

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

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)
«ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ГИРОТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

Аспирант: Проявин Михаил Дмитриевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Глявин М.Ю., д.ф.-м.н.,
доцент, заместитель директора по научной работе

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Непрерывные гиротроны с рабочими частотами 24-30 ГГц и выходной мощностью несколько киловатт [1] (так называемые «технологические гиротроны») уже позволили освоить такие технологии, как спекание керамических и композитных материалов [2] и плазмохимическое выращивание алмазных пленок и дисков [3]. В перспективе подобные источники микроволнового излучения будут востребованы для бор-нейтронзахватной терапии [4], получения нанопорошков оксидов металлов методом испарения – конденсации [5], и ряда других перспективных технологий.

Для таких технологий требуются различные режимы изменения выходной мощности. В то же время, технологические стенды на базе гиротронов должны оставаться высокоэффективными на протяжении всего этапа работы и при любых режимах. Поэтому важной задачей отработки технологических гиротронов является составление экспериментальных карт выходной мощности и эффективности гиротрона при вариации параметров и поиск оптимальных рабочих режимов для существующих технологических стендов, работающих на второй гармонике циклотронного резонанса.

Следует отметить, что до сих пор указанные гиротроны работали с относительно низкими значениями рабочих магнитных полей, создаваемых обычными «теплыми» соленоидами – около 0.5 Тл, что приводило к необходимости реализации генерации на второй гармонике гирочастоты. В то же время, развитие перечисленных выше приложений требует увеличения мощности примерно на порядок – до нескольких десятков киловатт. В этом случае основным ограничивающим фактором становится требование повышения устойчивости работы гиротрона в широком диапазоне мощностей, чему препятствует конкуренция мод в резонаторе гиротрона [6]. Поэтому необходим переход к генерации на основном циклотронном резонансе с соответствующим почти двукратным увеличением рабочего магнитного поля. Развитие приложений диктует новые требования к повышению частоты генерации или ее изменение в широком диапазоне, что также связано с повышением магнитного поля. Ряд проблем не позволяет использовать сверхпроводящие магниты, которые с легкостью закрыли бы существующие потребности в магнитных полях. Соответственно, все это усугубляет проблему энергоэффективности комплекса в целом в связи с квадратичной зависимостью магнитного поля и энергопотребления соленоида.

Актуальным является исследование магнито-экранированных систем (МЭС) для гиротронов и адаптация данных СВЧ-генераторов к специфическому распределению профиля магнитного поля. Системы формирования магнитного поля должны быть хорошо оптимизированы как с точки зрения энергопотребления (оптимизация геометрии экранов и

обмоток, используемых магнитомягких материалов и т.д.), так и с точки зрения согласования профиля магнитного поля с возможностью реализации качественного винтового электронного пучка (ВЭП). Для последнего, главным объектом исследования является электронно-оптическая система (ЭОС) гиротрона, причем не только в области формирования ВЭП, но и в области его посадки на коллектор.

Возможность реализации МЭС и соответствующую ей ЭОС гиротрона, позволяет рассчитывать на создание нового поколения технологических гиротронов, которые будут иметь уникальные параметры. Возможность достижения больших магнитных полей при приемлемой мощности потребления расширяет частотный диапазон технологических гиротронов вплоть до W-диапазона. Наличие крайне слабого поля рассеяния в катодной области позволяет в широких пределах менять магнитное поле на катоде дополнительной катодной катушкой. Данная особенность позволяет изменять радиус электронного пучка в резонаторе, что в совокупности с увеличенным пределом по магнитному полю позволяет рассчитывать на возбуждение большого количества рабочих мод в широком диапазоне частот в одном СВЧ-приборе.

Таким образом, разработка гиротронных комплексов на базе МЭС является актуальной и важной задачей для современной СВЧ-электроники и ее приложений.

Цели и задачи исследования

1. Экспериментальное исследование гиротронных комплексов для технологических приложений для определения путей повышения мощности и эффективности генерации.
2. Комплексное исследование температурных эффектов в катодных узлах магнетронно-инжекторных пушек гироприборов с целью увеличения долговечности катодов и снижения влияния температурной деформации элементов конструкции на качество электронного пучка.
3. Создание компьютерных кодов для численного моделирования и оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона.
4. Разработка магнитных систем со сниженным энергопотреблением, обеспечивающих индукцию магнитного поля 0.5-1.8 Тл в объемах, достаточных для размещения электродинамической и электронно-оптической систем гироприборов.
5. Реализация технологических гиротронных комплексов с выходной мощностью в десятки киловатт на базе магнито-экранированных систем.
6. Демонстрация возможности эффективной генерации при широкополосной ступенчатой перестройке частоты излучения.

Объект исследования

Объектом настоящего исследования являются:

- процессы взаимодействия винтового электронного потока, движущегося в осесимметричном магнитном поле гироприбора с ВЧ полями сверхразмерных резонаторов гироприборов;
- формирование и динамика ВЭП в квазиadiaбатическом и неadiaбатическом магнитном поле в области катода и коллектора
- .- оптимизация профиля магнитного поля соленоида, окруженного ферромагнитными экранами с нелинейной В-Н характеристикой.

Научная новизна исследования

Первые попытки как теоретического, так и экспериментального исследования гиротронов с экранированными магнитными системами были предприняты в работах [7,8]. В частности, был реализован КПД около 20% при уровне выходной мощности около 10 кВт [7]. Однако в указанных работах генерация осуществлялась на второй гармонике гирочастоты, а формирование винтового электронного пучка (ВЭП) проводилось в неadiaбатической электронно – оптической системе. Требуемые для гиротронов на базе экранированных магнитов неadiaбатические ЭОС обычно характеризуются большей чувствительностью к вариациям рабочих режимов (напряжение и ток электронного пучка, магнитное поле в области эмиттера), погрешностям изготовления и юстировки. Поэтому предпочтительна адиабатическая схема формирования электронного пучка. В диссертации выполнено теоретическое и экспериментальное исследование возможности реализации качественного (с точки зрения электронно-волнового взаимодействия) ВЭП в магнито-экранированной системе.

Разработана и успешно испытана МЭС, обладающая вдвое большим магнитным полем, чем стандартные «теплые» соленоиды, используемые в текущих версиях гиротронных комплексов, что позволяет осуществить переход на работу на основном циклотронном резонансе. Конфигурация ферромагнитных экранов доработана таким образом, чтобы при оптимальном эффекте экранировки обеспечить профиль магнитного поля, необходимый для корректной работы электронно-оптической системы как в области формирования электронного пучка, так и в области его осаждения в различных частотных режимах.

Теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность значительного (более чем на треть) увеличения КПД и перестройки частоты резонаторными маломощными катушками диодного варианта гиротрона с рабочей частотой 30 ГГц и мощностью до 15 кВт. Результаты исследования легли в основу расчета гиротрона с магнито-экранированной системой.

Практическая значимость

Разработан высокоэффективный технологический гиротронный комплекс на базе МЭС, способный на мультикиловаттном уровне мощности обеспечивать генерацию вплоть до W-диапазона. Использование данного гиротрона в микроволновых комплексах для обработки материалов, производимых ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП ГИКОМ, уменьшит энергопотребление комплексов в целом примерно в 1.5 раза или позволит осуществлять генерацию излучения на уровне мощности, в несколько раз превышающей достигнутые существующие значения для технологических комплексов на второй гармонике с «теплыми» соленидами.

В случае продвижения в более высокочастотный диапазон данные комплексы будут востребованы большим числом научных и производственных лабораторий за счет отказа от использования дорогостоящих и сложных в эксплуатации криомагнитов.

Апробация и публикация результатов исследования

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах и докладывались на международных конференциях по вакуумной электронике (Сеул, Южная Корея, 2016), Международном симпозиуме по исследованиям в области электромагнетизма (Тояма, Япония), Международных конференциях по инфракрасным и миллиметровым волнам (Нагоя, Япония, 2018; Париж, Франция, 2019), Международной конференции по передовым лазерным технологиям (Таррагона, 2018), Международной конференции по технологии ускорителей тяжелых ионов (Ланьчжоу, Китай, 2018), совместных Российско-Германских семинарах по ЭЦР нагреву плазмы и гиротронам (Н. Новгород, 2018; Ленгрис, Германия 2019), Международном семинаре по мощным СВЧ-источникам и их приложениям (Н. Новгород, 2017), Международном семинаре по перспективным ускорителям и перспективным источникам излучения (Ариэль, Израиль, 2019), Международной конференции «Терагерцовое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и применения» (Н. Новгород, 2018, 2020), Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2018, 2020), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Н. Новгород, 2016, 2019), Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (С. Петербург, 2018), Нижегородских сессиях молодых ученых (Н. Новгород, 2018, 2019, 2020)

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A11] получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании взаимодействия электронов с полем резонатора, численном моделировании режимов генерации, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных, написании отчетов, статей, подготовке презентационных материалов и участии в конференциях. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Создание программы для расчета резонатора проходило при непосредственном участии автора первой версии программы Н. И. Завольского и автора пакета программ Angel Е. С. Семенова. Экспериментальные исследования проводились в составе группы ученых и инженеров, обеспечивавших работу гиротронных комплексов. Обработка результатов эксперимента производилась автором лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

Положения, выносимые на защиту

1. Рекордные значения полного КПД технологических гиротронных комплексов и существенное увеличение генерируемой мощности при стабильной долговременной работе могут быть реализованы за счет применения магнито-экранированных систем с оптимизированным продольным распределением магнитного поля.

2. Профилирование магнитного поля в области резонатора позволяет не только повысить эффективность генерации, но и использовать катушки с малой индуктивностью для стабилизации рабочей частоты гиротрона.

3. Снижение рабочей температуры подогревателя катода и, соответственно, существенное увеличение срока службы прибора может быть достигнуто в системах с дополнительным нагревом катода отраженными электронами

4. Эффективное управление параметрами электронного потока в магнито-экранированных системах может быть реализовано за счет триодной конфигурации электронно-оптической системы и дополнительных катушек с малым энергопотреблением в катодной и коллекторной областях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 92 страницы, включая 45 рисунков и список литературы из 72 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологических гиротронов на второй гармонике циклотронной частоты.

В **п. 1.1** экспериментально исследована возможность расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором. Одним из известных способов перестройки частоты является работа гиротрона в режиме ЛОВ, что дает возможность работать с продольными вариациям ВЧ-поля при увеличении магнитного поля. Однако, мощность генерации драматически падает уже начиная со второй продольной вариации. В первую очередь это связано с особенностями работы в данном режиме, так появляется зависимость от продольного разброса скоростей: $\omega = s\Omega + hv_{\parallel}$. Для уменьшения влияния данного эффекта в работе [10] было предложено использовать короткие резонаторы. Было показано, что максимально достижимый индекс продольной моды определяется именно разбросом скоростей электронов: $q < \frac{2}{g^2 \delta v_{\perp}} = \frac{2}{\delta v_{\parallel 0}}$. Начальный разброс скоростей электронов приводит к дополнительному разбросу электронной циклотронной фазы по отношению к волновой и данный эффект усиливается при увеличении длины области электронно-волнового взаимодействия: $\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{g^2 L \delta v_{\perp}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{v_{\parallel 0}}{\mu \delta v_{\perp}} \right)^2$, где $\delta\omega$ – полоса перестройки, а $\mu = \pi g \beta_{\perp 0} L / \lambda$ – характерная длина области взаимодействия.

Для проверки теоретических исследований был проведен эксперимент с использованием существующего технологического гиротрона 28 ГГц, TE_{0,2}, 20 кВ / 2 А на второй циклотронной гармонике. Для проведения эксперимента режим генерации был сменен на работу на основном циклотронном резонансе с частотой генерации 12,2 ГГц на моде TE_{2,1}. На более низкой частоте длина резонатора в длинах волн уменьшилась с $\mu = 17$ до $\mu = 4$. При основном резонансе ток пучка был достаточно велик для возбуждения продольных мод высокого порядка. Дополнительный диск из нитрида бора использовался для согласования окна вывода на частоте 12,5 ГГц.

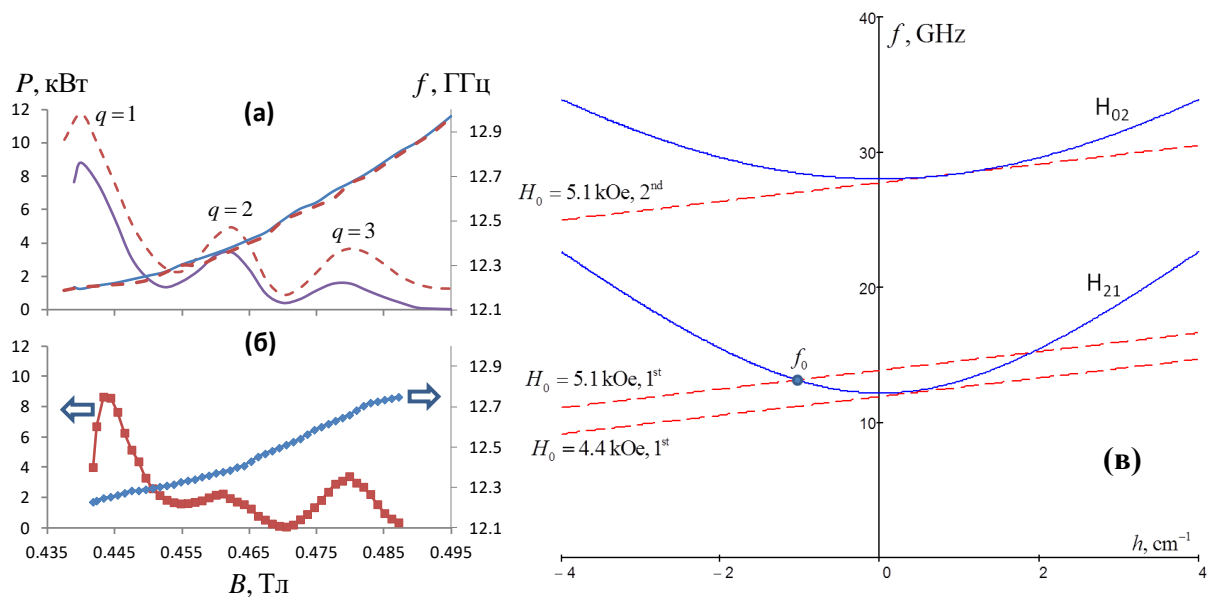
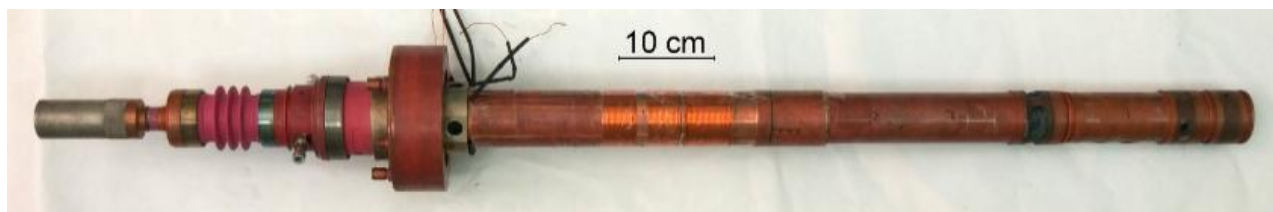


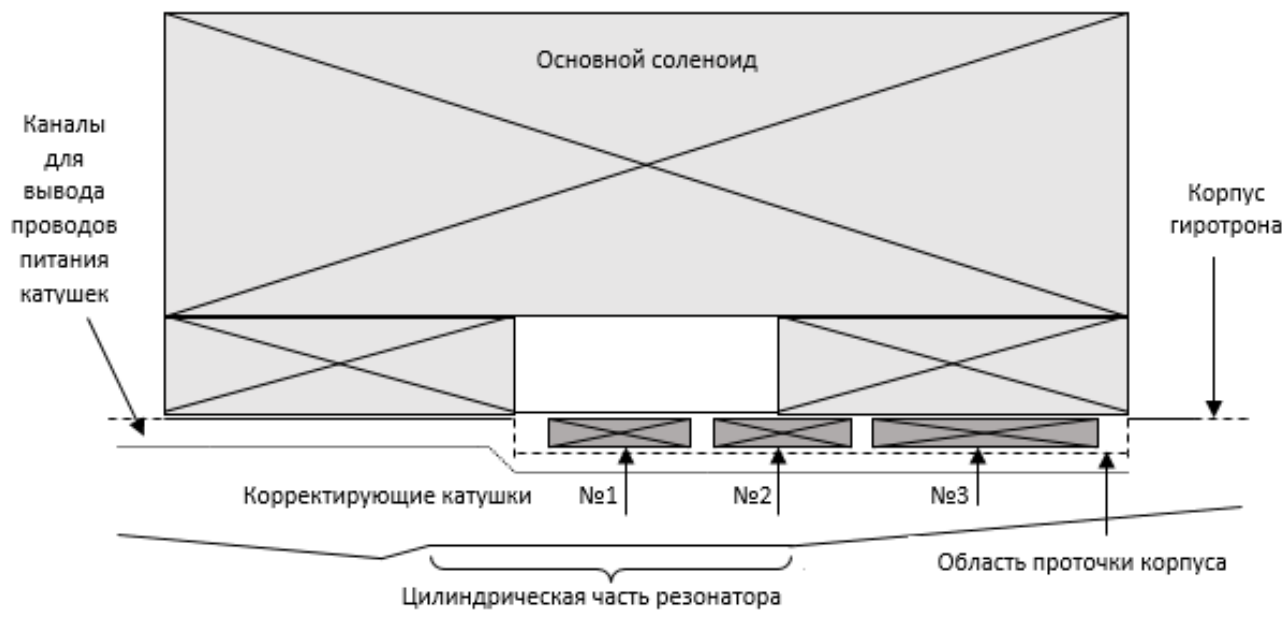
Рис. 1. Гиротрон с дополнительными резонаторными катушками (а) и общая схема магнитной системы (б), (в) – дисперсионная характеристика возбуждения мод на первой и второй гармониках.

В результате экспериментов была подтверждена возможность генерации выходной мощности на уровне более 1 кВт в полосе перестройки частоты более 4% [A1] при осуществлении генерации вплоть до 3 продольной вариации рабочей моды резонатора гиротрона. Данные экспериментального исследования и результаты численного моделирования находились в хорошем соответствии друг другу, что подтвердило корректность расчетных моделей.

В п. 1.2. описаны результаты работы с технологическим гиротроном на второй гармонике гирочастоты при выходной мощности 10 кВт на частоте 30 ГГц [A2]. Поскольку принцип работы гиротрона основан на использовании циклотронного резонанса электронов, движущихся в магнитном поле, с медленной электромагнитной волной, очевидно, что профилирование магнитного поля – изменение резонансных условий по мере изменения энергии электронов – должно оказывать значительное влияние на выходные характеристики: мощность, эффективность и частоту генерации. Благодаря оптимизации профиля магнитного поля в резонаторе дополнительными маломощными катушками (см. рис. 1.) было получено увеличение КПД в 1.3 раза (с 27 до 36%) по сравнению с режимом работы при однородном магнитном поле.



(а)



(б)

Рис. 1. Гиротрон с дополнительными резонаторными катушками (а) и общая схема магнитной системы (б).

Как известно, эффективным методом управления частотой генерации гиротронов является изменение магнитного поля в области взаимодействия [А3]. Управление частотой за счет дополнительной катушки, изменяющей магнитное поле по всей длине однородного участка резонатора, было исследовано в работе [10] и успешно применяется в giroприборах, использующих криомагниты [11, 12] или системы на постоянных магнитах [13, 14]. В данной работе экспериментально исследовалась возможность управления частотой за счет изменения магнитного поля на достаточно узком участке в конце области взаимодействия, что позволяет уменьшить индуктивность катушки и характерное время перестройки. При наблюдаемой ширине спектра излучения 0.2МГц чувствительность частоты генерации к току дополнительной катушки составила 1 МГц/А. Индуктивность вспомогательной катушки для подстройки частоты равна 70 мкГн, что более чем на порядок меньше аналогичной величины для катушки, использованной для стабилизации частоты в работе [10]. С учетом ограничений, накладываемых ослаблением переменного магнитного поля корпусом прибора (скин-эффект), характерная частота варьирования поля составила около 10 кГц [15], что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам модуляции (стабилизации) частоты гиротронов для управляемого термоядерного синтеза.

Полученные результаты могут представлять интерес для повышения КПД, а также управления частотой гиротронов мегаваттного уровня мощности для управляемого термоядерного синтеза [А4] и высокочастотных гиротронов малой мощности [А5], в которых быстрое изменение основного магнитного поля затруднительно в силу большой индуктивности

соленоида криомагнита. Стабилизация частоты модуляцией напряжения на аноде также невозможна в силу диодной схемы лампы мощных СВЧ-комплексов.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы, связанные совершенствованием технологических гиротронных комплексов и методов их расчета. Основной идеей решаемых задач является разработка нового поколения технологических комплексов на базе гиротронов, отвечающих растущим требованиям к СВЧ-комплексам.

В п. 2.1. детально исследована возможность применения ферромагнитных экранов для концентрации магнитного поля теплых соленоидов в рабочем пространстве СВЧ-приборов. Данный принцип может быть использован как для снижения энергопотребления магнитных систем, так и для увеличения интенсивности магнитного поля при сохранении уровня потребляемой мощности на прежнем уровне. Как результат, исследования послужили основой для разработки магнитных систем для гиротронов с квазиadiaбатической и неadiaбатической МИП, в первой из которых реализована система электродов, обеспечивающая формирование качественного с точки зрения электронно-волнового взаимодействия винтового электронного пучка для гиротрона на базе МЭС [А6].

В п. 2.2. приведены результаты теоретического и экспериментального исследования возможности значительного увеличения срока службы подогревателя катода гиротрона за счет использования паразитного эффекта бомбардировки катода отраженных от магнитной пробки электронов [А7]. Теоретические результаты показали, что такой подход позволяет в разы увеличить срок службы катода при снижении температуры подогревателя с 3300 К до 3100 К и менее. Максимальное снижение мощности подогревателя в эксперименте составило 22% для тока электронного пучка 1,5 А, что свидетельствует о правильности предлагаемого подхода.

П. 2.3. посвящен разработке и исследованию компьютерных кодов для быстрого расчета и оптимизации электронно-оптической и электродинамической подсистем гиротрона. В результате работы на базе библиотеки IBSIMU реализована программа, позволяющая проводить точный и быстрый (на несколько порядков быстрее, чем CST Studio Suite при аналогичных входных параметрах) расчет и анализ электронных пучков гиротрона с большим (сотни миллионов) количеством частиц. Совместно с Н.И. Завольским и С.Е. Семеновым реализован инструмент расчета и оптимизации резонатора гиротрона на базе стационарной самосогласованной системы полных уравнений движения электронов с нефиксированной структурой поля электромагнитной волны (*), интегрированный в пакет программ Angel.

() Нормированный комплексный поперечный импульс каждого электрона описывается уравнением:*

$$\frac{dp_c}{dz} + i \frac{p_c}{p_{\parallel}} * \left(\gamma \frac{k}{n} - \frac{\omega H_0}{c} \right) = \kappa_{\perp} * J_{m-n} * \left\{ \left(\frac{i\gamma F}{p_{\parallel}} + \frac{1}{k} \frac{dF}{dz} \right) * (p_c^*)^{n-1} * \left(\frac{J_{n-1}}{2p_{\perp}^{n-1}} \right) + \left(\frac{i\gamma F^*}{p_{\parallel}} - \frac{1}{k} \frac{dF^*}{dz} \right) * p_c^{n+1} * \left(\frac{J_{n+1}}{2p_{\perp}^{n+1}} \right) - ip_c * Re \left(\frac{F}{p_{\parallel}} * (p_c^*)^n \right) * \left(\frac{J_n}{p_{\perp}^n} * \frac{k_{\perp}}{k} \right) \right\} + \frac{p_c}{2H_0} * \frac{dH_0}{dz} - \frac{iS\gamma(z)}{p_{\parallel}} * \left\langle \frac{\hbar e}{\tilde{p}_{\parallel}} \right\rangle$$

где последние два слагаемых отражают влияние неоднородного статического магнитного поля и пространственного заряда электронного пучка соответственно.

Продольная компонента нормированного импульса каждого электрона описывается уравнением:

$$\frac{dp_{\parallel}}{dz} = -Re \left(\frac{1}{k} \frac{dF}{dz} * (p_c^*)^n \right) * \frac{J'_n}{p_{\perp}^{n-1}} * \frac{\kappa_{\perp} * J_{m-n}}{p_{\parallel}} - \frac{p_{\perp}^2}{p_{\parallel} * 2H_0} * \frac{dH_0}{dz}$$

Продольная структура поля, согласованная с пучком: $\frac{d^2F}{dz^2} + k_{\parallel}^2 * F = I * k * k_{\perp} * \langle J_{m-n} * \frac{p_c^n}{p_{\parallel}} * J_n' p_{\perp}^{n-1} \rangle$

Данный софт позволяет быстро и точно проводить оптимизацию параметров электродинамической системы, что является незаменимым инструментом при разработке СВЧ-комплексов. Разработанные коды были успешно протестированы на предмет соответствия известным современным коммерческим пакетам программ.

В п. 2.4 продемонстрирован новый подход к оптимизации функции распределения электронов по поперечным скоростям с точки зрения эффективности взаимодействия с электромагнитной волной резонатора гиротрона [A8]. Профилирование анода дает возможность в значительной степени менять функцию распределения всего пучка, оптимизируя профиль анода для каждой из фракций эмиттера. Данный инструмент может позволить проводить качественную оптимизацию широких эмиттеров, которые, например, имеют меньший угол наклона к центральной оси симметрии ЭОС для прохождения в меньшие отверстия магнитных систем. Но понятие оптимальной функции распределения по поперечным скоростям должно быть связано с эффективностью взаимодействия каждой фракции пучка с рабочим типом колебаний резонатора. Поэтому целесообразным является проводить поиск максимального суммарного КПД путем расчета вклада каждой фракции и для каждой из них проводить свою оптимизацию отдельно. В результате исследований показана возможность уменьшения поперечных размеров катодного узла и/или увеличения тока пучка без потери эффективности генерации.

В п. 2.5 приводятся результаты синтеза конфигурации электромагнитов и ферромагнитных вставок, расчета температурных эффектов в катодной области неадиабатической электронно-оптической системы гиротрона. Требуемый профиль магнитного поля в области формирования электронного пучка, использованный в работе [16], в изначальной конфигурации электромагнитов был нереализуем в связи с большим энергопотреблением и плотностью тока катодных катушек. В результате использования ферромагнитного элемента определенной формы и специально конфигурации маломощных катушек было получено требуемое распределение

магнитного поля при в 20 раз меньшем энергопотреблении соленоидов, с возможностью дальнейшей реализации без использования системы охлаждения. Детальное моделирование распределения температуры направлено на недопущение перегрева элементов конструкции системы формирования электронного потока. Данный тип МИП крайне чувствителен к температурным деформациям из-за критичности к изменениям аксиальной симметрии электродов. Задача осложняется наличием длинного продольного размера некоторых элементов и невозможностью использования дополнительного крепления подвесных частей. Результаты расчета могут лечь в основу модернизации геометрии неадиабатических МИП и сделать их более надежными и востребованными системами формирования электронных потоков.

Глава 3 посвящена разработке и реализации технологического гиротронного комплекса с магнито-экранированной системой [A9].

В п. 3.1 проведено теоретическое и экспериментальное исследование МЭС (см. рис. 2) [A10]. Измерения индукции магнитного поля выполнены датчиком Холла (модель Lake Shore Gaussmeter Model 450) с погрешностью не более $\pm 0.10\%$. В ходе эксперимента получена зависимость интенсивности поля B в центре соленоида от мощности источников питания P . В эксперименте максимальная мощность составила 31 кВт, что позволило достичь индукции магнитного поля 1.45 Тл. Экстраполяция данных до 50 кВт потребляемой мощности с учетом нелинейной зависимости $B(H)$, связанной с насыщением материала экранов, указывает на возможность генерации колебаний с рабочими частотами до 50 ГГц на первой гармонике гирочастоты (и соответственно до 100 ГГц на второй гармонике). Во всех экспериментальных режимах МЭС демонстрировала долговременную стабильную работу со стационарной температурой корпуса системы не выше 40°C . Для режима $I = 100$ А, $U = 121$ В, соответствующего входящим в состав технологических стендов источникам питания и позволяющего получить магнитную индукцию 1.024 Тл, необходимую для генерации колебаний с рабочей частотой 28 ГГц, было измерено распределение магнитного поля. В ходе экспериментов нарушений аксиальной симметрии магнитного поля не выявлено. Результаты экспериментов согласуются с расчетными данными, что дает возможность дальнейшего проведения расчета и оптимизации электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона.

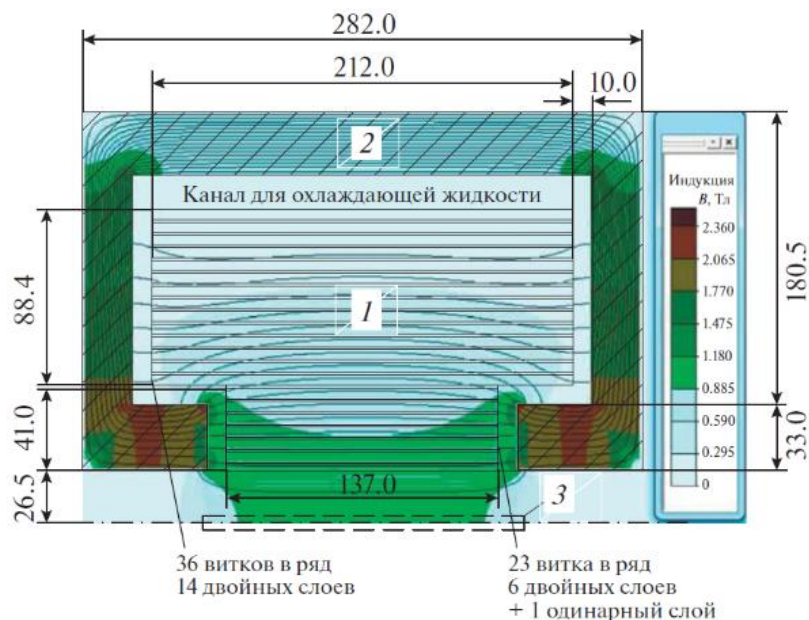


Рис. 2. (а) - общий вид магнитной системы и карта интенсивности магнитного поля в оптимизированной МЭС 1 – медная обмотка (шина сечением $5.8 \times 2.8 \text{ мм}^2$ с лаковой изоляцией, сечение медного провода $5.1 \times 2.65 \text{ мм}^2$), 2 – ферромагнитный корпус системы, 3 – характерный масштаб области электронного пучка (штриховая линия). Размеры даны в миллиметрах.

(б) - фотография МЭС в экспериментальном стенде.

П. 3.2 посвящен расчету и оптимизации электронно-волнового взаимодействия. Возможности рассмотренной в предыдущем пункте магнитной системы позволяют рассчитывать на генерацию вплоть до W-диапазона. В связи с этим был проведен расчет параметров взаимодействия, позволяющих добиться высокоэффективной генерации как на основном режиме с частотой 28 ГГц, так и с частотами 35, 45 и 95 ГГц. Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия в резонаторе гиротрона на 28 ГГц показала возможность достижения КПД генерации 52% (см. рис. 5), что с учетом потребления МЭС является рекордным для эффективности комплекса в целом (около 35%). Расчет проводился на программах Angel (одномодовое взаимодействие) и CST Studio Suite (с учетом конкуренции сателлитов), результаты показали хорошее соответствие друг другу.

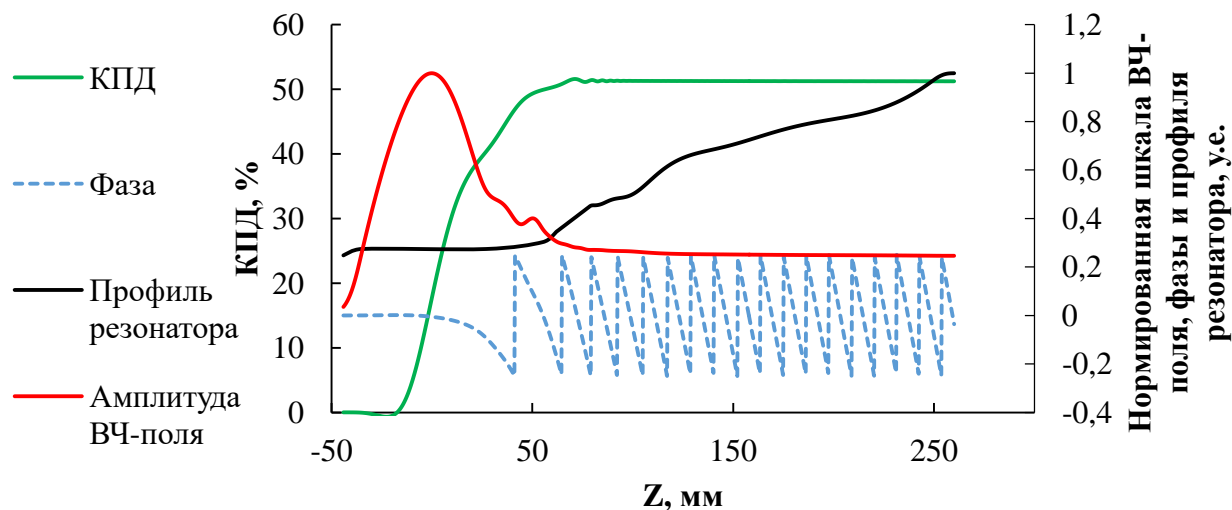


Рис. 5. Результаты расчета КПД.

Аналогичные расчеты были проведены для остальных режимов генерации, КПД генерации которых составляло около 20%. Данное уменьшение эффективности взаимодействия связано в первую очередь с неоптимальной длиной резонатора, рассчитанной на основной режим.

В п. 3.3 разработана электронно-оптическая система гиротрона, включающая в себя как область формирования винтового электронного пучка, так и область его посадки. Распределение осевого магнитного поля, помимо требований к величине максимума и длине однородного участка, должно обеспечивать формирование электронного пучка с приемлемым качеством. Качество ВЭП и принцип работы системы формирования существенным образом зависят от степени неадиабатичности магнитного поля, которая может быть оценена соответствующим безразмерным коэффициентом как:

$$\varepsilon = \left| \frac{dB_z}{dz} \right| \frac{2\pi\sqrt{2U}\eta}{\eta B_z^2}$$

Количественно оценить степень неадиабатичности магнитного поля можно, рассмотрев коэффициент $\varepsilon = h / L_B$, равный отношению шага электронной траектории h к масштабу неоднородности магнитного поля L_B . Когда этот коэффициент оказывается больше единицы, движение электрона уже нельзя описать в рамках адиабатической теории. Расчет МИП проводился исходя из соответствия магнитного поля в области формирования ВЭП $\varepsilon \leq 1$, что было достигнуто путем использования маломощной катодной катушки. В расчетах было принято умеренное значение плотности тока $j_k = 1.7 \text{ А/см}^2$, что позволяет рассчитывать на время жизни катода в десятки тысяч часов. Для возможности подстройки параметров ВЭП рассматривалась триодная конфигурация МИП. Оценки показывают, что при указанных выше плотностях тока отношение рабочего тока к ленгмюровскому току пушки $t_j \approx 0.4$, что приводит к существенному возмущению скоростного распределения в пучке силами пространственного заряда [17]. Для снижения влияния этого фактора угол наклона эмиттера к оси симметрии системы был выбран таким, чтобы обеспечить формирование регулярно пересекающегося ВЭП.

Результатирующие параметры пучка полностью соответствовали требованиям электронно-волнового взаимодействия: питч-фактор пучка в резонаторе $g=1.56$, разброс поперечных скоростей 7%.

Расчет и оптимизация коллекторной области осложняется характерной особенностью МЭС – резкий спад магнитного поля за экранами, вследствие чего движение электронов в этой области становится неадиабатическим. Соответственно и расчет энергетической нагрузки коллектора по простой теории [18] становится невозможным. Величина ϵ для данного случая и магнитное поле приведена на рис. 3.

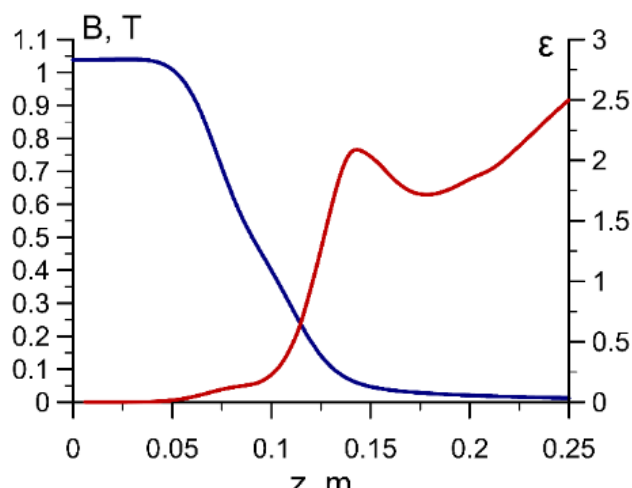


Рис. 3. Распределение магнитного поля на оси МЭС и график коэффициента неадиабатичности для гиротрона на основном циклотронном резонансе с частотой излучения 28 ГГц.

Силовые линии магнитного поля резко расходятся в области, где расположен край ферромагнитного экрана (рис. 4). В результате образуется неадиабатический однопериодный ондулятор, придающий топологии ВЭП сложную структуру. Такая динамика электронного пучка усложняет процесс оптимизации распределения осаждаемой на коллектор мощности и требует специфического подхода, учитывающего характер движения электронов. Рассмотренная особенность коллектора гиротрона с МЭС, а также требования к возможности организации работы в режимах с другими магнитными полями в одном приборе, создают задачу глубокой оптимизации коллекторного узла [A11]. В результате исследования было предложено две методики, позволяющие решить данную проблему для случая коллектора малого и большого диаметра. Для выполнения расчетов на базе библиотеки IBSIMU был создан специализированный код, позволяющий быстро проводить вычисления при большом количестве частиц в трехмерном пространстве с учетом пространственного заряда.

В рамках исследования были рассчитаны режимы генерации частот 35, 45 и 95 ГГц как наиболее востребованные. Используя ранее предложенную методику расчета и имея конструкционные ограничения габаритов была проведена оптимизация коллекторной области, позволяющая обеспечить нагрузку коллектора, приемлемую (до 400 Вт/см^2) для непрерывного режима

генерации при мощности пучка 50-60 кВт при различных величинах магнитного поля в резонаторе от 1 до 1.8 Тл (см. рис 6). Добиться этого удалось в том числе за счет установки над коллектором системы маломощных катушек, что позволило сгладить распределение плотности мощности рассеяния электронного пучка для всех случаев.

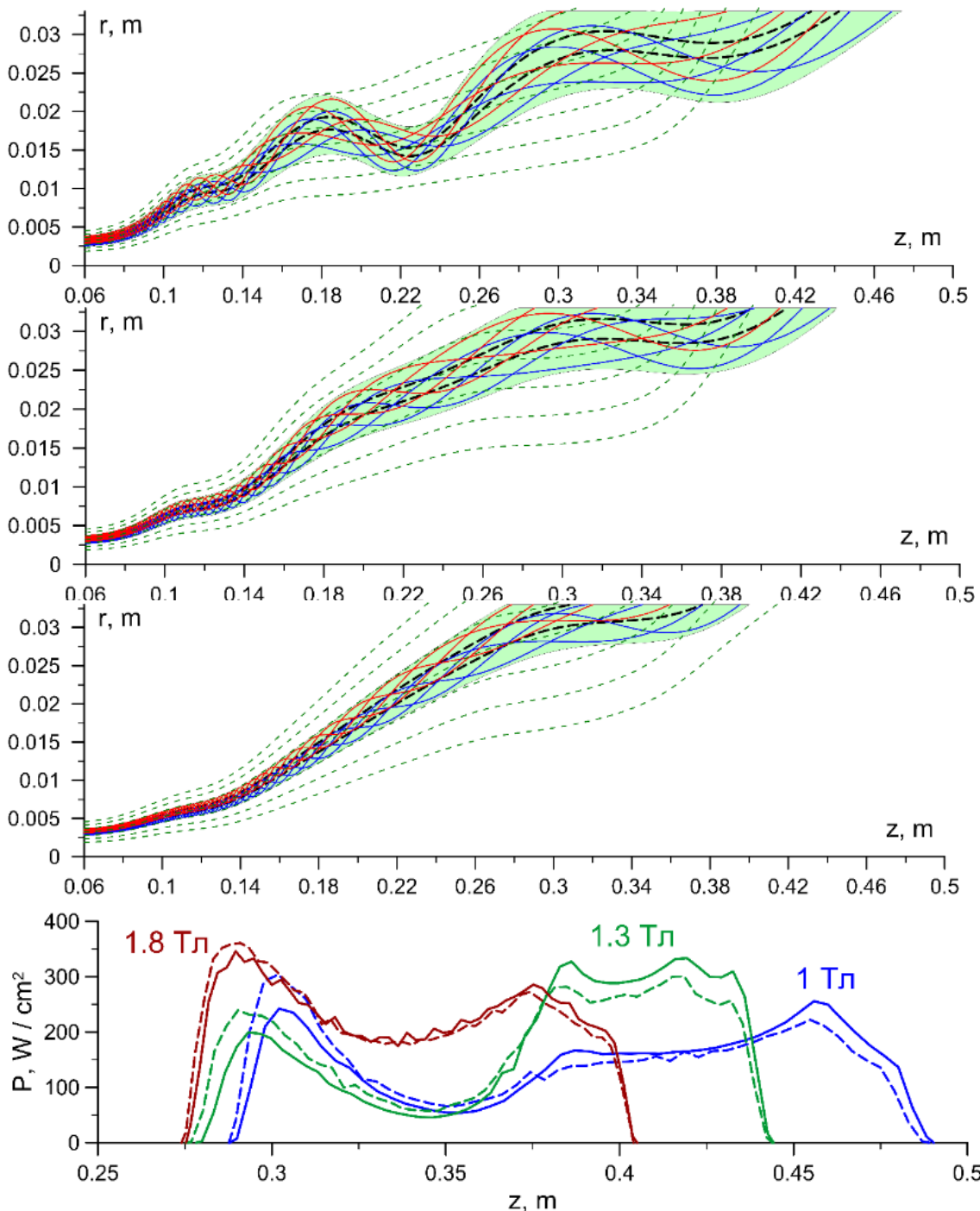


Рис. 6. Оптимизированные с точки зрения осаждаемой плотности мощности траектории ВЭП в коллекторе гиротрона для случаев магнитных полей 1.0, 1.3 и 1.8 Тл соответственно. Жирным пунктиром показаны траектории электронов, имеющих нулевую поперечную скорость; тонким пунктиром – силовые линии магнитного поля. Нижний график демонстрирует распределение плотности мощности на коллекторе

вдоль продольной координаты коллектора с учетом пространственного заряда (пунктир) и без (сплошная линия).

В п. 3.4 рассмотрены приведены результаты экспериментального исследования гиротронного комплекса с МЭС. Приведены результаты сравнения распределения осевого магнитного поля вдоль всей системы с учетом катодной и коллекторных катушек. Получены значения мощности и КПД устойчивой одномодовой генерации с частотой 28 ГГц при токах электронного пучка 0.5-2.2 А. КПД генерации хорошо согласуется с расчетным. В результате экспериментов получена мощность генерации более 20 кВт при КПД всего комплекса (с учетом потребления магнитной системы) 32%, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих коммерческих технологических комплексов.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Промоделирована и экспериментально реализована возможность значительного повышения КПД приборов гиротронного типа посредством профилирования магнитного поля в области резонатора гиротрона. В технологическом гиротроне с рабочей частотой 28 ГГц КПД увеличен в 1.3 раза по сравнению с однородным распределением магнитного поля. Продемонстрирована возможность стабилизации рабочей частоты гиротрона за счет системы маломощных катушек в резонаторной области.

2. Экспериментально продемонстрирована возможность снижения температуры подогревателя катода и, соответственно, существенного (в несколько раз) увеличения срока службы катодного узла за счет дополнительного нагрева эмиттера бомбардировкой отраженными от магнитной пробки электронами.

3. Для систем с широким эмиттером предложена методика позволяющая существенно сократить время на оптимизацию геометрии электродов электронно-оптической системы для достижения высокого КПД генерации.

4. Разработана и испытана магнитно-экранированная система, позволяющая примерно в 4 раза снизить энергопотребление соленоида при той же интенсивности и протяженности магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия.

5. На базе магнитно-экранированной системы разработан технологический гиротрон нового поколения, способный осуществлять эффективную (~35% без рекуперации энергии) генерацию излучения мощностью до 25 кВт на частотах 28, 35, 45, 95 ГГц. Усовершенствованы программные коды для расчета электронной оптики и электронно-волнового взаимодействия, что позволило сократить требуемые вычислительные ресурсы и время, требуемое для оптимизации ключевых узлов гиротрона.

6. В результате экспериментального исследования гиротронного комплекса с магнитно-экранированной системой была достигнута устойчивая генерация рабочей моды на основном циклотронном резонансе на уровне мощности 20 кВт при токе электронного пучка 2.2 А и ускоряющем напряжении 23 кВ при энергопотреблении соленоида 13 кВт. Результирующий КПД всего комплекса составил около 32 %, что в 1.5 раза превышает аналогичный параметр существующих коммерческих технологических комплексов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bykov Yu., Ereemeev A., Glyavin M. et al. // IEEE Trans. 2004. V. PS-32. № 1. P. 67.
2. Bykov Yu.V., Egorov S.V., Ereemeev A.G. et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2015. V. 96. № 11. P. 3518.
3. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. et al. // Diamond and related mater. 2006. V. 15. № 4–8. P. 502.
4. Skalyga V., Izotov I., Golubev S. et al. // Appl. Radiation and Isotopes (in press). doi 10.1016/j.apradiso. 2015.08.015
5. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Vodop'yanov A.V. et al. // High Energy Chem. 2015. V. 49. № 4. P. 267.
6. Nusinovich G.S. // IEEE Trans. 2012. V. PS-27. № 2. P. 313.
7. Куфтин А.Н., Белов С.П. // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 76.
8. Мануилов В.Н., Цимринг Ш.Е. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. по электронике СВЧ. Т. 1. Вакуумная электроника СВЧ. Минск, 1983. С. 192.

9. Fedotov, A.E., Rozental, R.M., Zotova, I.V. et al. Frequency Tunable sub-THz Gyrotron for Direct Measurements of Positronium Hyperfine Structure. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39, 975–983 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0522-2>.
10. Glyavin, M.Yu., Golubyatnikov, G.Yu., Ivanov, A.S., Luchinin, A.G., Matrosov, V.V., Mishagin, K.G., and Morozkin, M.V., *Vestn. Lobachevsky State Univ. Nizhni Novgorod*, 2014, vol. 2, no.1, p. 75.
11. Rzesnicki, T., Piosczyk, B., Kern, S., Illy, S., Jin, J., Samartsev, A., Schlaich, A., and Thumm, M., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, vol. 38, no. 6, p. 1141. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2040842>
12. Matsuki, Y., Ueda, K., Idehara, T., and Ikeda, R., *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, 2012, vol. 33, p. 745. <https://doi.org/10.1007/s10762-012-9890-1>
13. Idehara, T., Ogawa, I., Ohashi, K., and Iwata, Y., *Electr. Eng. Jpn.*, 2004, vol. 149, p. 4. <https://doi.org/10.1002/eej.20084>
14. Bykov, Yu., Denisov, G., Ereemeev, A., Kalynova, G., Kholoptsev, V., Kopelovich, E., Kufiin, A., Lygin, V., Pavelyev, A., Plotnikov, I., Zapevalov, V., and Zavolsky, N., *Proc. Conference Digest of the 2004 Joint 29th Int. Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conference on Terahertz Electronics*, Karlsruhe, 2004, p. 191. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2004.1422019>
15. Glyavin, M., Luchinin, A., and Morozkin, M., *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, vol. 83, p. 074706. <https://doi.org/10.1063/1.4738644>
16. 5. Гольденберг А.Л., Глявин М.Ю., Лещева К.А., Мануилов В.Н. Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2017. Т. 60, № 5. С. 442.
17. V. N. Manuilov and Sh. E. Tsimring, *Radiophys. Quantum Electron.*, 24, No. 4, 338 (1981).
18. Гольденберг А.Л., Петелин М.И., Шестаков Д.И. К расчету адиабатической электронной пушки МЦР//*Электронная техника, Сер. 1 - Электроника СВЧ*, 1973, N 5, С. 73-80.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1A. Glyavin, M.Y., Fedotov, A.E., Zotova, I.V. *et al.* Experimental Demonstration of the Possibility to Expand the Band of Smooth Tuning of Frequency Generation in Short-Cavity Gyrotrons. *Radiophys Quantum El* **61**, 797–800 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09937-2>
- Bykov, Y. V., Ereemeev, A. G., Glyavin, M. Y., Denisov, G. G., Kalynova, G. I., Kopelovich, E. A., . . . Kholoptsev, V. V. (2019). Millimeter-wave gyrotron research system. I. description of the facility. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 61(10), 752-762. doi:10.1007/s11141-019-09933-6
- 2A. Proyavin, M. D., Morozkin, M. V., Luchinin, A. G., Glyavin, M. Y., & Denisov, G. G. (2021). An experimental study of the influence of the longitudinal magnetic-field distribution profile on the

- output characteristics of a gyrotron. *Instruments and Experimental Techniques*, 64(1), 97-101. doi:10.1134/S0020441220060196
- 3A. Glyavin, M. Y., Fedotov, A. E., Zotova, I. V., Luchinin, A. G., Proyavin, M. D., Rozental, R. M., & Tarakanov, V. P. (2019). Experimental demonstration of the possibility to expand the band of smooth tuning of frequency generation in short-cavity gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 61(11), 797-800. doi:10.1007/s11141-019-09937-2
- 4A. Denisov, G. G., Glyavin, M. Y., Fokin, A. P., Kuftin, A. N., Tsvetkov, A. I., Sedov, A. S., . . . Zapevalov, V. E. (2018). First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective thomson scattering diagnostics. *Review of Scientific Instruments*, 89(8) doi:10.1063/1.5040242
- 5A. Glyavin, M. Y., Chirkov, A. V., Denisov, G. G., Fokin, A. P., Kholoptsev, V. V., Kuftin, A. N., . . . Zapevalov, V. E. (2015). Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media. *Review of Scientific Instruments*, 86(5) doi:10.1063/1.4921322
- 6A. Proyavin, M. D., Glyavin, M. Y., & Manuilov, V. N. (2017). Magnetically shielded electron–optical system of a continuous gyrotron with an operating frequency of 24 GHz. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 62(10), 1165-1171. doi:10.1134/S1064226917100126
- 7A. Glyavin, M. Y., Kuntsevich, A. D., Luchinin, A. G., Manuilov, V. N., Morozkin, M. V., Fokin, A. P., & Proyavin, M. D. (2013). A magnetron injection gun with a reduced filament temperature and elongated cathode lifetime. *Technical Physics Letters*, 39(12), 1068-1070. doi:10.1134/S1063785013120080
- 8A. Proyavin, M., Dumbrajs, O., Nusinovich, G., & Glyavin, M. (2020). To the theory of gyrotrons with wide emitters. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 41(2), 141-151. doi:10.1007/s10762-019-00646-5
- 9A. Proyavin, M. D., Glyavin, M. Y., Zaval'sky, N. A., Manuilov, V. N., Morozkin, M. V., Sobolev, D. I., & Krapivnitskaya, T. O. (2019). Development of a high-power continuous-wave gyrotron for high-efficiency technological K-band microwave complexes. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 62(7-8), 506-512. doi:10.1007/s11141-020-09996-w
- 10A. Proyavin, M. D., Manuilov, V. N., Gachev, I. G., Maslov, V. V., Morozkin, M. V., Kuftin, A. N., . . . Glyavin, M. Y. (2020). A magneto-armored warm-solenoid based system for K-band gyrodevices. *Instruments and Experimental Techniques*, 63(1), 97-100. doi:10.1134/S0020441220010078
- 11A. Morozkin, M.V., Proyavin, M.D., Manuilov, V.N. et al. Optimization of Collector Systems of Technological Gyrotrons with Shielded Magnetic Systems. *Radiophys Quantum El* 63, 413–421 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10066-y>

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	Ошибка! Закладка не определена.
ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ГИРОТРОНАМИ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ	Ошибка! Закладка не определена.
1.1. Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором	Ошибка! Закладка не определена.
1.2 Повышение КПД гиротрона на второй гармонике с частотой генерации 30 ГГц и мощностью более 10 кВ за счет профилирования магнитного поля в рабочем пространстве резонатора	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение к главе 1	Ошибка! Закладка не определена.
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГИРОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ	Ошибка! Закладка не определена.
2.1 Разработка магнито-экранированных систем для гиротронных комплексов	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.1 Методика расчета магнитостатического поля. Оценка точности расчета на примере тестовых задач	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.2 Разработка магнитной системы для гиротрона с рабочей частотой 24 ГГц с неадиабатической системой формирования электронного пучка	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.3 Оптимизация магнитной системы с различной конфигурацией ферромагнитных экранов для гиротрона на 24 ГГц с квазиадиабатической МИПО	Ошибка! Закладка не определена.
2.2 Увеличение срока службы катода гиротрона	Ошибка! Закладка не определена.
2.3 Методы численного моделирования электронно-оптической и электродинамической систем гиротрона	Ошибка! Закладка не определена.
2.3.1 Расчет электронной оптики	Ошибка! Закладка не определена.
2.3.2 Расчет и оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия	Ошибка! Закладка не определена.
2.4 Метод оптимизации электронно-оптической системы с учетом влияния на КПД генерации фракций электронного пучка для широких эмиттеров	Ошибка! Закладка не определена.
2.5 Разработка магнитной системы для неадиабатической ЭОС и расчет распределения температуры в катодном узле	Ошибка! Закладка не определена.
2.5.1 Синтез конфигурации катодных катушек и формы ферромагнитной вставки для формирования заданного профиля магнитного поля.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.5.2 Расчет распределения температуры в катодном узле неадиабатической ЭОС	Ошибка! Закладка не определена.

Заключение к главе 2.....	Ошибка! Закладка не определена.
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВНОМ ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ НА БАЗЕ МАГНИТО-ЭКРАНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Разработка и экспериментальное тестирование МЭС для технологических гиротронов нового поколения	Ошибка! Закладка не определена.
3.2 Оптимизация параметров электронно-волнового взаимодействия для основного режима работы гиротрона 28 ГГц/25 кВт. Анализ возможности генерации на частотах 35, 45 и 95 ГГц.	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Результаты расчета электронно-оптической системы в различных программах	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Исследование возможности осаждения электронного потока в коллекторе многорежимного гиротрона с неадиабатическим магнитным полем МЭС	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Результаты экспериментального исследования гиротронного комплекса с МЭС в режиме генерации с частотой 28 ГГц.....	80Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 1.....	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение 2.....	Ошибка! Закладка не определена. Ошибка! Закладка не определена.
Список трудов автора по теме диссертации	Ошибка! Закладка не определена.
Список цитированной литературы.....	Ошибка! Закладка не определена.