

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Скворцовой Нины Николаевны

на диссертацию **Фокина Андрея Павловича**

**«СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ ГИРОТРОНЫ С РЕКОРДНЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

в диссертационный совет Д 002.069.02 при ИПФ РАН

Актуальность избранной темы

Более полувека прошло со времени изобретения гиротрона, однако до сих пор не создано иного столь мощного источника СВЧ, который мог бы работать в непрерывном и квазинепрерывном режимах в ГГц, суб-ТГц и ТГц диапазонах частот. Наука и техника терагерцовых волн начала активно развиваться с 60 – 70-х годов XX века, когда стали доступны первые источники и приёмники такого излучения, тогда же в НИРФИ были предложены варианты первых суб-ТГц гиротронов. В это время началось использование гиротронных комплексов для решения различных научных и прикладных задач, сначала в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС), спектроскопии, радиолокации, а затем и в далеких от физики и техники областях, например, в медицине и вирусологии.

К настоящему времени гиротроны для УТС используются при электронно-циклотронном нагреве плазмы, создании токов увлечения, подавлении неустойчивостей, разработке различных типов радиофизических диагностик. В России функционируют крупномасштабные установки УТС трех основных видов, которые рассматриваются как прототипы будущих термоядерных реакторов. На них используются стенды с мощностями СВЧ порядка МВт, состоящие из нескольких гиротронов, генерирующих излучение на разных частотах: 54.5 ГГц на магнитной ловушке открытого типа ГДЛ (ИЯФ РАН), 75 ГГц на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН), 130 и 140 ГГц на токамаке Т-10 и на строящемся токамаке Т-15МД (НИЦ "Курчатовский институт"). Для будущего токамака-реактора ITER (международного) разработаны и созданы гиротроны мощностью 1 МВт, с частотой 170 ГГц и длительностью импульса СВЧ до 1 часа. С увеличением размеров и магнитных полей в крупномасштабных установках УТС требуется разработка гиротронов с увеличенной мощностью и частотой. Таким образом, актуальным является разработка субтерагерцовых гиротронов большой мощности для радиофизических приложений, используемых в установках УТС.

Возникающие новые области применения СВЧ генераторов (в материаловедении, медицине и др.) требуют создания новых гиротронов с заранее определенными стабильными параметрами. Как правило, для таких приложений необходимы суб-ТГц генераторы средней мощности небольших размеров с гибкими системами управления выходных характеристик излучения. Поэтому актуальность исследования, посвященного разработке таких высокостабильных терагерцовых гиротронов, также не вызывает никаких сомнений.

Диссертация Фокина А.П. посвящена исследованию и анализу радиофизических методов стабилизации частоты излучения и повышения уровня мощности субтерагерцовых гиротронов, и применению разработанных методов для создания гиротронов, работающих в непрерывном (250 ГГц) и импульсном режиме генерации (670 ГГц) с рекордным уровнем мощности в суб-ТГц диапазоне частот.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным анализом и систематизацией экспериментальных данных, а также их соответствием результатам численного моделирования изучаемых процессов в гиротронах.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных экспериментальных результатов не вызывает сомнения. Экспериментальные исследования генераторов проводились на нескольких специализированных гиротронных стендах ИПФ РАН, оборудованных современной диагностической техникой. Достоверность полученных результатов основывается на численном моделировании процессов, протекающих в сложных электродинамических системах гиротронов и его анализе.

Научная новизна связана с экспериментальной разработкой новых радиофизических методик и их использовании для улучшения частотных и мощностных параметров субтерагерцовых гиротронов. Для целого ряда суб-ТГц гиротронов получены необходимые для использования в определенных прикладных задачах характеристики.

- На гиротроне с частотой генерации в ГГц диапазоне отработана методика по стабилизации частоты излучения за счет отражения от нерезонансной нагрузки, позволяющая уменьшить ширину спектра (в два раза). Показана возможность пассивной стабилизации и плавной перестройки частоты и мощности излучения гиротрона за счет использования волны, отраженной от нерезонансной нагрузки.

- Экспериментально продемонстрирована возможность получения узких (вплоть до $\Delta f/f = 10^{-12}$) спектральных линий излучения субтерагерцовых гиротронов (на гиротроне с частотой генерации 263 ГГц).
- Получены максимальные к настоящему времени значения мощности суб-ТГц гиротронов на основной гармонике циклотронной частоты с частотами генерации 250 ГГц в непрерывном режиме на основе сухого криомагнита и 670 ГГц в импульсном режиме на базе импульсного соленоида.

Все разделы диссертации освещались на российских и международных конференциях по радиофизике, обсуждались на научных семинарах в ИПФ РАН и были опубликованы в рецензируемых журналах.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Диссертационная работа посвящена, в основном, экспериментальным результатам по получению улучшенных характеристик суб-ТГц гиротронов. Однако в ней приведены и важные теоретические исследования, существенные для радиофизики СВЧ. Например, для эксперимента с низкочастотным гиротроном (28 ГГц) выполнено моделирование полной электродинамической системы, включающей в себя резонатор гиротрона, волноводный тракт и нерезонансный отражатель, и показано совпадение результатов численного моделирования зависимости частоты и мощности излучения от магнитного поля с результатами эксперимента.

Практическая значимость полученных автором результатов отражена во второй части названия диссертации. Отметим, что все типы рассмотренных гиротронов важны для перспективных приложений. Для изменения структуры керамик (при решении задач материаловедения) используются ГГц гиротроны. В будущих экспериментах на установках УТС возможно использование мощных высокочастотных гиротронов с частотами генерации 250 ГГц и 670 ГГц (при решении задач УТС). Суб-ТГц гиротроны могут быть использованы в плазменных микроволновых разрядах для создания источников точечного ультрафиолетового излучения.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд, в котором получен ряд важных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Отмечаю большой вклад автора в комплексную техническую подготовку при проведении экспериментальных исследований разных типов гиротронов на нескольких специализированных радиофизических стендах. Результаты, полученные автором, широко известны специалистам (радиофизикам), опубликованы в 15 статьях в реферируемых журналах из списка ВАК, неоднократно были доложены на российских и международных семинарах и конференциях.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования

Диссертация написана хорошим научным языком, с использованием специальной терминологии. Несколько незначительных ошибок в подписях при оформлении рисунков не снижают ясности изложения.

По работе имеются следующие замечания

1. Вначале первой главы диссертации указано, что в первом эксперименте в качестве экспериментальной установки использовался технологический гиротронный комплекс с выходной частотой излучения 28 ГГц, т.е. это не суб-ТГц гиротрон. Для этого гиротрона создана модель и проведены теоретические численные расчеты режимов. Является ли такое подробное изучение этого гиротрона необходимым условием для подготовки (методик, моделирования) исследования суб-ТГц гиротронов? Насколько для задач материаловедения (практическое приложение) важна стабилизация частоты и уменьшения ширины спектра излучения за счет воздействия отраженного сигнала на режим генерации гиротрона?

2. К настоящему времени известно, что отраженный от турбулентности плазмы (определяемый неустойчивостями) сигнал может также влиять на частотный спектр гиротрона. Насколько это будет вносить дополнительные коррективы при решении прикладных задач УТС по подавлению плазменных неустойчивостей в будущих установках при помощи описанных гиротронов?

Указанные замечания (вопросы) не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и опубликованные работы автора.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»

Диссертация Фокина Андрея Павловича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для развития генераторов (гиротронов) терагерцового и субтерагерцового диапазонов. Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Официальный оппонент,

Скворцова Нина Николаевна, профессор по специальности «Радиофизика» (01.04.03), доктор физико-математических наук по специальности «Физика плазмы» (01.04.08), ведущий научный сотрудник отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Адрес. 127349, г. Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН, отдел физики плазмы.
Тел. 8-499-135-80-39.

Адрес электронной почты nina@fpl.gpi.ru

Н.Н. Скворцова

25 ноября 2018г.

Подпись Н.Н. Скворцовой удостоверяю

И. О. ученого секретаря ИОФ РАН

д.ф.-м.н.



С.Н. Андреев