП (см. рис. 1). Реализованы распределения $B(z)$, при которых траектории ведущих центров электронных орбит приближены к трубе дрейфа в локальной области, прилегающей к управляющей катушке. В случае таких распределений подавление НЧК было связано с осаждением на трубе дрейфа электронов, в первую очередь из ореола ВЭП, в котором сосредоточены захваченные в ловушку частицы. Работа экспериментальных приборов с подавленными НЧК была также реализована при распределениях $B(z)$, близких к оптимизированным расчетным распределениям, соответствующим уменьшенному инкременту неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде (*глава 3*).

Опробован метод повышения качества ВЭП путем оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП. Дано экспериментальное подтверждение целесообразности использования разработанной в ИПФ РАН катодной системы (например, [63]) с увеличенным катодным углом в области над эмитирующим пояском (катод с "юбкой") для подавления паразитных НЧК. Применение катодного узла с входящим в его состав изолированным управляющим электродом давало возможность регулировать распределение электрического поля непосредственно в процессе работы гиротрона. Показано, что, изменяя распределение поля с помощью этого электрода, можно добиться повышения качества ВЭП за счет

снижения скоростного разброса при постоянном среднем питч-факторе (по данным траекторного анализа) и за счет подавления паразитных колебаний (по данным эксперимента).

Совместное применение разработанных методов подавления НЧК в экспериментальном гиротроне, оснащенный термокатодом с достаточной степенью эмиссионной однородности, позволило обеспечить высокое качество формируемого ВЭП при работе в режимах с большим питч-фактором (более 1.5). Характеристики гиротрона, в котором был установлен катод с "юбкой" (LaV₆ эмиттер К-6, $\delta j_e = 25\%$) и реализовано оптимизированное распределение магнитного поля, показаны на рис. 6. Здесь приведены зависимости максимального КПД гиротрона $\eta_{\text{макс}}$ на рабочей моде TE_{12,3}, амплитуды колебаний $A_{\text{НЧК}}$ и рассчитанного питч-фактора α от напряжения U_0 и коэффициента магнитной компрессии B_0/B_k . В отсутствие паразитных колебаний КПД гиротрона возрастает по мере увеличения питч-фактора. При $\alpha \approx 1.55$ достигается максимальный КПД $\eta_{\text{макс}} \approx 42\%$, который примерно в 1.3 раза больше по сравнению с КПД гиротрона в расчетном режиме при $\alpha = 1.28$.

На основании полученных экспериментальных и расчетных данных проанализированы возможные технические решения по применению разработанных методов повышения качества ВЭП в конструкциях высокоэффективных мощных устройств гиротронного типа.

В *заключении* диссертационной работы сформулированы ее основные результаты.

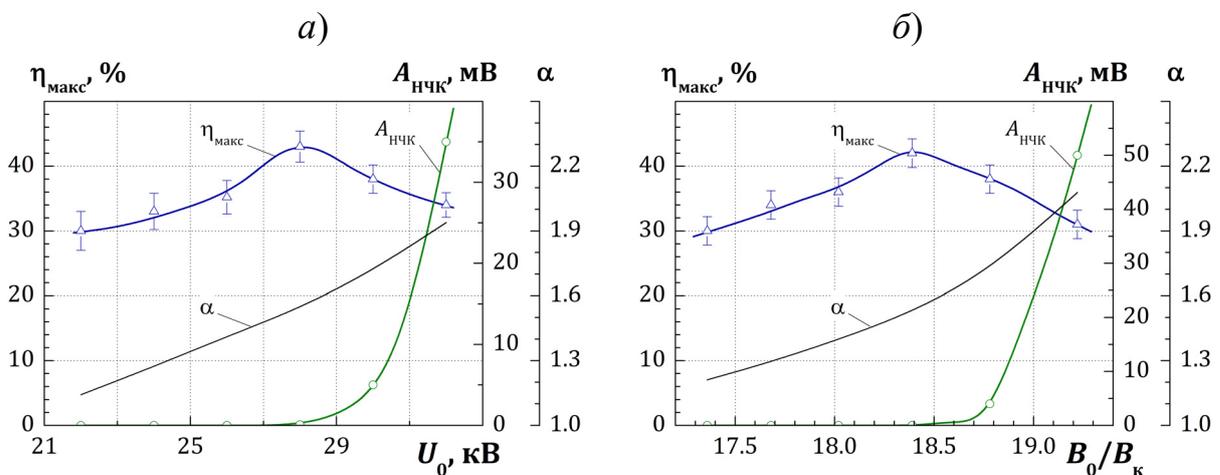


Рис. 6. Зависимости максимального КПД гиротрона $\eta_{\text{макс}}$ на моде TE_{12,3}, амплитуды НЧК $A_{\text{НЧК}}$ и питч-фактора α от ускоряющего напряжения U_0 (а) и коэффициента магнитной компрессии B_0/B_k (б).

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработан и реализован экспериментальный комплекс, который включает электронно-оптические системы гиротронного типа, изготовленные на базе применяемых на практике гиротронов, импульсный гиротрон 4-миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью ~ 100 кВт и установку для диагностики и обработки гиротронных катодов. Следующие специально разработанные методики использованы для определения основных характеристик ВЭП.
 - 1.1. Метод исследования пространственных неоднородностей эмиссии с термокатода МИП, основанный на измерении азимутальных распределений потоков электронов, положительных и отрицательных ионов с эмитирующей поверхности.
 - 1.2. Методы изучения пространственной структуры ВЭП, которые основаны на регистрации излучения, возникающего при взаимодействии электронного потока с мишенью из малых частиц люминофора, и на измерении азимутального распределения плотности тока пучка в области его осаждения на коллекторе.
 - 1.3. Зондовая методика, предназначенная для исследования амплитудно-частотных, пространственно-временных и фазовых характеристик колебаний объемного заряда ВЭП, а также характеристик паразитного излучения вне вакуумной оболочки приборов в диапазоне частот $10 \div 1500$ МГц.
 - 1.4. Усовершенствованные методики анализа распределений электронов по скорости и энергии в коллекторной области приборов, основанные на применении анализаторов с тормозящим полем. Чувствительность энергоанализатора обеспечивала возможность измерять малые значения разброса энергий электронов, вызванного влиянием собственных полей пространственного заряда пучка.
 - 1.5. Метод исследования характеристик потока электронов на катод, предназначенный для определения плотности тока бомбардировки и энергетического спектра бомбардирующих катод электронов.
2. Исследованы низкочастотные коллективные процессы в пространственном заряде ВЭП устройств гиротронного типа и влияние этих процессов на характеристики пучка и выходные параметры гиротрона.
 - 2.1. Экспериментально определены амплитудно-частотные, временные и фазовые характеристики, а также пороговые условия возбуждения низкочастотных ($f = 20 \div 160$ МГц) колебаний, связанных с отраже-

- нием электронов ВЭП от магнитной пробки и накоплением пространственного заряда в ловушке между катодом и полкой магнитного поля.
- 2.2. Разработана методика численного моделирования динамики пространственного заряда в ЭОС giroприборов, ориентированная на исследование длительных процессов с характерной частотой много меньше циклотронной частоты электронов. С использованием разработанного кода изучены процессы накопления и группировки пространственного заряда в ловушке.
 - 2.3. В расчетах и в экспериментах показано, что паразитные низкочастотные колебания в ловушке систем гиротронного типа могут возбуждаться при значениях питч-фактора и разброса скоростей электронов, близких к реализуемым в мощных гиротронах. Введенная величина порогового питч-фактора возбуждения колебаний может служить удобным параметром контроля качества ВЭП в процессе эксплуатации giroприборов.
 - 2.4. На базе полученных экспериментальных и расчетных данных обоснован механизм развития неустойчивости в ансамбле неизохронных электронных осцилляторов в ловушке, подобный неустойчивости отрицательной массы.
 - 2.5. Экспериментально и теоретически исследовано влияние низкочастотных колебаний на основные характеристики ВЭП. Полученные данные определяют снижение качества пучка при возрастании интенсивности колебаний, проявляющееся в (1) увеличении разброса энергий электронов; (2) размытии поперечной структуры ВЭП, смещении электронов поперек силовых линий магнитного поля; (3) увеличении амплитуды модуляции плотности заряда и появлении выделенных "пучков" с разными продольными скоростями в потоке, поступающем в резонатор; (4) возрастании плотности тока электронов, бомбардирующих катод, и уширении спектра их энергий. Показано удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных о влиянии паразитных низкочастотных колебаний на параметры ВЭП.
 - 2.6. Обнаружены и изучены колебания пространственного заряда с частотой в диапазоне 600÷900 МГц. Дано объяснение природы этих колебаний исходя из возможности развития многопучковой неустойчивости в электронных потоках giroприборов.

3. Реализована программа по разработке методов диагностики и обработки гиротронных термокатодов, по исследованию характеристик катодов и влияния их эмиссионной неоднородности на качество ВЭП и выходные параметры гиротрона.
 - 3.1. Исследованы эмиссионные характеристики 25 гексаборид-лантановых и металлопористых термокатодов. Изучено изменение этих характеристик в процессе эксплуатации катодов, а также в результате применения специально разработанных методов их термической и ионной обработки. Полученные данные использованы изготовителями металлопористых термокатодов для совершенствования технологии производства и улучшения эмиссионных характеристик таких катодов.
 - 3.2. Экспериментально определено влияние неоднородности эмиссии катода на пороговые условия возбуждения и амплитуду паразитных низкочастотных колебаний, на величину разброса поперечных скоростей и азимутальное распределение плотности пространственного заряда электронов в ВЭП, а также на выходную СВЧ мощность и КПД экспериментального гиротрона.
 - 3.3. На основании полученных данных выработаны требования к эмиссионной однородности термокатодов при использовании их в качестве источника электронов в мощных гирорезонансных устройствах.
4. Разработаны и реализованы методы повышения качества ВЭП в гиро-приборах, основанные на регулировании распределений неоднородных электрического и магнитного полей в области формирования пучка.
 - 4.1. В экспериментах показано, что эффективное подавление паразитных низкочастотных колебаний может быть достигнуто при оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП и на участке дрейфа пучка, а также распределения магнитного поля в области перемагничивания.
 - 4.2. Подавление колебаний реализовано за счет введения дополнительных потерь электронов из ловушки и в результате воздействия на инкремент неустойчивости в захваченном в ловушку пространственном заряде.
 - 4.3. С применением разработанных методов подавления колебаний была реализована работа экспериментального гиротрона при больших значениях питч-фактора (более 1.5) и высоком качестве ВЭП, что позволило увеличить в ~ 1.3 раза КПД данного прибора по сравнению с расчетным режимом работы.

4.4. На основании полученных экспериментальных и расчетных данных разработаны технические решения по подавлению паразитных колебаний пространственного заряда и повышению качества формируемого ВЭП, которые могут быть использованы в процессе проектирования и эксплуатации мощных гирорезонансных устройств.

Список цитируемой литературы

- [1] Гапонов А.В. Взаимодействие непрямолинейных электронных потоков с электромагнитными волнами в линиях передачи // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 3. С. 450–462.
- [2] Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Григорьев Д.П. и др. Индуцированное синхротронное излучение электронов в полых резонаторах // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2, № 9. С. 430–435.
- [3] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1414–1453.
- [4] Applications of high-power microwaves / Ed. by A.V. Gaponov-Grekhov, V.L. Granatstein. Norwood, MA: Artech House, 1994. 364 p.
- [5] Gyrotron oscillators: their principles and practice / Ed. by C.J. Edgcombe. Washington, D.C.: Taylor & Francis, 1993. 423 p.
- [6] Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 2004. 352 p.
- [7] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers, update 2009 // KIT Scientific Report 7540, Karlsruhe Institute of Technology, 2010. 120 p.
- [8] Денисов Г.Г., Запечалов В.Е., Литвак А.Г., Мясников В.Е. Гиротроны мегаваттного уровня мощности для систем электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в установках УТС // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10, с. 845–858.
- [9] Litvak A.G., Denisov G.G., Agapova M.V., et al. Recent results of development in Russia of 170 GHz gyrotron for ITER // Dig. 35th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 2010. No. Tu-E1.1.
- [10] Thumm M. High power gyro-devices for plasma heating and other applications // Int. J. Infrared Millim. Waves. 2005. Vol. 26, no. 4. P. 483–503.
- [11] Sakamoto K., Kasugai A., Takahashi K., et al. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron // Nature Physics. 2007. Vol. 3. P. 411–414.
- [12] Lohr J., Cengher M., Deboo J., et al. Performance of the six gyrotron system on the DIII-D tokamak // Dig. 34th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Busan, Korea, 2009. No. R4D03.0203.

- [13] Darbos C., Henderson M. Status of the ITER electron cyclotron H&CD system // Dig. 35th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 2010. No. Tu-P.70.
- [14] Запевалов В.Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 864–871.
- [15] Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R., et al. Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices // Proc. IEEE, 1999. Vol. 87, no. 5. P. 752–781.
- [16] Bratman V., Glyavin M., Idehara T., et al. Review of subterahertz and terahertz gyrodevices at IAP RAS and FIR FU // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37, no. 1. P. 36–43.
- [17] Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M., et al. 24-84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, no. 1. P. 67–72.
- [18] Miyake S. Millimeter-wave materials processing in Japan by high-power gyrotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. Vol. 31, no. 5. P. 1010–1015.
- [19] Цимринг Ш.Е. Формирование винтовых электронных пучков // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (3-я зимняя школа-семинар инженеров). Саратов: Изд-во СГУ, 1974. Кн. 4. С. 3–94.
- [20] Tsimring Sh.E. Gyrotron electron beams: velocity and energy spread and beam instabilities // Int. J. Infrared Millim. Waves. 2001. Vol. 22, no. 10. P. 1433–1468.
- [21] Запевалов В.Е., Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. К теории винтовых пучков с захваченными электронами // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 12. С. 1406–1411.
- [22] Мануилов В.Н. Численное моделирование низкочастотных колебаний пространственного заряда и потенциала в электронно-оптической системе гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 872–879.
- [23] Yan R., Antonsen T.M., Jr. Nusinovich G.S. Analytical theory of low-frequency space charge oscillations in gyrotrons // Phys. Plasmas. 2008. Vol. 15, no. 10. P. 103102–103102-8.
- [24] Иляков Е.В., Кулагин И.С., Мануилов В.Н., Шевченко А.С. Экспериментальное исследование возможности увеличения пичч-фактора интенсивного релятивистского винтового электронного пучка // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 10. С. 855–863.
- [25] Antakov I.I., Gachev I.G., Zasytkin E.V. Self-excitation of spurious oscillations in the drift region of gyrotrons and their influence on gyrotron operation // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. Vol. 22, no. 5. P. 878–882.
- [26] Pedrozzi M., Alberti S., Hogge J.P., et al. Electron beam instabilities in gyrotron beam tunnels // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5, no. 6. P. 2421–2430.
- [27] Kern S., Schlaich A., Flamm J., et al. Investigations on parasitic oscillations in megawatt gyrotron // Dig. 34th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Busan, Korea, 2009. No. T4C01.0132.

- [28] Bratman V.L., Dumbrajs O., Nikkola P., Savilov A.V. Space charge effects as a source of electron energy spread and efficiency degradation in gyrotrons // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. Vol. 28, no. 3. P. 633–637.
- [29] Лыгин В.К., Цимринг Ш.Е., Шевцов Б.И. О диокотронной неустойчивости винтовых электронных пучков // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1991. Т. 34, № 4. С. 419–425.
- [30] Schuldt R., Borie E. Diocotron instability of the electron beam in the drift tube of a gyrotron // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1995. Vol. 16, no. 10. P. 1675–1700.
- [31] Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., et al. Theory of helical electron beams in gyrotrons // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1993. Vol. 14, no. 4. P. 783–816.
- [32] Guss W.C., Basten M.A., Kreisler K.E., Temkin R.J. Velocity spread measurements on a magnetron injection gun beam // *J. Appl. Phys.* 1994. Vol. 76, no. 6. P. 3237–3243.
- [33] Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E. Experimental study of intense helical electron beams with trapped electrons // *Int. J. Electron.* 1996. Vol. 81, no. 2. P. 199–205.
- [34] Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., et al. Advanced numerical and experimental investigation for gyrotrons helical electron beams // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1999. Vol. 20, no. 3. С. 361–382.
- [35] Венедиктов Н.П., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л. и др. Измерение разброса начальной энергии электронов в гиротроне // *ЖТФ.* 2000. Т. 70, № 4. С. 95–98.
- [36] Dumbrajs O., Nikkola P., Piosczyk B. On the negative-mass instability in gyrotrons // *Int. J. Electron.* 2001. Vol. 88, no. 2. P. 215–224.
- [37] Кривошеев П.В., Мануилов В.Н. Учет вторичных электронов при численном моделировании интенсивных винтовых электронных пучков гиротронов // *Прикладная физика.* 2002. № 3. С. 80–86.
- [38] Piosczyk B., Arnold A., Dammertz G., et al. Coaxial cavity gyrotron – recent experimental results // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002. Vol. 30, no. 3. P. 819–827.
- [39] Dammertz G., Alberti S., Arnold A., et al. High-power gyrotron development at Forschungszentrum Karlsruhe for fusion applications // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2006. Vol. 34, no. 2. P. 173–186.
- [40] Glyavin M.Yu., Kuftin A.N., Venediktov N.P., et al. Experimental investigation of emission inhomogeneity of gyrotron cathodes basing on their current-voltage characteristics // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1997. Vol. 18, no. 11. P. 2137–2146.
- [41] Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Kuftin A.N., et al. Experimental studies of gyrotron electron beam systems // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999. Vol. 27, no.2. P. 474–483.
- [42] Anderson J.P., Korbly S.E., Temkin R.J., et al. Design and emission uniformity studies of a 1.5-MW gyrotron electron gun // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2002. Vol. 30, no. 6. P. 2117–2123.
- [43] Anderson J.P., Temkin R.J., Shapiro M.A. Experimental studies of local and global emission uniformity for a magnetron injection gun // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2005. Vol. 52, no. 5. P. 825–828.

- [44] Advani R., Hogge J.P., Kreischer K.E., et al. Experimental investigation of a 140-GHz coaxial gyrotron oscillator // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2001. Vol. 29, no. 6. P. 943–950.
- [45] Pagonakis J.Gr., Vomvoridis J.L. Evolution of an electron beam with azimuthal density nonuniformity in a cylindrical beam tunnel // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. Vol. 32, no. 3. P. 890–898.
- [46] Ives R.L., Borchard P., Collins G., et al. Improved magnetron injection guns for gyrotrons // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36, no. 3. P. 620–630.
- [47] Nusinovich G.S., Botton M. Quasilinear theory of mode interaction in gyrotrons with azimuthally inhomogeneous electron emission // *Phys. Plasmas.* 2001. Vol. 8, no. 3. P. 1029–1036.
- [48] Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., et al. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // *Phys. Plasmas.* 2001. Vol. 8, no. 7. P. 3473–3479.
- [49] Felch K., Blank M., Borchard P., et al. Results of 10-sec pulse tests on a 110 GHz gyrotron // *Proc. Int. Vac. Electron. Conf., Monterey, USA, 2000.* 2 p.
- [50] Запевалов В.Е., Куфтин А.Н., Лыгин В.К., Цимринг Ш.Е. Численное моделирование и экспериментальное исследование магнетронно-инжекторных пушек мощных коротковолновых гиротронов // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1992. Т. 35, № 11–12. С. 999–1007.
- [51] Левчук С.А., Соминский Г.Г., Воскресенский С.В. Экспериментальное определение дисперсионных характеристик электронного облака в неоднородных скрещенных полях // *Письма в ЖТФ.* 1988. Т. 14, № 13. С. 1423–1430.
- [52] Пушкарев С.С., Бондаренко В.А., Галдецкий Н.П. и др. Многоканальный анализатор для измерения частотно-фазовых характеристик волн пространственного заряда в СРЭП // *Приборы и техника эксперимента.* 1989. № 3. С. 31–33.
- [53] Гиротрон: Сборник научных трудов / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. 254 с.
- [54] Hermansfeldt W.B. Electron trajectory program // *SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979.* 119 p.
- [55] Raisky B.V., Tsimring S.E. Numerical simulation of nonstationary processes in intense helical electron beams of gyrotrons // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1996. Vol. 24, no. 3. P. 992–998.
- [56] Manuilov V.N., Krivosheev P.V., Lygin V.K., Tsimring Sh.E. Numerical simulation models of forming systems of intense gyrotron helical electron beams // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 2001. Vol. 22, no. 8. P. 1119–1145.
- [57] Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Мануилов В.Н. Влияние отраженных от магнитного зеркала электронов на формирование электронного пучка в релятивистском гиротроне // *Прикладная физика.* 2006. № 3. С. 121–125.
- [58] Мануилов В.Н., Полушкина С.А. Динамика винтового электронного пучка гиротрона при больших питч-факторах // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2009. Т. 52, № 10. С. 795–803.

- [59] Братман В.Л., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Савилов А.В. Разброс начальной энергии электронов в гиротроне, обусловленный развитием неустойчивости отрицательной массы в магнетронно-инжекционной пушке // ЖТФ. 2000. Т. 70, № 4. С. 90–94.
- [60] Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А. Влияние разброса энергий и скоростей в электронном пучке на стартовые условия и КПД гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 2. С. 121–133.
- [61] Dumbrajs O., Koronen J.P.T. Generalized gyrotron theory with inclusion of electron velocity and energy spreads // Phys. Plasmas. 1999. Vol. 6, no. 6. P. 2618–2621.
- [62] Pu R., Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M., Jr. Effect of the thickness of electron beams on the gyrotron efficiency // Phys. Plasmas. 2010. Vol. 17, no. 8. P. 083105–083105-6.
- [63] O.I. Louksha, G.G. Sominski, and D.V. Kas'yanenko, "Experimental study and numerical modeling of the electron beam formed in the electron-optical system of a gyrotron," J. Comm. Tech. Electron., vol. 45, suppl. 1, pp. S71-S75, 2000.

Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Многоатомные агрегации в диагностике ЭВП // Тез. Всесоюзн. конф. "Методы и средства диагностирования изделий электронной техники", Москва, 1989. С. 72.
- [A2] Louksha O., Tsybin O. Применение распределенной мелкодисперсной мишени для анализа структуры электронного потока // Technical Physics Letters. 1989. Т. 15, № 23. С. 75–78.
- [A3] Архипов А.В., Лукша О.И., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Способ измерения структуры потока заряженных частиц. А. с. 1475470 СССР от 22.12.1988 // Б. И. 1989. № 15.
- [A4] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование колебаний электронного потока в фокусирующем магнитном поле // Тез. Всесоюзн. семинара "Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа", Ленинград, 1990. С. 91.
- [A5] Лукша О.И., Цыбин О.Ю., Шешко О.Л. Применение магнетронно-инжекционной пушки для исследования процессов ионного распыления поверхности твердого тела // Тез. Всесоюзн. совещания-семинара "Диагностика поверхности ионными пучками", Москва, 1990. С. 210.
- [A6] Лукша О.И., Цыбин О.Ю., Шешко О.Л. Анализ вторичных частиц при бомбардировки поверхности молибдена комплексом ионов остаточного газа // Тез. Всесоюзн. конф. по эмиссионной электронике, Ленинград, 1990. Т. 2. С. 180.
- [A7] Цыбин О.Ю., Лукша О.И. Способ настройки электронно-оптической системы прибора магнетронного типа. А. с. 1586448 СССР от 15.04.1990.
- [A8] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Электронно-оптическая система гиротронного типа. А. с. 1686967 СССР от 22.06.1991.
- [A9] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Электронно-оптическая система для СВЧ приборов. А. с. 1697554 СССР от 08.09.1991.

- [A10] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование образования вторичных атомных частиц на катоде электронной пушки // Тез. Всесоюзн. конф. "Взаимодействие ионов с поверхностью", Москва, 1991. Т. 2. С. 31–32.
- [A11] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Исследование образования вторичных частиц при взаимодействии ионов с поверхностью электродов в мощных электронных вакуумных приборах // Тез. Всесоюзн. семинара по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии, Харьков, 1991. С. 67–68.
- [A12] Louksha O., Tsybin O. Исследование характеристик активной среды в электронно-оптической системе гиротронного типа // Труды ЛГТУ. 1991. № 436. С. 39–42.
- [A13] Louksha O., Tsybin O. Ионная диагностика поверхностей эффективных термомоэмиттеров в мощных ЭВП // Научное приборостроение. 1992. Т. 2, № 4. С. 35–42.
- [A14] Louksha O.I., Tsybin O.Yu. Emission of atomic particles from the surface of the thermionic cathode of an electron gun // Technical Physics. 1992. Т. 62, № 10. С. 1041–1043.
- [A15] Лукша О.И., Цыбин О.Ю. Пространственно-временная структура электронного потока в электронно-оптической системе гиротронного типа // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (9-ая зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1993. С. 20–29.
- [A16] Лукша О.И., Толкачев В.Б., Цыбин О.Ю. Вторичные частицы и ограничивающие явления в высокочастотных вакуумных релятивистских устройствах // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (9-ая зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 1993. С. 45–56.
- [A17] Louksha O.I., Tsybin O.Yu. Диагностика поверхности эффективных эмиттеров в мощных электронных вакуумных приборах // Вакуумная техника и технология. 1993. № 1. С. 43–46.
- [A18] O. I. Louksha, and G. G. Sominskii, "Oscillations of the space charge in helical electron beams in systems of the gyrotron type," Technical Physics., vol. 39, no. 11, pp. 1173–1177, 1994.
- [A19] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Лукша О.И. и др. Формирование и диагностика электронных пучков для мощных устройств // Тез. Российской научно-технической конференции "Инновационные наукоемкие технологии для России", Санкт-Петербург, 1995. Ч. 9. С. 32.
- [A20] Андронов А.Н., Лукша О.И., Робозеров С.В., Соминский Г.Г. Проблема создания и исследования эмиттеров для мощных гиротронов // Тез. Российской научно-технической конференции "Инновационные наукоемкие технологии для России", Санкт-Петербург, 1995. Ч. 9. С. 33.
- [A21] O. I. Louksha, and G. G. Sominskii, "Space-time characteristics of collective processes in helical electron beams of gyrotron-type systems," Technical Physics. vol. 40, no. 2, pp. 221–223, 1995.
- [A22] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Лукша О.И., и др. Исследование колебаний объемного заряда и формирования пространственных структур в электронном по-

- токе с магнитным удержанием. Часть 1 // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3, № 4. С. 43–54.
- [A23] Архипов А.В., Богданов Л.Ю., Лукша О.И., и др. Исследование колебаний объемного заряда и формирования пространственных структур в электронном потоке с магнитным удержанием. Часть 2 // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3, № 5. С. 35–58.
- [A24] Andronov A.N., Ilyin V.N., Luksha O.I., et al. Formation and diagnostic of helical electron beams // Dig. 20th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Orlando, USA, 1995, P. 141–142.
- [A25] Louksha O.I., Sominski G.G. Study of space charge oscillations in gyrotron // Proc. 11th Int. Conf. High Power Particle Beams "BEAMS'96", Prague, Czech Rep., 1996. P. 418–421.
- [A26] Louksha O.I., Andronov A.N., Ilyin V.N., Khmara V.A., Kuftin A.N., Lygin V.K., Manuilov V.N., Postnikova A.S., Robozarov S.V., Sominsky G.G., Tsimring Sh.E., Zapevalov V.E., "Formation and diagnostic of a helical gyrotron electron beam", Proc. 11th Int. Conf. High Power Particle Beams "BEAMS'96", 11-14 June 1996, Prague, Czech Rep., 485-488.
- [A27] Andronov A.N., Ilyin V.N., Luksha O.I., et al. Metal-porous cathodes – effective sources of electron emission for high-power gyrotron // Dig. Int. Vacuum Electron Sources Conf., Eindhoven, The Netherlands, 1996. P. G11.
- [A28] Andronov A.N., Ilyin V.N., Louksha O.I., et al. Design and fabrication of electron sources for high-power CW gyrotrons // Dig. Int. Vacuum Electron Sources Conf., Eindhoven, The Netherlands, 1996. P. G13.
- [A29] Borzenkov D.V., Louksha O.I., "Numerical simulation of space-charge dynamics in a gyrotron trap," Technical Physics, vol. 42, no. 9, p. 1071-1074, 1997, DOI: 10.1134/1.1258768.
- [A30] Лукша О.И., Соминский Г.Г. Исследование колебаний пространственного заряда в ловушке гиротрона // Тез. Всеросс. межвузовской конф. "Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ", Саратов, 1997. С. 33–35.
- [A31] Ilyin V.N., Louksha O.I., Mjasnikov V.E., et al. Effect of emission inhomogeneities on low-frequency oscillations in gyrotron-type electron beams // Proc. 12th Int. Conf. High Power Particle Beams "BEAMS'98", Haifa, Israel, 1998. V. 2. P. 800–804.
- [A32] Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Louksha O.I., et al. Experimental studies of gyrotron electron beam systems // Proc. Research Workshop "Cyclotron-resonance masers and gyrotrons", Kibbutz Ma'ale Hachamisha, Israel, 1998. P. 54–55.
- [A33] Louksha O.I., Sominski G.G., Kas'yanenko D.V. Experimental study and numerical simulation of electron beam in gyrotron-type electron-optical system // Proc. Int. University Conf. "Electronics and radiophysics of ultra-high frequencies", St. Petersburg, Russia, 1999, P. 130–133.
- [A34] Louksha O.I., Sominski G.G., Kas'yanenko D.V. Experimental study and numerical modeling of the electron beam formed in the electron-optical system of a gyrotron, J. Comm. Tech. Electron., vol. 45, suppl. 1, pp. S71-S75, 2000.

- [A35] Kas'yanenko D.V., Louksha O.I., Piosczyk B., et al. Low-frequency parasitic oscillations in the 74.2 GHz moderate-power pulse gyrotron // Proc. 5th Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, Russia, 2002. Vol. 1. P. 162–167.
- [A36] Касьяненко Д.В., Лукша О.И., Пиосчик Б. и др. Низкочастотные паразитные колебаний пространственного заряда в винтовом электронном пучке гиротрона // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (12-я зимняя школа-семинар). Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 2003, с. 29–30.
- [A37] Kas'yanenko D.V., Louksha O.I., Piosczyk B., Sominskij G.G., Thumm M. Low-frequency parasitic space-charge oscillations in the helical electron beam of a gyrotron. Radiophysics and Quantum Electronics, 2004, vol. 47, No. 5-6, pp. 463–470.
- [A38] Kas'yanenko D.V., Louksha O.I., Piosczyk B., et al. Experimental investigation of electron energy spectra in collector region of moderate-power millimeter-wave gyrotron // Proc. 10th ITG-Conf. Displays and Vacuum Electronics, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2004. P. 81–86.
- [A39] Kas'yanenko D., Louksha O., Piosczyk B., et al. Measurements of electron beam characteristics in the moderate-power 4-mm gyrotron // Dig. Joint 29th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 12th Int. Conf. Terahertz Electronics, Karlsruhe, Germany, 2004. P. 661–662.
- [A40] Louksha O., Piosczyk B., Sominski G., et al. Electron emission inhomogeneity and low-frequency parasitic oscillations in a gyrotron // Proc. 7th Workshop High Energy Density and High Power RF, Kalamata, Greece, 2005. P. 219–220.
- [A41] Louksha O.I., Piosczyk B., Sominski G.G., et al. Effect of electron emission inhomogeneity on electron beam characteristics and output parameters of a 4-mm gyrotron // Proc. 6th Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, Russia, 2005. Vol. 1. P. 135–140.
- [A42] Louksha O., Piosczyk B., Sominski G., et al. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. Vol. 34, no. 3. P. 502–511.
- [A43] О.И. Лукша, Пиосчик Б., Соминский Г.Г., Тумм М., Самсонов Д.Б. Мощные гиротроны для систем управляемого термоядерного синтеза и технологии: поиск путей повышения эффективности // Energy and Power Engineering. 2006. № 5. С. 131–146.
- [A44] Лукша О.И., Пиосчик Б., Соминский Г.Г. и др. Улучшение качества винтового электронного пучка – путь к повышению эффективности гиротронов // Материалы 13-ой зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике, Саратов, 2006. С. 44–45.
- [A45] Лукша О.И., Пиосчик Б., Соминский Г.Г. и др. Подавление паразитных колебаний пространственного заряда в гиротроне // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 880–886.
- [A46] Louksha O., Piosczyk B., Samsonov D., et al. Improvement of gyrotron beam quality by suppression of parasitic low-frequency oscillations // Dig. Joint 31st Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 14th Int. Conf. Terahertz Electronics, Shanghai, China, 2006. P. 85.

- [A47] Louksha O., Piosczyk B., Sominski G., Thumm M. An experimental facility for investigation of gyrotron cathode emission non-uniformities // Dig. Joint 31st Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves and 14th Int. Conf. Terahertz Electronics, Shanghai, China, 2006. P. 86.
- [A48] Лукша О.И., Паутов В.Л., Пиосчик Б. и др. Исследование катодов для мощных гиротронов миллиметрового диапазона длин волн // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 1. С. 291–294.
- [A49] Louksha O., Piosczyk B., Samsonov D., et al. Experimental study of gyrotron efficiency enhancement by improvement of electron beam quality // Dig. Joint 32nd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. P. 880–881.
- [A50] Dammertz G., Louksha O., Sominski G., Thumm M. On the possibility to use the treatment of gyrotron cathodes by the potassium ion flow for their emission homogeneity increase // Dig. Joint 32nd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, and 15th Int. Conf. Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2007. P. 690–691.
- [A51] Louksha O., Sominski G., Samsonov D., et al. Effect of ion bombardment on emission characteristics of gyrotron cathodes // Dig. 35th IEEE Int. Conf. Plasma Science, Karlsruhe, Germany, 2008. P. 226.
- [A52] Лукша О.И., Соминский Г.Г., Самсонов Д.Б. и др. Исследование возможностей использования ионной обработки для повышения качества гиротронных катодов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 3. С. 129–141.
- [A53] Лукша О.И., Соминский Г.Г., Самсонов Д.Б. и др. Повышение качества гиротронных катодов с помощью ионной обработки // Материалы научно-практической конф. "Научные исследования и инновационная деятельность", Санкт-Петербург, 2008. С. 318–323.
- [A54] Лукша О.И. Низкочастотные коллективные процессы в электронных потоках гиротронов: эксперимент и численное моделирование // Материалы 14-ой международной зимней школы-семинара по электронике СВЧ и радиофизике, Саратов, 2009. С. 71.
- [A55] Luksha O.I. Simulation of low-frequency collective processes in gyrotron electron beams. Radiophysics and Quantum Electronics, 2009, vol. 52, No. 5-6, pp. 386–397.
- [A56] Лукша О.И., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Цапов А.А. Применение ионной обработки для повышения качества гиротронных катодов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Физико-математические науки. 2009. № 4 (88). С. 133–140.
- [A57] Louksha O. Numerical simulation of low-frequency collective processes in gyrotron electron beams // Dig. 35th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 2010. No. Tu-E3.4.
- [A58] Louksha O., Samsonov D., Sominski G., Tsapov A. Effect of electric field distribution in the magnetron-injection gun region on electron beam characteristics in gyrotrons // Dig. 35th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 2010. No We-P.12.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	6
Глава 1. Экспериментальные приборы и методы измерений	21
1.1. Электронно-оптические системы гирорезонансных устройств и методы диагностики ВЭП (обзор)	21
1.2. Экспериментальные приборы и установки	32
1.2.1. Экспериментальный импульсный гиротрон 4-миллиметрового диапазона длин волн излучения	32
1.2.2. Электронно-оптические системы гиротронного типа	38
1.2.3. Установка для диагностики и модификации эмиссионных характеристик гиротронных катодов	41
1.3. Экспериментальные методики	44
1.3.1. Метод исследования неоднородности эмиссии термокатода МИП	44
1.3.2. Методы исследования пространственной структуры ВЭП	50
1.3.3. Методики исследования скоростных и энергетических спектров электронов в ВЭП	53
1.3.4. Методика исследования колебаний пространственного заряда ВЭП	62
1.3.5. Метод измерения параметров потока электронов на катод	65
1.3.6. Методики регулирования распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП	67
1.3.6.1. Регулирование распределения электрического поля в области МИП ..	67
1.3.6.2. Регулирование распределения магнитного поля в области компрессии ВЭП	70
1.3.6.3. Создание регулируемого электрического поля в области компрессии ВЭП	72
1.4. Диагностика и обработка гиротронных термокатодов	75
1.5. Выводы	90
Глава 2. Низкочастотные колебания пространственного заряда в ВЭП устройств гиротронного типа	92
2.1. Коллективные процессы в пространственном заряде ВЭП гирорезонансных устройств (обзор)	92
2.2. Результаты экспериментального исследования низкочастотных колебаний пространственного заряда ВЭП	99
2.2.1. Характеристики колебаний пространственного заряда в электронно- оптических системах гиротронного типа	99
2.2.2. Характеристики низкочастотных колебаний в экспериментальном гиротроне	116
2.3. Выводы	125
Глава 3. Численное моделирование динамики пространственного заряда в ловушке гиротрона	127
3.1. Методы расчета электронных процессов в ловушке гиротрона и полученные результаты (обзор)	127
3.2. Методика расчета динамики пространственного заряда в ловушке гиротрона с помощью PIC кода GyroTrap	133
3.3. Результаты численного моделирования электронных процессов в ловушке гиротрона с помощью кода GyroTrap	140
3.3.1. Накопление и группировка пространственного заряда в ловушке	140
3.3.2. Характеристики спектров низкочастотных колебаний	149
3.3.3. Влияние распределения магнитного поля в области компрессии ВЭП на характеристики НЧК	152

3.3.4. Влияние захваченного в ловушку объемного заряда на характеристики формируемого в ЭОС гиротрона электронного потока.....	158
3.4. Выводы	166
Глава 4. Влияние эмиссионных неоднородностей термокатода на характеристики ВЭП и выходные параметры гиротрона.....	168
4.1. Экспериментальные методы исследования неоднородности эмиссии термокатодов МИП и влияние данного фактора на работу гироприборов (обзор)	168
4.2. Результаты экспериментального исследования влияния эмиссионных неоднородностей катода на характеристики ВЭП и выходные параметры гиротрона	173
4.2.1. Азимутальное распределение плотности пространственного заряда электронов в ВЭП	173
4.2.2. Влияние эмиссионных неоднородностей на характеристики ВЭП в электронно-оптических системах гиротронного типа	175
4.2.3. Влияние эмиссионных неоднородностей на характеристики низкочастотных колебаний и выходные параметры экспериментального гиротрона	180
4.3. Выводы	186
Глава 5. Влияние низкочастотных колебаний пространственного заряда на характеристики ВЭП.....	188
5.1. Переменные поля пространственного заряда – фактор снижения качества ВЭП в ЭОС гироприборов (обзор).....	188
5.2. Энергетические спектры электронов в гиротроне	193
5.2.1. Распределение электронов по энергии в присутствии СВЧ генерации	193
5.2.2. Влияние низкочастотных колебаний на разброс энергий электронов в ВЭП.	195
5.3. Пространственная структура электронного потока в ЭОС гиротронного типа	202
5.4. Электронная бомбардировка катода МИП.....	207
5.5. Выводы	209
Глава 6. Управление низкочастотными колебаниями пространственного заряда ВЭП с помощью регулируемых неоднородностей электрического и магнитного полей	211
6.1. Оптимизация распределений электрического и магнитного полей – способ повышения качества ВЭП в электронно-оптической системе гироприборов (обзор).....	211
6.2. Методы подавления низкочастотных колебаний при введении регулируемых неоднородностей электрического поля в электронно-оптических системах гиротронного типа	216
6.3. Влияние распределения магнитного поля в области компрессии ВЭП на характеристики НЧК	221
6.4. Влияние распределения электрического поля в прикатодной области МИП на характеристики ВЭП в экспериментальном гиротроне	230
6.4.1. Подавление паразитных НЧ колебаний в гиротроне с модифицированной катодной системой.....	230
6.4.2. Изменение характеристик ВЭП при регулировании распределения электрического поля в области МИП с помощью управляющего катодного электрода	233
6.5. Подавление паразитных колебаний в гиротроне путем одновременной оптимизации распределений электрического и магнитного полей.....	238
6.6. Работа экспериментального гиротрона в режимах с повышенным питч-фактором и подавленными паразитными колебаниями	241
6.7. Выводы	244
Заключение	246
Список литературы.....	252
Список публикаций автора по теме диссертации.....	279

Лукша Олег Игоревич

**ВИНТОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ ГИРОТРОНОВ:
ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА**

Автореферат

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Цифровом типографском центре Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76