

*На правах рукописи*

Седов Антон Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ  
ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ СРЕДНЕЙ  
МОЩНОСТИ**

01.04.03 – «радиофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

### **Научный руководитель**

Запевалов Владимир Евгеньевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

### **Официальные оппоненты**

Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Соминский Геннадий Гиршевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого»

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ РАН, г.Москва)

Защита состоится «25» апреля 2016 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 при ИПФ РАН (603950 г. Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Ю. В. Чугунов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Одной из актуальных задач современной радиофизики является повышение рабочей частоты электронных приборов и освоение ими субтерагерцового и терагерцового диапазона. Перспективным видом приборов в данном диапазоне являются мазеры на циклотронном резонансе – устройства, основанные на индуцированном магнитотормозном излучении электронов, вращающихся в статическом магнитном поле [1]. Наиболее известным и широко распространенным вариантом МЦР является гиротрон, основными особенностями которого является использование адиабатической магнетронно-инжекторной пушки с сильной компрессией электронного потока и открытого высокоселективного резонатора с дифракционным выводом энергии.

Основными подсистемами гиротрона являются: электронно-оптическая система, формирующая винтовой электронный пучок с высокой долей вращательной энергии и малым разбросом скоростей; электродинамическая система, в которой происходит взаимодействие пучка с одной из собственных мод; коллектор электронного пучка; система вывода, включающую согласованное выходное окно и во многих случаях квазиоптический преобразователь рабочей моды в узконаправленный волновой пучок [2]. Для работы гиротрона необходима магнитная система, (обычно в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне это криомагниты или импульсные магниты), создающая магнитное поле для формирования электронного потока и обеспечения резонансного взаимодействия электронов с высокочастотным полем.

Гиротрон является автогенератором, в котором энергия вращения электронов в сильном магнитном поле переходит в ВЧ излучение, в условиях гирорезонанса. Взаимодействие электронного пучка с одной из собственных мод круглого волновода происходит около частоты отсечки [3,4]. Поскольку взаимодействие электронного пучка происходит с быстрой волной, распространяющейся практически поперек поступательного движения электронов, отсутствует необходимость в мелкомасштабных элементах замедляющих систем, принципиально необходимых для классических приборов вакуумной электроники, и обеспечивается слабая чувствительность к скоростному разбросу.

В результате многолетних исследований в гиротронах реализованы высокие значения КПД (до 70% в системах с одноступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов [5]) и мощность (2 МВт на частоте 0.17 ТГц [6] и 0.2 МВт на частоте 0.67 ТГц [7]). Таким образом, мощность излучения (и эффективность) гиротронов на несколько порядков превосходят мощности твердотельных генераторов [8] и классических приборов вакуумной электроники (ЛОВ, оротроны и клинотроны [9]), а размеры, рабочие напряжения и стоимость значительно ниже, чем в лазерах на свободных электронах

(ЛСЭ) [10]. Гиротроны и их модификации (гироклистроны, гиро-ЛОВ, гиро-ЛБВ) успешно используются для задач электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦН), стабилизации и активной диагностики плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), создания мощных систем радиолокации миллиметрового диапазона длин волн, высокотемпературной обработки материалов, диагностики различных сред и других приложений [2].

Долгое время основными задачами, стоявшими перед разработчиками и исследователями гиротронов, были повышение частоты, КПД, мощности и длительности импульса излучения. С развитием новых приложений к вышеперечисленным задачам добавились следующие требования: высокая стабильность частоты и мощности, расширение полосы плавной перестройки частоты, увеличение срока службы прибора, простота и удобство работы персонала при использовании гиротронных комплексов.

В настоящее время все больше внимание уделяется освоению гиротронами терагерцового диапазона частот (0.1–10 ТГц) [11]. Терагерцовые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая развитие методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения [12]. Мощное терагерцовое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления её параметрами (управляемый термоядерный синтез, "точечные" плазменные источники рентгеновского излучения, дистанционное обнаружение источников ионизирующего излучения) [13].

Первые эксперименты по генерации ТГц излучения гироприборами были проведены сотрудниками НИРФИ в 1970 - 80-х гг.: созданы непрерывный гиротрон с частотой 0.315 ТГц и рекордной для того времени мощностью 1.6 кВт [14] и непрерывный гиротрон с рабочими частотами 0.25 ТГц и 0.28 ТГц [15]. После первых успехов интенсивность работ по данному направлению снизилась, поскольку на первый план выдвинулась задача создания мегаваттных источников для электронно-циклотронного нагрева плазмы и управления током в установках УТС. В начале 2000-х работы по освоению ТГц диапазона получили новый импульс, инициированный ростом числа перспективных приложений, в частности спектроскопией высокого разрешения. В настоящее время работы по созданию терагерцовых гиротронов ведутся в ряде мировых ведущих научных центров, занимающихся вакуумной электроникой.

Зарубежные разработки терагерцовых гиротронов и их приложений ведутся в основном в исследовательском центре по изучению дальнего инфракрасного диапазона (FIR FU, Фукуи, Япония) [16]; Массачусетском Технологическом Институте (MIT, США) [17], Университете Мэриленда (UMD) [18], научно-исследовательской компании CCR (*Calabasas Creek Research, Inc.*, США) [19], Терагерцовом научном центре (THz RC, Ченду, Китай) [20]. Созданы коммерческие фирмы (например, Bridge 12, США) [21] и подразделе-

ние компании Bruker-Biospin (совместно с CPI, США) [22], основной деятельностью которых является создание гиротронов и гиротронных комплексов для спектроскопии высокого разрешения. В ИПФ РАН также в последние годы были достигнуты рекордные значения частоты и мощности (частота 1 ТГц при мощности 1.5 кВт) в импульсном режиме генерации [23], а также созданы непрерывные высокостабильные гиротроны на частотах около 0.26 ТГц [24].

В ходе освоения терагерцового диапазона приходится решать ряд новых физических и технических задач, связанных, прежде всего, с обеспечением эффективного селективного возбуждения рабочего типа колебаний при обеспечении на заданном потребителем уровне мощности и приемлемых тепловых нагрузок на конструктивных элементах прибора. Повышение выходной частоты излучения требует соответствующего увеличения магнитного поля в пространстве взаимодействия, что приводит к существенному усложнению и удорожанию магнитной системы. Одним из возможных решений указанной проблемы представляется переход к работе на гармониках гирочастоты. При этом возникает сильная конкуренция со стороны мод резонатора, синхронных с низшими гармониками гирочастоты, так как их стартовые токи на порядок меньше, чем стартовые токи рабочих мод на высших гармониках. Таким образом, приходится использовать в качестве рабочих моды сравнительно низкого порядка. С уменьшением характерных поперечных размеров резонатора, определяемых длиной волны излучения (и смещением максимума фактора возбуждения рабочей моды к оси системы.), радиус электронного пучка в резонаторе соответственно также существенно уменьшается. Сочетание указанных факторов приводит к тому, что эффективная площадь поперечного сечения пучка и, соответственно, максимальная величина электронного тока, заметно снижается. Уменьшение объема используемого резонатора, а также увеличение частоты приводит и к существенному росту омических потерь в резонаторе - вплоть до уровня 80-90% от генерируемой мощности.

Таким образом, оптимизация высокочастотных гиротронов, являвшаяся одной из целей диссертационной работы, заключается, главным образом, в выборе параметров электродинамической системы и электронного пучка, при которой достигается высокий КПД и осуществляется эффективная селекция рабочей моды и подавление паразитных мод. Последнее особенно важно в гиротронах, работающих на гармониках гирочастоты. При этом селекция может осуществляться, как применением различных типов резонаторов (электродинамическая селекция), так и подбором параметров электронного пучка (электронная селекция), в частности, использованием приосевого электронного потока в так называемых гиротронах с большой орбитой [25]

## **Цель работы**

1. Изучение специфики процессов электронно-волнового взаимодействия в субмиллиметровых гиротронах как на теоретическом, так и на экспериментальном уровне.

2. Сравнение полученных экспериментальных и теоретических данных, выявление и изучение основных эффектов, важных для оптимизации и разработки будущих субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов.

3. Оптимизация параметров электродинамических систем субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов для достижения требуемого уровня КПД, мощности и частоты генерации, а также их высокой стабильности в долговременном непрерывном режиме работы.

4. Изучение способов подавления паразитной генерации мод на более низких гармониках в различных электродинамических системах для дальнейшего продвижения гиротронов в терагерцовый диапазон, а также с целью повышения КПД и мощности излучения при использовании более высоких рабочих токов.

5. Увеличение полосы перестройки частоты в субтерагерцовых и терагерцовых гиротронах при сохранении высокого уровня КПД.

## **Научная новизна работы**

Научная новизна диссертации состоит в том, что впервые в России были созданы высокостабильные гиротроны средней мощности терагерцового диапазона частот для перспективных научно-технических приложений. Были предложены новые электродинамические системы с повышенной селекцией для повышения рабочей частоты терагерцовых гиротронов.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Оптимизация слабонерегулярных цилиндрических резонаторов позволяет реализовать гиротроны на второй гармонике гирочастоты, работающие в диапазоне частот 0.2-0.8 ТГц с выходной мощностью в сотни ватт.

2. Применение цилиндрических резонаторов ступенчатого профиля позволяет реализовать в гиротронах одномодовую генерацию на частотах вплоть до 2 ТГц на второй циклотронной гармонике.

3. Согласованное изменение рабочего магнитного поля и температуры охлаждающей жидкости резонатора позволяет осуществить плавную перестройку частоты генерации в полосе, составляющей несколько десятых долей процента, при сохранении выходной мощности.

4. Использование электродинамической системы с выводом излучения навстречу электронному пучку увеличивает полосу плавной перестройки частоты гиротрона в полтора раза по сравнению с традиционными гиротронами.

5. В субтерагерцовых гиротронах с уровнем мощности сотни ватт, возможно достижение долговременной стабильности частоты на уровне  $Df/f \sim 5 \cdot 10^{-6}$ , достаточной для задач спектроскопии на основе динамической поляризации ядер с использованием ядерного магнитного резонанса.

### **Практическая и научная ценность**

Практическая и научная значимость работы обусловлена ее направленностью на исследования процессов электронно-волнового взаимодействия в субтерагерцовых и терагерцовых гиротронах. Детальное изучение указанных процессов будет способствовать созданию нового поколения гиросприборов с уникальными характеристиками для широкого спектра научных и технических приложений. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть использованы при дальнейших исследованиях, разработках, производстве и приложениях субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов, проводимых в различных научных учреждениях и научно-производственных предприятиях.

### **Степень достоверности результатов работы**

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена хорошим соответствием теоретических и экспериментальных данных, а также комплексным подходом к изучению процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротронах с использованием как простых аналитических моделей, так и более сложных моделей, основанных на самосогласованной системе усредненных уравнений и на трехмерном моделировании с использованием современных специализированных пакетов программ. Наглядность проведенных экспериментальных и теоретических исследований позволяют считать, что сформулированные в диссертации положения и выводы обладают высокой степенью достоверности. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях, а также обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

### **Личный вклад автора**

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1-A55], получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании электронно-волнового взаимодействия в гиросприборах, численном моделировании различных режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов и статей. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Большая часть

численных расчетов выполнена автором диссертации лично. Экспериментальное исследование проводилось в составе группы ученых и инженеров, работавших на гиротронных комплексах. Обработка результатов экспериментов проводилась автором лично (гл.3) или при непосредственном участии автора (гл.4). Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

### **Публикации и апробация работы**

Основные результаты работы опубликованы в реферируемых российских и зарубежных журналах [А1-А14] и докладывались на Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Бусан, Корея 2009, Рим, Италия 2010), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н.Новгород 2010,2014; Карлсруэ, Германия 2011, 2013 ), Международных семинарах по мощным СВЧ-источникам и их приложениям, (Н. Новгород 2008, 2011, 2014.), Зимних школах-семинарах по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов 2009, 2012, 2015), Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015), Харьковских конференциях молодых ученых (Харьков, Украина 2009, 2011, 2013), Международных Харьковских симпозиумах по физике и инженерии миллиметровых, субмиллиметровых и терагерцевых волн (Харьков, Украина 2010, 2013), Всероссийских семинарах по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н.Новгород 2009, 2011, 2013, 2016), Нижегородских сессиях молодых ученых (Н.Новгород 2008, 2009), Координационном научно-техническом семинаре по СВЧ-технике (Н.Новгород 2009), Научных конференциях ННГУ по радиофизике, (Н.Новгород 2010, 2011, 2012, 2013, 2014), Школах молодых ученых «Актуальные проблемы современной физики» (Звенигород 2010, 2012), Конкурсе молодых ученых ИПФ РАН (Н.Новгород 2011,2015), а также на семинарах по вакуумной электронике, проводимых в ИПФ РАН

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 164 страницы, включая 65 рисунков. Список литературы содержит 87 наименований.

#### **Основное содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной тематики исследований, определена цель и решаемые задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации и ее краткое содержание.

В **первой главе** исследованы режимы генерации ранее созданных и испытанных субтерагерцевых гиротронов. В п.1.1 дается краткий исторический обзор освоения субтерагерцевого и терагерцевого диапазона гиросприборами, описание основных современных результатов по данной тематике и сопо-



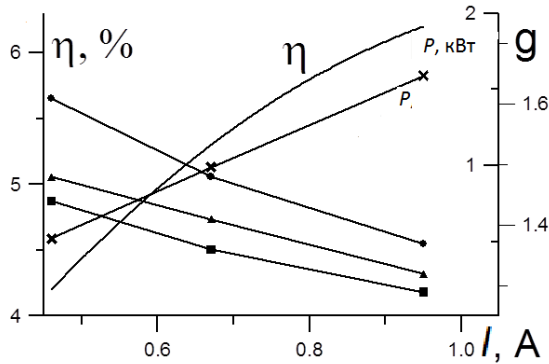
ставление разработок, проводимых в ИПФ РАН с мировым уровнем. Описаны расчетные модели, используемые для анализа процессов электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.

В п. 1.2 представлены результаты численного моделирования режимов генерации излучения в непрерывном гиротроне на второй гирогармонике с частотой 0,315 ТГц и рабочей модой  $TE_{-2,3}$  (знак минус соответствует противоположным направлениям вращения электронов и электрической компоненты поля рабочей моды) и их сопоставление с результатами эксперимента. Определены соответствовавшие условиям эксперимента параметры электронного пучка (рис. 1): питч-фактор – отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения вдоль оси симметрии системы и разброс вращательных скоростей электронов. Также в п.1.2 рассматривается непрерывный гиротрон средней мощности на основном циклотронном резонансе с рабочей модой  $TE_{22,8}$  и частотой генерации 0,3 ТГц. В ходе экспериментов КПД данного гиротрона оказался ниже расчетного, а также наблюдались режимы двухчастотной генерации. Для объяснения данных эффектов было проведено моделирование, учитывающее влияние точности юстировок (несоосность траектории ведущих центров электронных орбит и оси резонатора) на выходные характеристики гиротрона.

Далее в п.1.2. представлены результаты аналогичного исследования для гиротронов на второй гирогармонике с частотами 0,25 ТГц на рабочей моде  $TE_{65}$  и 0,28 ТГц на моде  $TE_{85}$ . При моделировании были учтены такие факторы, как неоптимальность радиуса ведущих центров электронного пучка, а также отражение выходного сигнала от окна гиротрона, что позволило с высокой точностью определить зоны генерации не только рабочей, но и соседних мод, работающих, как на первой, так и на второй гармониках гирочастоты. Полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Найденные при анализе рассмотренных в п.1.2-1.3 гиротронов значения питч-факторов и разбросов скоростей электронного пучка соответствуют результатам траекторного анализа магнетронно-инжекторных пушек (МИП) [26] и близки к данным, экспериментально полученным при близких значениях интенсивности магнитного поля в гиротронах диапазона 0,11-0,17 ТГц на первой гармонике гирочастоты [27]. Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует об адекватности введения эмпирического коэффициента (равного  $\frac{1}{2}$ ) при определении проводимости стенок резонатора и последующем расчете омической добротности

Таким образом, исследование зон генерации как рабочей, так и паразитных мод в вышеперечисленных гиротронах и сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило выявить влияние на режимы генерации таких факторов, как отклонение ведущих центров электронных орбит от оптимального значения; несоосности электронного пучка и оси резонатора пространственный заряд электронного пучка; отражение волн от выходного окна. Полученные результаты актуальны для проектирования и оптимизации вновь

разрабатываемых приборов. Во **второй главе** обсуждаются вопросы теоретического исследования и численного моделирования новых субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов. В п.2.1 рассматриваются некоторые вопросы теории ТГц гиротронов с электродинамической системой в виде отрезка цилиндрического волновода круглого сечения с закритическим сужением и выходным расширением. Для актуального случая работы при низких напряжениях, на плоскости параметр тока - омические потери построены линии изо-КПД для первых трех гармоник циклотронной частоты. Также получены оценки, позволяющие прогнозировать возбуждение паразитных мод в зоне генерации рабочей моды.



**Рис. 1.** Толстые линии - экспериментальные зависимости КПД ( $\eta$ ) и мощности излучения ( $P$ ) от тока гиротрона ( $I$ ) на частоте 0.315 ТГц, тонкие линии - расчетные значения пичч-фактора ( $g$ ), для которых результаты численного моделирования совпадают с экспериментальными данными (кружки-относительный поперечный разброс скоростей  $\delta\nu_{\perp} = 0$ , треугольники -  $\delta\nu_{\perp} = 0.3$ , квадраты -  $\delta\nu_{\perp} = 0.4$ ).

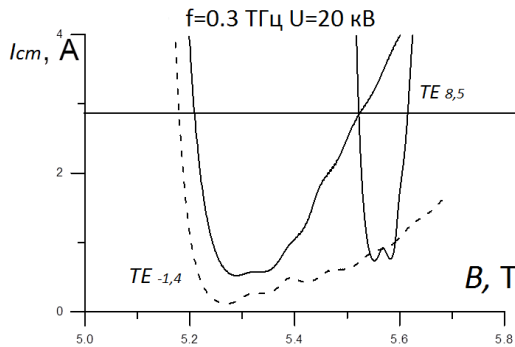
Далее приводятся результаты численного моделирования нескольких гиротронов в диапазоне 0,25 - 0,8 ТГц на различных гармониках гирочастоты. Показана возможность достижения выходной мощности порядка 100 Вт при относительно низких ускоряющих напряжениях (15 - 20 кВ) и рабочих токах электронного пучка (0.5 А) для гиротронов на второй гармонике гирочастоты. Выходной КПД при этом составляет несколько процентов, омические потери растут с повышением частоты и могут составлять до 90 % генерируемой мощности.

В п.2.2 обсуждаются возможности и способы увеличения полосы плавной перестройки частоты генерации гиротронов. Одним из них является возбуждение мод с большим числом продольных вариаций высокочастотного (ВЧ) поля. Для этого предлагается использовать слабо-конический резонатор с малым углом раскрытия, а для получения близких значений мощности на всех типах колебаний предлагается использовать согласованную перестройку, как магнитного поля, так и радиуса резонатора при помощи изменения его темпе-

ратуры, что можно обеспечить, например, управлением температуры охлаждающей резонатор воды.

Другим предложенным способом увеличения полосы перестройки является использование электродинамической системы с выводом выходного излучения в сторону катода. При этом структура поля в резонаторе становится более близкой к структуре giro-ЛОВ [28], что позволяет добиться относительно плавной перестройки частоты при сохранении высокого уровня КПД

В п.2.3 обсуждаются возможные варианты электродинамических систем гиротронов на гармониках гирочастоты с улучшенными селективными свойствами. В частности, рассматривается профиль резонатора, представляющий собой аксиально-симметричную периодическую структуру с медленно меняющейся амплитудой, то есть, фактически, набор кольцевых канавок, глубина которых медленно меняется вдоль оси резонатора. При этом можно подобрать профиль огибающей таким образом, чтобы для рабочей моды на второй гармонике гирочастоты критическая частота не зависела от продольной координаты, в отличие от критической частоты паразитной моды. Для рассматриваемого примера гиротрона с частотой 0.3 ТГц, работающего на второй гармонике гирочастоты показано, что при использовании гофрировки стартовый ток паразитной моды на первой гармонике в зоне генерации рабочей моды увеличивается примерно в 5 раз при сохранении стартового тока рабочей на то же уровне (Рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимости стартовых токов ( $I_{cm}$ ) рабочей моды  $TE_{8,5}$  и ее основного конкурента - моды  $TE_{-1,4}$  от магнитного поля ( $B$ ). Пунктирная линия - случай цилиндрического резонатора. Сплошные линии - гофрированный резонатор.

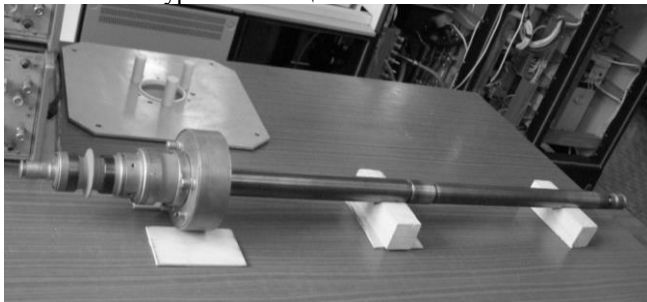
Также в п.2.3 обсуждается проект гиротрона с частотой 2 ТГц, основанный на двухступенчатом резонаторе с трансформацией мод (со связанными модами). Реализация этого проекта предполагается в существующем импульсном соленоиде с индукцией магнитного поля до 50 Тл.

В **третьей главе** рассмотрены вопросы, связанные теоретическим и экспериментальным исследованием непрерывного гиротрона на второй гирогармонике с рабочей частотой 0,258 ТГц и мощностью до 200 Вт для работы в

составе гиротронного комплекса. Данный гиротрон создавался как источник микроволнового излучения в ЯМР спектроскопическом комплексе, ориентированном на исследование веществ с использованием процессов динамической поляризации ядер (ДПЯ) в Институте биофизической химии университета имени И.В. Гете, г. Франкфурта на Майне (Германия).

В п.3.1 приведены основные результаты расчетов, выполненных при разработке прибора. В качестве рабочего типа колебаний была выбрана мода  $TE_{-2,3}$ . В процессе расчетов были определены оптимальные по КПД параметры резонатора. Одним из основных требований к данному гиротрону, обусловленному спецификой решаемой задачи, было поддержание высокой стабильности частоты и мощности излучения ( $10^{-5}$  и  $10^{-1}$ , соответственно) в течение длительного (12 часов) времени работы в непрерывном режиме. Для оценки необходимой стабильности технических параметров было выполнено численное моделирование, демонстрирующее величину дрейфа мощности и частоты излучения при изменении индукции магнитного поля, напряжения и тока электронного пучка.

В п.3.2 излагаются результаты экспериментов с описанным выше гиротроном (Рис. 3). Максимальная мощность излучения достигала 180 Вт при КПД 3.7 % (Рис. 4). Были измерены частота генерации (0.2589 ТГц) и омические потери в резонаторе. При изменении магнитного поля наблюдалась возбуждение соседних мод  $TE_{0,3}$  и  $TE_{4,2}$ , при этом мощность генерации моды  $TE_{0,3}$  (150 Вт) на частоте 0.254 ТГц оказалась сравнима с мощностью рабочей моды. Стабильность частоты гиротрона составила  $5 \cdot 10^{-6}$ , а мощности 1 % в течение нескольких часов непрерывной работы, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым для спектроскопии высокого разрешения. Использование данного гиротрона позволило увеличить чувствительность ЯМР-спектрометра в 80 раз [29]. В п.3.3 представлены результаты анализа, выполненного для определения причин, обусловивших отличия расчетных и экспериментальных результатов. В частности, было показано, что наличие несоосности пучка и резонатора величиной 0.3-0.4 мм может объяснить такие наблюдавшиеся эффекты, как образование стоячей волны и возбуждение соседних мод с относительно высоким уровнем мощности.



**Рис. 3.** Внешний вид гиротрона с рабочей частотой 0.258 ТГц

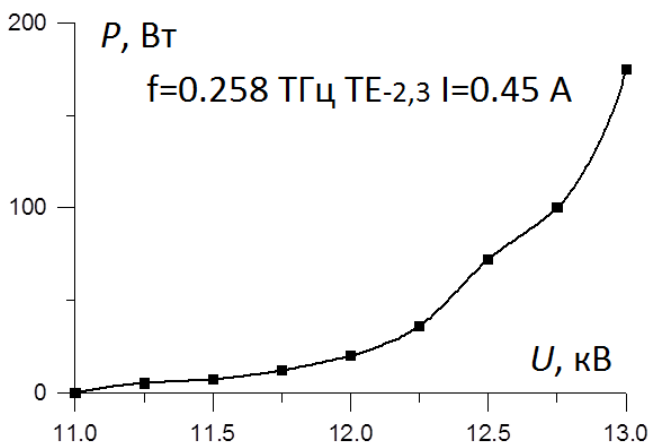


Рис. 4 Зависимость мощности ( $P$ ) гиротрона на частоте 0.258 ТГц от ускоряющего напряжения ( $U$ ) для рабочей моды при токе 0.45 А

В четвертой главе излагаются результаты теоретического исследования и экспериментальные данные, связанные с разработкой гиротрона с частотой 0.263 ТГц на первой гармонике гирочастоты.

В п.4.1 обсуждаются вопросы, связанные с оптимизацией и разработкой основных узлов гиротрона (магнетронно инжекционной пушки, резонатора, коллектора, встроенного квазиоптического преобразователя), а также описывается разработанная для данного комплекса автоматизированная система управления. В ходе оптимизации и выбора параметров учитывается предыдущий опыт разработки и экспериментального исследования гиротрона, полученные в третьей главе. Длина цилиндрической части резонатора выбрана таким образом, чтобы получать генерацию в широком диапазоне токов пучка при сохранении приемлемого уровня КПД. Оценивается влияние несоосности электронного пучка на выходные характеристики гиротрона.

В п.4.2 приводятся результаты экспериментов, проведенных на данном гиротронном комплексе. Получены зависимости выходной мощности от параметров для различных режимов работы (Рис.5). Максимальная мощность составила величину более 0,9 кВт при токе электронного пучка  $I = 0.4$  А, катодном напряжении 15 кВ, что соответствует КПД около 17%. Эти данные хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных на этапе разработки и проектирования гиротрона. Также был экспериментально реализован режим генерации при очень малом токе электронного пучка 0,02 А, в котором было получено достаточное для указанных приложений значение мощности 10 Вт с КПД около 3%. В процессе проведенных экспериментальных исследований были измерены омические потери в стенке резонатора. Полученные данные в целом согласуются аналогичным измерениям, выполненным в главе 3.

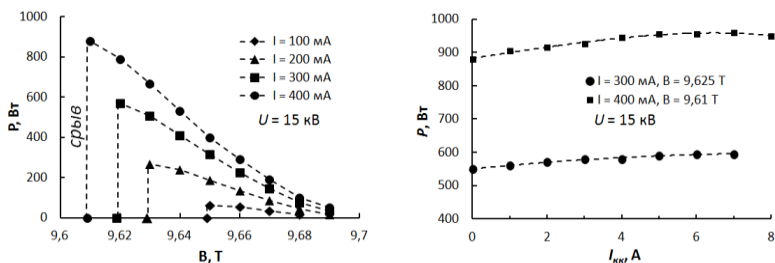


Рис.5. Зависимости мощности генерации ( $P$ ) гиротрона на частоте 0.263 ТГц от различных параметров (магнитного поля  $B$ , тока пучка  $I$ , тока катодной катушки  $I_{\text{кат}}$ ).

### Основные результаты диссертационной работы

1. Впервые в России созданы гиротроны субтерагерцового диапазона частот средней мощности для многочисленных научно-технических приложений, в том числе для задач спектроскопии на основе динамической поляризации ядер с использованием ядерного магнитного резонанса. Продемонстрирована необходимая для спектроскопических исследований стабильность выходной частоты  $5 \cdot 10^{-6}$  в течение нескольких часов непрерывной работы.

2. Предложен механизм комбинированной перестройки частоты генерации согласованным изменением магнитного поля в рабочем пространстве и температуры резонатора, с использованием режимов с несколькими продольными вариациями высокочастотного поля в резонаторе.

3. Показана эффективность электродинамической системы с выводом излучения в сторону катода, обеспечивающей увеличение полосы плавной перестройки рабочей частоты гиротрона.

4. Продемонстрированы возможности продвижения гиротронов на гармониках гирочастоты в терагерцовый диапазон при использовании электродинамических систем с повышенной селективностью, таких как связанные резонаторы с трансформацией мод и резонаторы с профилированной гофрировкой поверхности.

5. На основе анализа влияния различных параметров (магнитное поле, параметры электронного потока, отражения, температура резонатора) на стабильность выходных характеристик терагерцовых гиротронов определены требования к оборудованию для спектроскопических гиротронных комплексов.

6. Исследовано влияние реальных факторов (несоосность электронного пучка и резонатора, разброс скоростей электронов, омическая добротность) на режимы генерации гиротронов. Результаты исследования включены в методику проектирования терагерцовых гиротронов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Оптимизация резонатора непрерывного 258 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6. С.418-424.

A2. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывных субмиллиметровых гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №5-6. С.408-417.

A3. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности разработки высокостабильного непрерывного гиротрона с рабочей частотой 258 ГГц на второй гармонике // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2009, Т.52, №12. С.972-978.

A4. *Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолыхин В.И.* Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т. 53, №4. С. 251-259.

A5. *Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запевалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И.* Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике гирочастоты для спектроскопии динамически поляризованных ядер. //Изв. ВУЗов Радиофизика, 2010, Т.53, №4. С.260-268.

A6. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2011, Т.54, №6. С. 444-450.

A7. *Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Седов А.С., Пу Р., Нусинович Г.С., Гранаштейн В.Л.* Разработка мощного импульсного субтерагерцового гиротрона для дистанционного обнаружения источников ионизирующего излучения // Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2011, Т.54, №8-9. С.666-675.

A8. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Изв. ВУЗов ПНД, 2012, Т. 20, №3. С.70-80.

A9. *Glyavin M.Yu., Zavolskiy N.A., Sedov A.S., Nusinovich G.S.* Low-Voltage Gyrotrons // Physics of Plasmas, 2013 V.20. 033103:1-7.

A10. *Глявин М. Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Куфтин А. Н., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Седов А.С., Чирков А.В.* Терагерцовые гиротроны: состояние и перспективы // Радиотехника и электроника, 2014, Т. 59, № 8. С. 745–751.

A11. *M.Yu. Glyavin, A.V.Chirkov, G.G.Denisov, A.P.Fokin, V.V.Kholoptsev, A.N.Kuftin, A.G.Luchinin, G.Yu.Golubyatnikov, V.I.Malygin, M.V.Morozkin, V.N.Manuilov, M.D.Proyavin, A.S.Sedov, E.V.Sokolov, E.M.Tai, A.I.Tsvetkov,*

*V.E.Zapevalov* Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.*, 2015 V.86, №5. 054705.

A12. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Заславский В.Ю., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.* Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона // *Изв. ВУЗов ПНД* 2015 т. 23, № 2. С. 108-118.

A13. *Цветков А.И., Морозкин М.В., Глявин М.Ю., Малыгин В.И., Лубяко Л.В., Голубятников Г.Ю., Куфтин А.Н., Запезалов В.Е., Седов А.С., Чирков А.В., Фокин А.П., Холопцев В.В., Еремеев А.Г., Соколов Е.В., Денисов Г.Г.* Автоматизированный микроволновый комплекс на основе работающего в непрерывном режиме гиротрона с рабочей частотой 263 ГГц и выходной мощностью 1 кВт // *Изв. ВУЗов Радиофизика* Т.58, №9. С.709-719.

A14. *М.Ю. Глявин, Г.Г.Денисов, В.Е. Запезалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, А.С. Седов, В.В. Холопцев, А.В. Чирков* Особенности оптимизации подсистем непрерывного гиротрона с частотой генерации 0,26 ТГц на основном циклотронном резонансе // *Изв. ВУЗов Радиофизика* Т.58 №9. С.720-731.

A15. *Zapevalov V.E., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S.* Development of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with high stability of output parameters // *Proceedings of 7 Int. Workshop Strong microwaves: Sources and applications. N. Novgorod, 2008. P.203.*

A16. *Zapevalov V.E., Kuftin A.N., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Pavelyev A.B., Sedov A.S., Zavolsky N.A.* Development of 395 GHz gyrotrons for NDP spectroscopy on the basis of experience of elaboration 260 GHz gyrotron // *Proceedings of 8 Int. Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications"* N.Novgorod, 2011. P.143-144.

A17. *Sedov A.S., Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E.* Investigation of multi-beam scheme for increasing of achievable gyrotron operation frequency // *Proceedings of 9th Int. Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014. P.219.*

A18. *K.A. Leshcheva, A. S. Sedov, V. Yu. Zaslavsky, M. Yu. Glyavin* 3D modeling of the influence of azimuthal inhomogeneities of electron beams and electrodynamic system on the gyrotron operation regimes // *9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014. P.188-189.*

A19. *A.Sedov, A. Chirkov, G. Denisov, A. Eremeev, M. Glyavin, A. Kuftin, V. Kholoptsev, A. Luchinin, V. Manuilov, M. Morozkin, I. Plotnikov, E. Tai, E. Soluyanov, V. Zapevalov* Development of subterahertz gyrotron for DNP NMR spectroscopy at IAP RAS // *9th International Workshop Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications N. Novgorod – Perm – N.Novgorod, 2014 P. 124.*

A20. *Ginzburg N., Glyavin M., Goldenberg A., Luchinin A., Petelin M., Sedov A., Zapevalov V., Zavolsky N., Zotova I.* Sub-THz gyrotrons with improved electro-dynamics and electron-optical systems // *Proceedings of the 4-th Int. Workshop on Far Infrared Technology (IW-FIRT 2012), Fukui, Japan, 2012.*



A21. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Теоретические и экспериментальные исследования непрерывных субмиллиметровых гиротронов, проводимые в ИПФ РАН // Материалы 20 Межд. Конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2010. С. 293-294.

A22. *М.Ю.Глявин, А.С.Седов, Н.А.Завольский, В.Е.Запевалов, М.А.Моисеев, Г.С.Нусинович* Оптимизация параметров гиротрона для работы на низких напряжениях // Тезисы докладов 9 Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Н.Новгород, 2013. С. 49.

A23. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Повышение эффективности работы субмиллиметровых гиротронов за счет использования различных электродинамических систем. Материалы 20 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2010. С. 295-296.

A24. *Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.* Селекция мод в субмиллиметровом гиротроне с гофрированной стенкой резонатора // Материалы 22 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2012 С.224-225.

A25. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка на параметры гиротрона // Материалы 22 Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" Севастополь, 2012 С.223-224.

A26. *Glyavin M.Yu., Kufiin A.N., Maligin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A.* Theoretical and experimental investigation of submillimeter CW gyrotrons // Proceedings of 7 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology and Spectroscopy of Complex Media (TeraTech'10), Kharkov, 2010 доклад W-1.

A27. *Glyavin M., Luchinin A., Manuilov V., Moiseev M., Sedov A., Zapevalov V.* Development of powerful terahertz gyrotrons // Proceedings of 7 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology and Spectroscopy of Complex Media (TeraTech'10), Kharkov, 2010. доклад INV-1.

A28. *Завольский Н.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывных 250-315 ГГц гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты // Тезисы докладов 13 сессии молодых ученых, Нижегородская обл., 2008. С.75.

A29. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование непрерывного терагерцового гиротрона на второй гармонике циклотронной частоты // Материалы XIV Межд. зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике 2009 Саратов. С.32.

A30. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* Особенности оптимизации терагерцового гиротрона на второй гармонике

циклотронной частоты // Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн 2009 Н. Новгород. С.50.

A31. *Богдашов А.А., Денисов Г.Г., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Копелович Е.А., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Седов А.С., Фикс А.Ш., Чирков А.В.* Проект гиротронного комплекса для ДПЯ-спектроскопии // Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн Н. Новгород, 2009. С.25.

A32. *Zapevalov V.E., Dubrov V.V., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Venediktov N.P., Zavolsky N.A.* Development of 260 GHz second harmonic CW gyrotron with high stability of output parameters for DNP spectroscopy // The Conf. Digest of 34-th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves 2009, Busan. W3D04.0389.

A33. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е, Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Седов А.С.* Численное моделирование и экспериментальное исследование непрерывного 260 ГГц гиротрона на второй гармонике гирочастоты // Тезисы 9-ой Харьковской конф. молодых ученых, Харьков. 2009 С.14.

A34. *Zapevalov V.E., Fix A.Sh., Kopelovich E.A., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Sedov A.S., Tsalolikhin V.I., Zavolsky N.A.* Elaboration of 260 GHz Second Harmonic CW Gyrotron with High Stability of Output Parameters for DNP Spectroscopy // 35th Int. Conference IRMMW-THz 2010, Rome, 2010 We-E1.4

A35. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Влияние несоосности электронного пучка на параметры гиротрона // Тезисы Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Н. Новгород, 2011. С.64

A36. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Широкополосная перестройка частоты в гиротроне в режиме гиро-ЛОВ // Тезисы докладов 15 научной конференции по радиофизике ННГУ, Н. Новгород, 2011. С.43

A37. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Широкополосная перестройка частоты в гиротроне в режиме гиро-ЛОВ // Тезисы 11 Конф. молодых ученых по радиофизике, электронике, фотонике и биофизике. Харьков 2011. Th-18.

A38. *Завольский Н.А., Запевалов В.Е, Моисеев М.А., Седов А.С.* Исследование субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Материалы 15 Межд. зимней школы-семинара по электронике СВЧ и радиофизике, Саратов, 2012. С.90.

A39. *Sedov A.S., Zapevalov V.E, Kuftin A.N., Moiseev M.A., Zavolsky N.A.* Development of 395 GHz Gyrotrons for DNP Spectroscopy on the Basis of Experience of Elaboration 260 GHz Gyrotron //Abstracts of Int. Conference TERA 2012, Moscow Session 14 -5

A40. *Завольский Н.А., Петелин М.И., Седов А.С., Фильченков С.Е.* Селекция мод в гиротроне субмиллиметрового диапазона с гофрированной стенкой

резонатора // XIV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики", Звенигород, 2012, с. 213-214

A41. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С.* // Теоретическое и экспериментальное исследование непрерывных субмиллиметровых гиротронов в ИПФ РАН. Труды 14 научной конф. по радиофизике ННГУ, Н. Новгород, 2010, С. 64

A42. *А.П.Фокин, М.Ю.Глявин, В.Н.Мануилов, М.В.Морозкин, А.С.Седов* Восстановление ВАХ катода гиротрона по данным численного моделирования электронно-оптической системы // Материалы 32 Всероссийской научно-технической конф. "Информационные технологии в науке, проектировании и производстве". Н.Новгород, ННИМЦ "Диалог", 2011, С.27.

A43. *М.Ю. Глявин, Н. А. Завольский, В.Е. Запевалов, К.А. Лешева, В.Н. Мануилов, А.С. Седов* Numerical modeling of azimuthal inhomogeneity of electron beam on gyrotron operation regime // Межд. Конф. "Вакуумные электронные источники – 2014". Санкт-Петербург, 2014. С.134.

A44. *A.Chirkov, M.Glyavin, G.Denisov, A.Kuftin, A.Luchinin, V.Manuilov, A.Sedov, E.Tai, V.Zapevalov* Development and experimental investigations of THz band gyrotrons // Межд. Конф. "Вакуумные электронные источники – 2014" Санкт-Петербург, 2014 С. 157.

A45. *М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.В.Морозкин, А.С. Седов, Е.А.Солюнова, Е.М. Тай, А.В. Чирков* Разработка субтерагерцовых гиротронов для ДПЯ ЯМР спектроскопии в ИПФ РАН // 24-я Межд. Конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 2014 Севастополь, С.209-210.

A46. *М.Ю. Глявин Г.Г. Денисов, Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, В.Н. Мануилов, М.В.Морозкин, А.С. Седов, Е.А.Солюнова, Е.М. Тай, А.В. Чирков* Разработка гиротронных комплексов для задач ДПЯ спектроскопии в ИПФ РАН // Материалы всерос. конф. «Радиоэлектронные средства получения обработки и визуализации информации». Н. Новгород, 2014. С.23.

A47. *Седов А.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Лещева К.А., Розенталь Р.М.* Влияние азимутальной несимметрии электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Материалы 16 Межд. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, 2015 С 75.

A48. *Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Нусинович Г.С., Петелин М.И., Седов А.С.* Оптимизация параметров маломощных терагерцовых гиротронов // Материалы 16 Межд. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот Саратов, 2015. С.76.

A49. *М.Ю. Glyavin, V.N.Manuilov, V.Yu.Zaslavsky, A.M.Malkin, A.P.Fokin, M.D.Proyavin, R.M.Rozental, A.S.Sedov, A.S.Sergeev, A.I.Tsvetkov, I.V.Zotova, N.S.Ginzburg, T.Idehara* Numerical modeling of mode excitation and mode competition at THz range gyrotrons operation at cyclotron harmonics // FIR Center Report FIR-UF-128, 2015.

A50. Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Заславский В.Ю., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С. Проблемы, обусловленные несоосностью пучка и резонатора в терагерцевых гиротронах. // Труды XIX Научной конференции по радиофизике, Н. Новгород, 2015 С. 54.

A51. A.Chirkov, G.Denisov, M.Glyavin, A.Kuftin, V.Kholoptsev, V.Manuilov, M.Morozkin, M.Proyavin, A.Sedov, E.Tai, A.Tsvetkov, E.Sokolov, V.Zapevalov, N.Zavolsky CW subterahertz gyrotron systems for spectroscopy and diagnostics of various media // Abstracts of the "RJUS TeraTech-2015", Chernogolovka P. 118.

A52. A.Tsvetkov, A.Chirkov, G.Denisov, M.Glyavin, A.Eremeev, A.Kuftin, V.Kholoptsev, V.Malygin, V.Manuilov, M.Morozkin, A.Fokin, A.Sedov, E.Tai, V.Zapevalov, M.Koshelev, M.Tretyakov Development of high power subterahertz CW gyrotrons and its application for spectroscopy and diagnostics of various media // 27th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons, 2015 Greifswald.

A53. M.Glyavin, A.Chirkov, G.Denisov, G.Golybyatnikov, A.Fokin, A.Kuftin, V.Kholoptsev, A.Luchinin, V.Manuilov, V.Malygin, M.Morozkin, M.Proyavin, A.Sedov, E.Sokolov, E.Soluyanov, E.Tai, A.Tsvetkov, V.Zapevalov Development of THz Range CW Gyrotrons at IAP RAS // Proceedings of the 40th Int. Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves 2015, Hong Kong 15599163.

A54. М.Ю.Глявин, Н.А.Завольский, В.Е.Запевалов, В.Ю.Заславский, К.А.Лещева, Р.М.Розенталь, А.С.Седов Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцевого диапазона // Материалы 25-ой Межд. конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, 2015. С 787-788.

A55. Седов А.С., Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Морозкин М.В., Цветков А.И. Разработка гиротронного комплекса на частоте 0.263 ТГц для задач спектроскопии и технологических приложений // 18-я Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» Ульяновск 2015 С.34.

## Литература

1. 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.

2. Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 2011, Т.54, № 8–9 С.553– 572

3. Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Goldenberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K. The gyrotron: high-power source of millimeter and submillimeter waves // Infrared Phys. 1978, V.18, №6 P. 385-393

4. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons // The Johns Hopkins University press Baltimore-London 2004 P.

5. *M.V.Morozkin, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov, A.G.Luchinin* A high-efficiency second harmonic gyrotron with a depressed collector // *Int. J. IRMM Waves*, 2008, 29, 11, p. 1004
6. *Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E.* Development in Russia of high-power gyrotrons for fusion // *Nuclear Fusion*, 2008, V.48, №1, 054007:1-5
7. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. et al.* A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101, 153503:1-4
8. *Негирев А.А.* Широкополосные ЛОВ, непрерывно перекрывающие миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн // *Вакуумная СВЧ электроника*, Н.Новгород, 2002, С.93
9. *Лысенко Е.Е., Паньков С.В., Пишко О.Ф., Чумак В.Г., Чурилова С.А.* Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц // *Электромагнитные волны и электромагнитные системы*, 2010, Т.15, №112, С.63-71
10. *Bratman V.L., Dumesh B.S., Fedotov A.E. et al.* Terahertz Orotrons and Oromultipliers // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, #38 P.1466-1471
11. *Gavrilov N.G., Knyazev B.A., Kolobanov E.I. et al.* Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 2007, 575(1-2):4
12. *Братман В Л, Литвак А Г, Суворов Е В* Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // *УФН*, 2011, №181, С.867–874
13. *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen T.M., Jr. et al.* Development of THz-range gyrotrons for detection of concealed radioactive materials // *Int. J. IRMM&THz Waves*, 2011, №32, P.380-402
14. *Зайцев Н.И., Панкратова Т.Б., Петелин М.И., Флягин В.А.* Гиротроны диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн // *Радиотехника и электроника*, 1974, Т.19, №5, С.1056-1060
15. *Панкратова Т.Б., Нусинович Г.С.* Экспериментальное исследование диагностического гиротрона. *ЖТФ*, 1989, Т.59, №8, с.110
16. *Idehara T., Ogawa I., Mori H. et al.* A THz gyrotron FU CW III with a 20 T superconducting magnet *Proc. 33rd Int. Conf. Infrared, Millim. Terahertz Waves*, Pasadena, CA, 2008
17. *Torrezan A.C., Shapiro M.A., Sirigiri J.R., Temkin R.J.* Operation of a Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization *IEEE Trans. Elec. Dev.*, 2011, 58, 2727-2783
18. *Nusinovich G.S., Pu R., Antonsen Jr.T.M. et al.* *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2011. V. 32. №3. P.380
19. *Read M., Ives L., Neilson J, Nusinovich G.* Development of a High Power Pulse THz Gyrotron *Int. Vacuum Electronics Conf.*, Kitakyushu, Japan, 2007
20. *Fu W., Yan Y., Yan X., Yuan X., Liu S.* Generating 0.42 THz radiation from a second harmonic gyrotron // *Chinese Science Bulletin*, 2011, V.56, №33, p.3572-3574
21. Сайт компании Bridge 12: <http://www.bridge12.com/> (дата обращения: 2.02.2015)

22. Описание спектроскопических комплексов на основе гиротронов на сайте компании Bruker: <http://www.bruker.com/products/mr/nmr/dnp-nmr/overview.html> (дата обращения: 2.02.2015)
23. *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu.*, Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field // *Phys. Rev. Lett.*, 2008, V.100, 015101:1-4
24. *Bratman V.L., Glyavin M.Yu., Kalynov Yu.K. et al.* Terahertz Gyrotrons at IAP RAS: Status and New Designs // *Int. J. of Infrared, Millimeter and THz Waves*, 2011, V.32, №3, p.371-379
25. *Bratman V.L., Kalynov Yu.K. Manuilov V.N.* Large-Orbit Gyrotron Operation in the Terahertz Frequency Range // *Phys. Rev. Lett.* 2009, 102, 245101
26. *Krivosheev P.V., Lygin V.K., Manuilov V.N., Tsimring Sh.E.* Numerical Simulation Models of Focussing Systems of Intense Gyrotron Helical electron Beams *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, 22, 2001, 8, 1119
27. *Glyavin M.Yu., Goldenberg A.L., Kuftin A.N., V.K.Lygin, A.S.Postnikova, Zapevalov V.E.* Experimental studies of gyrotron electron beam systems // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 27, 1999, 2, 474-483
28. *Samsonov S.V., Denisov G.G., Bratman V.L., Bogdashov A.A., Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Lygin V.K., Thumm M.K.* Frequency-tunable CW Gyro-BWO with a helically rippled operating waveguide // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2004, V.32, №3, p.884-889
29. *Denysenkov V., Kiseliyov V.K., Prandolini M.M., Gafurov M., Krahn A., Engelke F., Bezborodov V.I., Kuleshov Ye.M., Nesterov P.K., Yanovsky M.S., Prisner T.F.* 260 GHz Quasioptical Setup for EPR and DNP experiments on the 9.2 Tesla DNP/NMR/EPR spectrometer // *Proceedings of 7 Int. Symposium on Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, 2010*

## Оглавление диссертации

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 Уточнение расчетной модели субтерагерцового гиротрона на основе экспериментальных данных	19
1.1 Обзор истории освоения субтерагерцового и терагерцового диапазонов гиротронами и современное состояние исследований. Расчетные модели, используемые для анализа электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.	19
1.2 Анализ электронно-волнового взаимодействия в непрерывных суб-ТГц гиротронах	34
Глава 2 Теоретическое исследование субтерагерцовых гиротронов с различными электродинамическими системами	58
2.1 Оптимизация гиротрона для работы в режимах с малым ускоряющим напряжением.	59
2.2 Возможности плавной перестройки частоты в гиротронах суб-ТГц диапазона частот	72
2.3 Развитие методов повышения селективности рабочего типа колебаний в гиротронах суб-ТГц и ТГц диапазона частот	81
Глава 3 Теоретическое и экспериментальное исследование высокостабильного непрерывного гиротрона с частотой 0.258 ТГц на второй гармонике гирочастоты	95
3.1 Особенности конструкции гиротрона и основные расчетные параметры	97
3.2 Результаты экспериментального исследования непрерывного гиротрона на второй гармонике гирочастоты	109
3.3 Анализ полученных экспериментальных данных.	118
Глава 4 Исследование высокостабильного непрерывного гиротрона с частотой 0.263 ТГц на первой гармонике гирочастоты	124
4.1 Требования к гиротрону и его конструктивные особенности. Оценка параметров электронного пучка и оптимизация электронно-волнового взаимодействия	125
4.2 Экспериментальное исследование гиротрона и анализ полученных данных.	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	144
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	156

Седов Антон Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ  
ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ГИРОТРОНОВ СРЕДНЕЙ  
МОЩНОСТИ**

Автореферат

Подписано к печати  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № (2016).

Отпечатано в типографии ИПФ РАН,  
603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46