

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научно-исследовательской
работе ФГБОУ ВО «СГУ имени
Н.Г. Чернышевского» доктор физико-
математических наук, профессор
Короновский Алексей Александрович



13 Ноября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского») о диссертационной работе Фокина Андрея Павловича «Субтерагерцовые гиротроны с рекордными параметрами для перспективных приложений», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Диссертационная работа А.П. Фокина посвящена вопросам разработки гиротронов коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также поиску способов улучшения их характеристик. В этих частотных диапазонах гиротроны на сегодняшний день имеют неоспоримые преимущества по целому комплексу характеристик. Мощные гиротроны находят применение, прежде всего, в установках электронно-циклотронного нагрева плазмы. Гиротроны средней мощности, работающие в непрерывном и квазинепрерывном режиме представляют интерес для различных спектроскопических приложений, диагностики плазмы, в биомедицинских исследованиях и т.д. Исследование и разработка подобных приборов ведется в наиболее развитых в научно-технологическом отношении странах (помимо России это США, Германия, Япония, Китай, Индия). Таким образом, не вызывает сомнений **актуальность и практическая значимость** темы диссертации.

Основные результаты диссертации изложены в двух главах. **Первая глава** направлена на совершенствование характеристик ТГц гиротронов среднего уровня мощности (порядка десятков и сотен Ватт). Прежде всего, в ней экспериментально

реализована стабилизация частоты гиротрона сигналом, отраженным от внешней удаленной нагрузки. Этот метод стабилизации частоты в последние годы привлек большое внимание, ему посвящен ряд работ, однако экспериментальная демонстрация его возможностей в диссертации осуществлена впервые. Отметим, что диссертант разработал ряд оригинальных методик, например, механически перестраиваемый отражатель, что позволяет изучить влияние фазы отраженного сигнала. Эксперименты приведены как на низкочастотном прототипе — гиротроне диапазона 28 ГГц, предназначенном для микроволновой обработки материалов, так и на гиротроне ТГц диапазона для спектроскопических исследований, разработанном совместно с университетом Фукуи (Япония). В целом полученные результаты хорошо подтверждают развитые теоретические представления и согласуются с компьютерным моделированием.

Также в первой главе развит способ быстрого управления частотой и мощностью генерации гиротрона при помощи модуляции анодным напряжением. Работоспособность метода продемонстрирована на примере спектроскопического гиротрона диапазона 263 ГГц и «технологического» гиротрона диапазона 28 ГГц, однако его применение возможно в принципе для любого гиротрона с магнетронно-инжекционной пушкой. Также проведен оригинальный пионерский эксперимент по передаче звукового сообщения путем модуляции выходной мощности гиротрона.

В заключительном разделе первой главы также получен новый важный результат: разработана схема фазовой автоподстройки частоты за счет управления анодным напряжением и на ее основе достигнуты уникальные характеристики стабилизации частоты излучения гиротрона: ширина спектральной линии составила порядка 1 Гц при относительной ширине $\Delta f/f = 3 \times 10^{-12}$ при времени измерения равном нескольким секундам. Долговременная стабильность, достигнутая в эксперименте, составила $\sim 10^{-9}$ и может быть улучшена до 10^{-12} при использовании более стабильного опорного генератора.

Вторая глава содержит результаты разработки суб-ТГц гиротронов высокой мощности, предназначенных в основном для плазменных исследований. Здесь, во-первых, интерес представляют исследования, направленные на создание гиротрона с частотой 250 ГГц для будущего поколения установок управляемого термоядерного синтеза, таких как DEMO. В итоге был создан гиротрон с мощностью до 300 кВт на основе «сухого» криомагнита. Хотя по причинам технического характера удалось реализовать лишь импульсный режим работы (длительность импульса 20-40 мкс), полученный результат следует признать важным шагом на пути к непрерывному режиму.

Также разработан гиротрон диапазона 670 ГГц с мощностью около 200 кВт для создания локализованного газового разряда. Достигнутые параметры в данном диапазоне

частот следует признать уникальными. Можно также отметить ряд оригинальных находок, например, модификацию магнитной системы, позволяющую уменьшить нагрузку на коллектор и увеличить длительность импульса в два раза.

Таким образом, можно заключить, что диссертацию А.П. Фокина отличают высокий уровень **научной новизны** и **значимости** полученных результатов. В то же время, результаты имеют очевидное **практическое значение**, поскольку позволяют существенно повысить характеристики гиротронов, используемых для уже ставших традиционными приложений (спектроскопия; нагрев плазмы), а также открывают новые области их применения (создание локализованного газового разряда).

Обоснованность и **достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается сопоставлением результатов численных расчетов и экспериментов, а также использованием хорошо зарекомендовавших себя теоретических моделей и экспериментальных методик.

Личный вклад диссертанта в работах, выполненных в соавторстве, также описан достаточно подробно и не вызывает сомнений.

Результаты диссертации представляют интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованиями и разработкой гиротронов и их приложениями в различных областях физики и техники. Результаты могут быть **рекомендованы к использованию** в научно-исследовательских учреждениях и производственных организациях: Институт радиотехники и электроники РАН (г. Москва) и его Саратовский филиал, Институт общей физики РАН (г. Москва), Институт прикладной физики РАН (г. Ниж. Новгород), Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, ЗАО НПП «ГИКОМ», (г. Ниж. Новгород), и др. Результаты могут быть использованы в научных исследованиях и внедрены в учебный процесс в вузах, ведущих подготовку в области радиофизики: Московский, Нижегородский, Новосибирский, Томский, Саратовский университеты, С.-Петербургский политехнический университет, Московский физико-технический институт и др.

Тем не менее, диссертационная работа не свободна от ряда недостатков. Основные **замечания** сводятся к следующему:

- 1) Изложение местами носит излишне краткий, конспективный характер. Например, интересным результатам по передаче звукового сообщения путем модуляции выходной мощности гиротрона уделено примерно полстраницы текста и один рисунок. В п. 2.2.2 указано, что на основе разработанного автором гиротрона «был создан гиротронный комплекс для инициации субтерагерцовым излучением точечного газового разряда, позволивший получить рекордные мощности вакуумного и экстремального

ультрафиолетового излучения». Хотелось бы видеть какие-то количественные характеристики этого излучения.

2) На рис. 1.1.5 на наш взгляд кривые 2 и 3 соответствуют набегу фазы отраженного сигнала $2\pi n \pm \pi/2$ (а не $2\pi n$ и $2\pi(n+1)$, как утверждается в тексте диссертации). В этом случае наклон зависимостей частоты от магнитного поля меняется незначительно (по сравнению со случаем, когда отражения отсутствуют), а сама кривая сдвигается вверх или вниз как целое. В то же время, при набеге фазы $2\pi n$ и $2\pi(n+1)$ кривые должны практически совпадать, и должен отчетливо наблюдаться эффект стабилизации частоты.

3) Остается некая неясность с выбором двухлучевого гиротрона для экспериментальной демонстрации стабилизации частоты отраженным сигналом (п. 1.1.2). С одной стороны, указано, что использование двухлучевой электронно-оптической системы необходимо для обеспечения устойчивой генерации на второй гармонике (780 ГГц), с другой стороны, в эксперименте возбуждалась мода на основной гармонике (321 ГГц).

3) Можно сделать ряд замечаний по оформлению рисунков. Например, на рис. 1.1.8 приведены зависимости для КПД, а не для мощности, как утверждается в тексте. Одна из кривых вместо сплошной линии ошибочно показана пунктиром. На рис. 1.2.1 не видно высокочастотных импульсов с частотой заполнения до 25 МГц, о которых говорится в тексте. Утверждается (с. 35), что «предложенная схема управления позволяет перестраивать параметры гиротрона в полосе до 30 МГц». Вероятно, речь идет все же о диапазоне, в котором удастся перестраивать частоту генерации. Однако на рис. 1.2.4 значения сдвига частоты гораздо меньше, чем 30 МГц. На рис. 1.2.6 не указан масштаб по оси ординат. На рис. 2.1.5 моды обозначены $G_{m,n}$. Вероятно, имеются в виду $TE_{m,n}$ моды.

5) В списке публикаций по теме диссертации, следовало бы указывать всех соавторов, а не только первого автора. Версия списка трудов в автореферате содержит довольно много опечаток (впрочем, в самой диссертации ссылки даны правильно).

Однако отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение. Диссертация А.П. Фокина представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и содержащую новые научные результаты, имеющие существенное значение для радиофизики, включая многочисленные приложения. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.03–«Радиофизика», автореферат достаточно полно и правильно отражает ее содержание. Диссертант является высококвалифицированным специалистом-радиофизиком, имеющим навыки экспериментальных исследований, теоретического анализа и численного


моделирования. Его работы хорошо известны, они неоднократно докладывались на представительных всероссийских и международных конференциях, опубликованы в виде многочисленных статей, в том числе, в престижных международных изданиях. Достоверность и обоснованность основных выводов и положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений.

Диссертация отвечает всем требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор А.П. Фокин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов (протокол № 10 от 30 октября 2018).

Заведующий кафедрой электроники,
колебаний и волн, член-корреспондент РАН,
д.ф.-м.н., профессор

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
тел.: +7 (8452) 51-57-33
E-mail: rector@sgu.ru


12.11.2018

Дмитрий Иванович Трубецков

