

## ОТЗЫВ

официального оппонента Рыскина Никиты Михайловича  
о диссертационной работе Зуева Андрея Сергеевича «Исследование методов  
управления частотными характеристиками гиротронов» на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.4 – «Радиофизика»

Общепризнанно, что гирорезонансные приборы, в особенности — гиротроны, занимают доминирующее положение среди мощных источников излучения в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазоне. Для ряда приложений, в частности в спектроскопии и системах диагностики плазмы, требуется реализовать перестройку частоты генерации в тех или иных пределах. Однако при этом возникают различные трудности, связанные с тем, что колебательная система гиротрона представляет собой высокодобротный резонатор; в гиротронах со сверхразмерными резонаторами обостряется проблема конкуренции мод и т.д. Таким образом, тема диссертации А.С. Зуева, которая в основном направлена на решение указанных проблем, является весьма актуальной.

Перечислим наиболее существенные новые научные результаты, полученные в диссертации. Глава 1 посвящена исследованию возможностей ступенчатой перестройки частоты в очень широких пределах за счет возбуждения последовательности различных поперечных мод резонатора. Это комплексная задача, требующая разработки соответствующей электронно-оптической системы, резонатора, вывода энергии и т.д. Автором разработаны проекты двух гиротронов суб-ТГц диапазона на базе «сухого» криомагнита, имеющегося в ИПФ РАН. Первый из них, с относительно невысокой мощностью, предназначен для спектроскопических применений, его диапазон перестройки составляет 0.2–0.27 ТГц. Второй, с мощностью до 200 кВт, предназначен для диагностики плазмы. В нем реализуется перестройка частоты в пределах свыше октавы (0.1–0.26 ТГц) при последовательном

возбуждении более 20 мод. Также проведено экспериментальное исследование на основе мощного гиротрона, в котором реализована перестройка в диапазоне 0.133–0.25 ТГц с мощностью до 190 кВт. При этом экспериментальные результаты достаточно хорошо совпали с расчетными. При дальнейшей доработке вывода энергии и вакуумного окна мощность генерации может быть значительно увеличена.

В Главе 2 рассмотрено несколько задач, имеющих отношение к проблеме селекции мод в гиротронах, работающих на высших циклотронных гармониках. В разделе 2.1 обсуждается использование отражений для управления режимами колебаний. На примере «технологического» гиротрона с прямым выводом энергии теоретически проанализирована и экспериментально реализована генерация на моде  $TE_{03}$  на третьей гармонике (частота около 40 ГГц) за счет подбора коэффициента отражения от выходного окна. При этом добротность рабочей моды существенно повышается по сравнению с модами-конкурентами на основной и второй гармониках, что приводит к существенному расширению ее зоны генерации.

Интересным также является подход, основанный на введении неоднородности в виде канавки или диафрагмы на выходном конце резонатора, для борьбы с конусностью резонатора (раздел 2.2). Подробное исследование на примере гиротрона диапазона 0.527 ТГц показало, что вариант с диафрагмой в наибольшей степени снижает чувствительность к конусности резонатора и обеспечивает устойчивую генерацию на второй циклотронной гармонике.

В разделе 2.3 анализируется влияние омических потерь. Сделаны полезные оценки снижения омических потерь за счет охлаждения резонатора до криогенных температур. Проанализированы резонаторы, выполненные из различных материалов, представлены результаты радиофизических измерений потерь на отражение, сделан вывод о перспективности использования алюминия.

Заключительная, третья глава диссертации посвящена оригинальному прибору — многоствольному гиротрону (МСГ). Здесь представлен обширный материал, касающийся особенностей устройства электронно-оптической системы, расчетов генерации с перестройкой частоты для различных вариантов МСГ, обсуждается влияние рекуперации и т.д. Наиболее интересным результатом, на мой взгляд, является идея реализации МСГ с четырьмя резонаторами, в которых осуществляется взаимодействие на различных циклотронных гармониках. Таким образом, с помощью единого устройства можно получить генератор на четырех различных частотах, широко востребованных в ЯМР/ДПЯ спектроскопии. При этом два резонатора имеют традиционную структуру (вывод излучения в сторону коллектора), а два — обращенную, с выводом в сторону пушки. Очевидно, что такой прибор имеет несомненное преимущество по сравнению с набором из нескольких гиротронов, прежде всего, в силу использования единой магнитной системы.

В итоге совокупность результатов, представленных в диссертации, можно считать серьезным продвижением в направлении создания частотно-перестраиваемых гиротронов суб-ТГц и ТГц диапазонов, работающих на высших циклотронных гармониках.

Основные замечания по тексту диссертации сводятся к следующему:

1) В разделах «Научная новизна» и «Научная и практическая значимость» во Введении и автореферате по сути еще раз перечисляются основные результаты диссертации, а собственно о новизне и значимости сказано не так много. Напротив, присутствует посторонняя информация: например, соответствие экспериментальных и численных результатов характеризует достоверность, а не новизну.

2) В разделе 2.1, где описаны результаты исследования гиротрона с отражениями, следовало бы дать ссылку на наиболее релевантную работу Е.М. Khutoryan et al. Influence of reflections on frequency tunability and mode competition in the second-harmonic THz gyrotron // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2017. Vol. 38. No. 7. P. 824, где исследовался (в т.ч. экспериментально)

вопрос о влиянии отражений на конкуренцию мод на различных циклотронных гармониках. В этом же разделе при описании результатов численного моделирования указывается, что отражения моделировались с помощью кольцевой диафрагмы в выходном тракте, параметры которой подбирались таким образом, чтобы получить нужный коэффициент отражения. Однако, во-первых, не представлено никаких данных сопоставления коэффициентов отражения (в т.ч. их фаз) от диафрагмы и от окна, которое использовалось в эксперименте. Во-вторых, непонятно, почему возникла необходимость использования такой модели, поскольку модификации граничного условия излучения в случае наличия отраженного сигнала хорошо известны (Zotova I.V. et al., Phys. Plasmas 25, 013104 (2018); Рожнев А.Г. Дисс. ... к.ф.-м.н., Саратов: СГУ, 2019).

3) В этом же разделе представлены результаты расчета стартовых токов различных мод в гиротроне с отражениями (рис. 2.5). Согласно простой оценке, которую можно найти в ссылке [139] в диссертации, если фаза коэффициента отражения оптимальна, стартовый ток в минимуме (в центре зоны генерации) изменяется примерно в  $(1+R)/(1-R)$  раз, где  $R$  — модуль коэффициента отражения. Причем эта оценка согласуется с расчетами по теории с нефиксированной структурой поля (см., например, Melnikova M.M. et al., Proc. APEDE' 2020, P. 73-77. DOI: 10.1109/APEDE48864.2020.9255520). Однако представляется, что на рис. 2.5 этот эффект выражен существенно слабее. Причины такого несоответствия не поясняются. Также замечу, что для построения стартовых токов, вообще говоря, достаточно линейной теории. Непонятно, что заставило автора использовать стационарную нелинейную программу.

4) В разделе 2.3, где исследуется специфика влияния омических потерь на работу гиротрона, анализируется несколько различных гиротронов с рабочими частотами от 30 ГГц до 1 ТГц. При этом для всех рассматриваемых гиротронов используются одни и те же параметры электронного пучка (ток, напряжение, питч-фактор) и одна и та же рабочая мода  $TE_{28,3}$  на второй

циклотронной гармонике. Неясно, насколько полезно такое сопоставление в случае приборов у которых рабочая частота и поперечный размер резонатора отличаются на порядок и более. Также в расчетах используются данные экспериментального измерения потерь на частоте 230 ГГц; неясно, насколько они применимы на других частотах.

5) В третьей главе, посвященной исследованиям многоствольного гиротрона, представлен обширный материал. Однако, ввиду ограниченного объема, многие моменты изложены недостаточно подробно. Например, в разделе 3.3 описаны несколько существенно различных вариантов МСГ, по каждому из которых приведена лишь краткая сводка основных результатов: порядка 1 стр. текста, таблица, рисунок. Аналогичное замечание можно сделать по поводу влияния шероховатости внутренней поверхности резонатора (раздел 3.4.4), рекуперации (раздел 3.4.5).

6) Столь же лаконично сформулированы основные результаты диссертации (раздел «Заключение»). Например, по третьей главе, где в действительности представлены разнообразные и интересные исследования, сформулирован лишь один результат объемом в три строки.

Однако отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации, которая представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне. Представленный в ней материал представляет несомненный интерес для исследователей и разработчиков гиротронов ТГц диапазона. Самостоятельность и оригинальность исследования, включая личный вклад автора, не вызывают сомнений. Результаты диссертации обладают научной новизной и практической значимостью, основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными, а содержание диссертации соответствует специальности 1.3.4–«Радиофизика». Автореферат в целом адекватно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации широко опубликованы, включая 12 статей в авторитетных российских и зарубежных научных изданиях, таких как IEEE

