

ОТЗЫВ

официального оппонента Рыскина Никиты Михайловича
о диссертационной работе Леонтьева Александра Николаевича «Разработка
и исследование релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона длин
волн» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»

Среди мощных источников излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов наиболее перспективными на сегодняшний день являются гиротроны. Они обеспечивают уникальное сочетание выходных параметров и широко применяются в установках нагрева и диагностики плазмы, в системах микроволновой обработки материалов, в спектроскопии и др. Гиротроны непрерывно совершенствуются и достигли весьма высокого уровня развития. Вместе с тем, относительно слабо проработанным является вопрос о возможности создания гиротронов с сильноточными релятивистскими электронными пучками. Ожидается, что подобные приборы позволят освоить субгигаваттный уровень мощностей в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Однако их создание наталкивается на несколько принципиальных трудностей. Это, во-первых, проблемы формирования релятивистских винтовых электронных пучков с приемлемыми значениями питч-фактора и скоростного разброса. Во-вторых, в ряде случаев необходимо коренным образом переработать конструкцию резонатора гиротрона, чтобы получить режимы с высоким КПД при столь высоких токах и напряжениях. Диссертация А.Н. Леонтьева в основном посвящена решению указанных проблем. Таким образом, не вызывает сомнений, что тема диссертации является весьма актуальной.

В диссертации получен целый ряд новых содержательных научных результатов. В Главе 1 разработан гиротрон W-диапазона с рабочей модой $TE_{12,5}$, использующий термоэмиссионный источник электронов на базе ускорителя Сатурн–F. Проведено экспериментальное исследование гиротрона, в ходе которого были получены выходные параметры: частота генерации 94.4 ГГц, выходная мощность до 5.6 МВт, КПД до 20%, а длительность импульса до 1 мкс.

Во второй главе представлены весьма интересные результаты исследования, направленного на создание гиротрона с сильноточным взрывоэмиссионным пучком. Использование взрывоэмиссионного катода позволило бы поднять ток пучка до килоамперного уровня и, соответственно, достичь субгигаваттных мощностей. Однако традиционная конструкция магнетронно-инжекторной пушки в данном случае неприменима. В диссертации предложена оригинальная конструкция электронно-оптической системы (ЭОС) на основе коаксиального диода с магнитной изоляцией и катушки-кикера, которая обеспечивает закручивание пучка. Эта система реализована на сильноточном ускорителе «Синус-6». Получен пучок с питч-фактором порядка 1, током 1.5-2 кА и напряжением 500 кВ.

Однако при этом возникает следующая проблема: режимы, оптимальные с точки зрения получения высоких КПД, достигаются, как правило, при значительно меньших токах. В диссертации для преодоления указанного противоречия предложено в качестве рабочей использовать ТМ-моду, и разработана оригинальная конструкция резонатора с продольными щелями для подавления паразитных ТЕ-мод, которые в обычном гладком резонаторе были бы гораздо более сильно связаны с пучком.

Экспериментально реализованы гиротроны Ка-диапазона с регулярным резонатором и рабочей модой $TE_{3,2}$, а также с продольно-щелевым резонатором и модой $TM_{5,1}$. После определенной доработки конструкции в гиротроне с модой $TE_{3,2}$ была достигнута мощность 40 МВт при длительности импульса до 10 нс. Хотя экспериментально зафиксированные уровни мощности оказались значительно ниже расчетных, данные результаты представляют большой научный и практический интерес.

Наконец, в Главе 3 представлены результаты исследований, направленные на продвижение релятивистских гиротронов в коротковолновую часть миллиметрового диапазона. Здесь выдвинуты две весьма оригинальные идеи. Во-первых, предложен новый тип резонатора с продольными щелями, в котором можно обеспечить возбуждение комбинации нескольких мод с кратными азимутальными индексами. При этом повышается селективность резонатора. В результате были рассчитаны гиротроны на частотах 0.3 ТГц и 0.5 ТГц с релятивистским сильноточным пучком. Численное 3-D PIC моделирование предсказывает выходные мощности на уровне 70-80 МВт.

Также рассмотрена возможность создания умножителя частоты на базе релятивистского гиротрона с взрывоэмиссионным катодом, причем обсуждается умножение на достаточно высоких гармониках, вплоть до частот 300-400 ГГц. Помимо численных расчетов, был проведен эксперимент на основе уже упомянутого гиротрона Ka-диапазона, в котором наблюдалось излучение на третьей гармонике на частоте свыше 100 ГГц.

В итоге совокупность представленных в диссертации результатов можно считать серьезным прогрессом в разработке гиротронов мультимегаваттного уровня мощности миллиметрового диапазона с релятивистскими электронными пучками, что представляет несомненный научно-практический интерес.

Тем не менее, по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний. В основном они связаны с тем, что имеется целый ряд существенных моментов, которые освещены недостаточно подробно.

1) Гиротрон W-диапазона оснащен устройством для ввода внешнего сигнала в резонатор. Однако конструкция этого устройства в диссертации не описана и про воздействие внешним сигналом далее нигде не говорится.

Указано, что для уменьшения трансформации рабочей моды в другие моды профиль перехода между резонатором и выходным излучателем задавался в виде совокупности дуг окружностей с плавными переходами и оптимизировался таким образом, чтобы максимально снизить уровень переизлучения. Однако никаких подтверждающих результатов не приведено, а профиль резонатора на рис. 1.5 изображен в таком масштабе, что рассмотреть его конструкцию затруднительно. Значение проводимости 5.6×10^7 См/м, использованное при моделировании гиротрона W-диапазона, представляется завышенным.

2) В главе 2 описана ЭОС с компрессией релятивистского пучка, создаваемого взрывоэмиссионным катодом. Указано, что данная ЭОС была реализована экспериментально, однако результаты экспериментов описаны недостаточно подробно. По сути автор ограничивается утверждением, что размеры пучка соответствуют расчетным значениям. Аналогичное замечание можно сделать относительно результатов экспериментального исследования гиротронов Ka-диапазона. Они изложены таким образом, что непонятно, насколько успешным оказался эксперимент с гиротроном с рабочей модой ТМ-типа и какие конкретно были достигнуты параметры.

3) В главах 2 и 3 описаны оригинальные конструкции продольно-щелевых резонаторов, позволяющих осуществить дискриминацию тех или иных паразитных мод. Однако электродинамическим свойствам этих резонаторов не уделяется должного внимания. Автор ограничивается тем, что приводит без вывода формулы для добротностей и проводит их сравнение для различных мод. При этом остается много неясных моментов. Например, добротность пропорциональна норме продольной компоненты магнитного поля (стр. 51). Однако для ТМ моды эта компонента, очевидно, равна нулю. Недостаточно подробно описана и методика компьютерного моделирования, хотя речь идет о достаточно сложных и нетривиальных задачах. Например, на стр. 53 утверждается, что «Снаружи пластин для имитации бесконечного пространства располагался поглотитель в виде заостренных продольных ребер, изготовленный методом 3-D печати из фотополимера Visijet SL», как будто речь идет о натурном эксперименте, а не о компьютерной модели. С другой стороны, в подписи к рис. 2.16 сказано: «добротности TE-мод в резонаторе, ограниченном внутренней стенкой соленоида, находящейся снаружи пластин». Значит где-то еще был соленоид, о котором больше ничего не говорится. Не указано, по какой методике была получена диаграмма спектров в зависимости от магнитного поля с высоким разрешением (рис. 3.9), как выделялись поперечные сечения для отдельных мод в гиротроне-умножителе частоты (рис. 3.13 и 3.16).

4) При численном моделировании автор использует различные подходы: одномерную теорию гиротрона с нефиксированной продольной структурой поля, а также PIC-коды KARAT и CST. Однако в диссертации нет никакого обоснования, почему в той или иной ситуации применялся тот или иной код. В ряде случаев упоминается, что задача решалась методом конечных элементов (при этом не говорится, какой конкретно код использовался). Отмечу, что CST не является конечноэлементным кодом, а использует по сути специфическую разновидность метода конечных разностей (Finite Integration Technique), по крайней мере, при моделировании во временной области.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне. Представленный в ней материал представляет несомненный интерес для исследователей и разработчиков мощных источников излучения миллиметрового диапазона. Самостоятельность и оригинальность

исследования, включая личный вклад автора, не вызывают сомнений. Результаты диссертации обладают научной новизной и практической значимостью, а основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Автореферат в целом адекватно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации широко опубликованы, включая 10 статей в ведущих российских и международных научных изданиях, включая такие авторитетные, как IEEE Transactions on Electron Devices, IEEE Transactions on Plasma Science, Physics of Plasmas и др. Также материалы диссертации прошли апробацию на ряде всероссийских и международных конференций. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.4—«Радиофизика».

Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет 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 кандидатским диссертациям, а её автор Леонтьев Александр Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Рыскин Никита Михайлович

д.ф.-м.н. (01.04.03 и 01.04.04), профессор, главный научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и нанoeлектроники (СФ-1), Саратовский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38

e-mail: RyskinNM@info.sgu.ru

Тел. 8(8452)391225

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя учёной степени кандидата физико-математических наук Леонтьева А.Н.

«11» сентября 2023 г.

Подпись Рыскина Н.М. заверяю:

Заместитель директора по научной работе СФ ИРЭ РАН.

к.ф.-м.н.



Д.В. Фатеев