

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЯФ СО РАН,
Академик РАН



Логачев П.В.

« сентября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Леонтьева Александра Николаевича **«Разработка и исследование релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона длин волн»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиоп физика

Исследования в рамках диссертационной работы Леонтьева Александра Николаевича сосредоточены на проблеме повышения мощности и частоты выходного излучения мощных импульсных гиротронов, в которых используются релятивистские электронные пучки, формируемые инжекторами с термоэмиссионными или взрывоэмиссионными катодами. Актуальность этой работы обусловлена тем, что решение обозначенной выше проблемы напрямую относится к пункту 1.3.6.2. «Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн» в программе фундаментальных исследований академии наук РФ на 2021-2030 гг. В качестве основных задач диссертационной работы автором обозначены разработка новых инженерно-физических решений, способных обеспечить эффективную генерацию микроволнового излучения в гиротронах миллиметрового диапазона длин волн в условиях повышения напряжения в ускоряющем промежутке инжектора и тока, получаемого в нём пучка, а также проведение численного моделирования разрабатываемых устройств и создание экспериментальных прототипов на основе разработанных автором подходов.

В указанном направлении исследований автором получен ряд новых результатов. В целом, защищаемые А.Н Леонтьевым положения доказаны и раскрыты в диссертационной

работе. Автореферат в сжатой форме достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, а также заключения, в котором сформулированы основные результаты работы. **Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечена научная новизна проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе описаны исследования импульсного мультимегаваттного релятивистского гиротрона W-диапазона на пучке из инжектора с термоэмиссионным катодом.

В разделе 1.1 приводятся элементы расчета и оптимизации гиротрона. Представлено описание основных решений, примененных для создания компонентов прибора: электронно-оптической системы, формирующей винтовой электронный пучок, пространства электронно-волнового взаимодействия, электродинамической системы вывода высокочастотной энергии.

Раздел 1.2 отведен описанию экспериментального исследования гиротрона W-диапазона с мультимегаваттной выходной мощностью. Описывается система измерения параметров выходного излучения, методика и ход эксперимента, а также обсуждаются результаты.

Во второй главе рассматривается гиротрон Ka-диапазона с килоамперным электронным пучком и субгигаваттной выходной мощностью.

В разделе 2.1 описывается моделирование и расчет электронно-оптической системы на основе магнитно-изолированного коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом и системы раскачки поперечных скоростей в неадиабатическом магнитном поле, формирующей сильноточные винтовые электронные пучки с питч-фактором приближающимся к единице. Описаны методика и результаты экспериментального исследования ЭОС.

В разделе 2.2 предложен резонатор продольно-щелевого типа для селективного возбуждения ТМ-моды в сильноточном гиротроне. Представлена аналитическая теория такого резонатора, результаты расчеты методом конечных элементов и "холодных" электродинамических измерений.

Раздел 2.3 содержит описание моделирования взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с модами гиротронных резонаторов ТЕ и ТМ типов. Описаны модель на основе усредненных уравнений, а также прямое моделирование методом крупных частиц.

В разделе 2.4 приводятся результаты экспериментальных исследований сильноточного гиротрона на модах $TE_{-3,2}$ и $TM_{5,1}$ с мощностью выходного излучения в десятки мегаватт. Обсуждаются возможные способы оптимизации режимов работы гиротрона и повышения выходной мощности.

Содержание **третьей главы** сосредоточено на повышении рабочей частоты сильноточных релятивистских гиротронов до нескольких сотен гигагерц.

В разделе 3.1 на основе аналитического подхода и численного моделирования показано, что в сверхразмерном цилиндрическом резонаторе с M продольно-целевыми разрезами связь парциальных мод регулярного волновода с M и $2M$ индексами может приводить к формированию высокодобротных мод с малыми радиальными потерями на квазикритических частотах. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность селективного возбуждения подобных мод винтовыми электронными пучками в релятивистских гиротронах субтерагерцового диапазона.

В разделе 3.2 в рамках усредненных уравнений и на основе трехмерного моделирования методом крупных частиц исследован режим умножения частоты в сильноточном релятивистском гиротроне. Показано, что отношение мощности излучения на высоких гармониках к уровню генерации на основном циклотронном резонансе на несколько порядков превосходит значения, достижимые в гиротронах со слаборелятивистскими электронными пучками.

По содержанию текста диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов, из которых выделим следующие:

1. В разделе 2.2 утверждается, что использование TM -моды в качестве рабочей в сильноточном релятивистском гиротроне позволяет более эффективно осваивать высокие токи инжекции. Это утверждение не находит подтверждения в расчетах, приведенных в разделе 2.3, где максимальный КПД для гиротронов на модах $TE_{-3,2}$ и $TM_{5,1}$ оказывается одинаковым. Данное несоответствие нуждается в дополнительном комментарии.
2. При обсуждении результатов экспериментального исследования сильноточных релятивистских гиротронов в главе 2 в качестве основной причины существенно пониженной выходной мощности по сравнению с расчетными значениями приводится слишком высокий по сравнению с первоначальными оценками разброс (позиционный и по поперечным скоростям) электронов в пучке. Было бы желательно привести подтверждение данного утверждения, например, с помощью PIC-моделирования.

Отмеченные замечания носят скорее характер пожеланий для дальнейшего развития исследований и не влияют на общее положительное впечатление о диссертационной работе. В целом диссертация Леонтьева Александра Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные задачи создания эффективных импульсных источников мультимегаваттной и субгигаваттной мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Полученные результаты, безусловно, имеют важное прикладное значение и могут быть использованы для дальнейших исследований в ряде академических и других профильных организаций, в том числе, занимающихся практическими разработками в обсуждаемой научной области.

Можно утверждать, что Леонтьев Александр Николаевич - в полной мере специалист в области радиофизики и высокочастотной электроники; его высокая квалификация не вызывает сомнений. Основные результаты его диссертационной работы опубликованы в профильных реферируемых научных журналах, а также неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Применяемые методы исследований свидетельствуют о достоверности полученных результатов.

В целом диссертационная работа Леонтьева Александра Николаевича «Разработка и исследование релятивистских гиротронов миллиметрового диапазона длин волн» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика.

Работа заслушана и обсуждалась на семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН протокол № 12 от 4 июля 2023 года.

Отзыв составил

главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН,
доктор физико-математических наук,



Аржанников А.В.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11

Тел.: +7 383 3294760

Факс: +7 383 3307163

E-mail: inp@inp.nsk.su