

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки «Институт ядерной  
физики им. Г.И. Будкера Сибирского  
отделения Российской академии наук»  
(ИЯФ СО РАН),  
академик, д.ф.-м.н. Логачев П.В.



2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЯФ СО РАН) на диссертационную работу Зуева Андрея Сергеевича «Исследование методов управления частотными характеристиками гиротронов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — Радиофизика.

Цель представленной А.С. Зуевым диссертационной работы состоит в исследовании методов дискретной и/или плавной перестройки частоты генерируемого гиротроном излучения применительно к возможности управления частотными характеристиками современных гиротронных комплексов, а также методов селекции мод колебаний в резонаторе гиротрона, способствующих, в частности, повышению эффективности этих приборов в терагерцовом диапазоне.

**Актуальность диссертационной работы.** В настоящее время потоки миллиметрового и субтерагерцового излучения различной мощности находят применение в установках термоядерного синтеза и систем безопасности, в сфере физических, биологических и медицинских исследований, а также и в других приложениях. Одним из перспективных источников излучения этого диапазона частот признаны гиротроны.

Гиротроны субтерагерцового диапазона мегаваттного уровня мощности при миллисекундной длительности импульсов уже активно используются для электронно-циклотронного нагрева плазмы и её диагностики в установках по управляемому термоядерному синтезу (УТС). При этом, возможности использования гиротронной системы ЭЦ-нагрева существенно расширяются, если при поиске и поддержании оптимальных режимов этих крупных плазменных установок применяется одновременно несколько гиротронов, работающих на разных, отличающихся на десятки гигагерц, частотах. В дополнение к этому, для ряда направлений исследований и приложений определяющим фактором применения потока излучения признаётся именно возможность плавной перестройки его частоты, что накладывает особые требования к источнику. Кроме того, прослеживается тенденция использовать потоки излучения всё более высокой частоты

вплоть до терагерцового диапазона, что заставляет разработчиков гиротронов концентрировать свои усилия в работе и на этом направлении исследования.

Таким образом, в последнее десятилетие сложилась потребность в создании гиротронов, обеспечивающих возможность дискретной и/или широкополосной плавной перестройкой генерируемой частоты в области миллиметровых и субмиллиметровых волн, что определило несомненную актуальность проведенных в диссертационной работе исследований.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация А.С. Зуева состоит из введения, трех глав, заключения, трехстраничного приложения, общего списка литературы из 191 наименований, а также отдельно составленного списка трудов автора по теме диссертации из 56 наименований. Полный объем текста составляет 162 страницы, включая титульный лист, оглавление, 82 рисунка, 21 таблицу.

Во **Введении** обосновывается актуальность проведенных в диссертации исследований, формулируется цель и ставятся задачи работы, излагаются ее научная новизна и практическая значимость, формулируются выносимые на защиту положения, приводятся данные об апробации работы, личном вкладе автора и количестве публикаций по теме диссертации.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена разработке субтерагерцовых многочастотных гиротронов существенно разной мощности с возможностью дискретной перестройки частоты. С целью анализа возможности реализации широкополосной дискретной перестройки выполнено численное моделирование двух вариантов многочастотных гиротронов, отличающиеся по генерируемой мощности на три порядка величины (200 Вт и 200 кВт), и проведен эксперимент на базе имеющегося в ИПФ РАН гиротронного комплекса с мощностью до 330 кВт на частоте 250 ГГц. В экспериментах с коррекцией магнитного поля на катоде продемонстрировано возбуждение десяти мод в интервале частот 133–250 ГГц с мощностью от 35 до 200 кВт.

Во **второй главе** рассмотрены перспективные методы дополнительной селекции мод в гиротронах при их работе на высоких циклотронных гармониках. В частности, в параграфе 2.1 представлены результаты экспериментов по возбуждению в непрерывном гиротроне моды на третьей циклотронной гармонике с помощью частотно селективного отражения (с помощью изменения толщины выходного окна). Продемонстрирована устойчивая генерация при работе на третьей гармонике на частоте 40,9 ГГц с мощностью выходного излучения 3 кВт и КПД 8%.

В следующем параграфе (2.2) этой главы анализируются возможности уменьшения влияния слабой конусности регулярного участка резонатора на выходные характеристики терагерцового гиротрона при помощи малой неоднородности по окончании регулярного участка резонатора.

В последнем параграфе этой главы показано, что снижение омических потерь в резонаторе **маломощных** терагерцовых гиротронов путем его охлаждения до криогенных температур позволяет улучшить условия селекции рабочих мод и повысить эффективность и мощность выходного излучения прибора.

В **третьей главе** предложена новая, нетрадиционная схема гиротрона, который получил название многоствольный гиротрон (МСГ). Многоствольные гиротроны перспективны применительно к расширению интервала перестройки генерируемой частоты, или к продвижению вверх по частоте в терагерцовый диапазон за счёт работы на

высоких циклотронных гармониках. Они также могут быть использованы для одновременной, или последовательной генерации на кратных частотах в рамках широкого интервала частот. Очевидным преимуществом МСГ по сравнению с набором отдельных гиротронов является использование одной магнитной системы, что уменьшает стоимость гиротронной установки и упрощает её использование, например, одновременно для нескольких ДПЯ-ЯМР спектрометров.

В **Заключении** сформулированы шесть основных результатов работы, наиболее важными из которых следует признать следующие три:

1. Экспериментально продемонстрирована реализуемость дискретной перестройки частоты в диапазоне 133,9–249,5 ГГц (почти на октаву) в мощном субтерагерцовом гиротроне.
2. Численным моделированием и проведенными экспериментами показано, что при работе гиротрона в условиях сильной конкуренции мод, введение в его систему отражения для одной из мод позволяет обеспечить возбуждение и устойчивую генерацию в нём излучения на высокой циклотронной гармонике.
3. Предложена концепция многоствольных гиротронов и, в значительной мере, проанализирована методика их разработки. Проведенное численное моделирование многоствольного гиротрона продемонстрировало возможность одновременной генерации излучения на трёх кратных частотах 263, 395 и 526 ГГц.

При прочтении диссертационной работы возникли следующие **вопросы и замечания**:

1. На странице 55 представлен Рисунок 1.26, который сопровождается подписью «Характерная осциллограмма ускоряющего напряжения и тока пучка при возбуждении моды TE-16,9. Пример сигнала, зарегистрированного анализатором спектра на частоте 246,9 ГГц представлен зелёной кривой». При знакомстве с этим рисунком возникает вопрос: Чем вызваны такие всплески на осциллограммах тока пучка и сигнала с анализатора спектра?
2. В продолжении этого вопроса можно указать, что на следующей странице 56 в Таблица 1.9 приводятся результаты измерения импульсной мощности сигнала излучения с точностью в три–четыре значащие цифры, хотя было видно из Рисунка 1.26, регистрируемый импульс излучения сильно изрезан при изменении во времени. Необходимы дополнительные пояснения по этому несоответствию.
3. На стр. 70 сообщается, что «Радиус регулярной части резонатора равен 1,9881 мм». Трудно представить каким методом можно изготовить и проконтролировать диаметр отверстия с точностью 100 нанометров на длине регулярной части резонатора. Поэтому требуются комментарии по процедуре создания этого объекта и контроля его размеров.
4. В рамках теоретического рассмотрения детально проанализирована концепция многоствольного гиротрона, но эта концепция ещё не прошла экспериментальной проверки даже в части создания многолучевой пушки, что несколько понижает положительную оценку достижений, описанных в третьей главе. В то же время достаточно очевидно, что решение задач экспериментальных исследований этой направленности следует ожидать на последующих этапах работы.
5. Текст диссертации написан логично, практически лишён грамматических ошибок и сопровождается хорошо оформленным иллюстративным материалом. Но нельзя не

упоминать, что в ряде случаев наблюдается отсутствие запятых в тех местах текста, где они необходимы.

Представленные замечания по тексту не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Следует признать, что представленные в диссертации результаты исследований и положения, выносимые на защиту, в полной мере обоснованы, и имеют несомненную научную и практическую значимость. Методы исследования, применяемые автором в работе, достаточно надежны и хорошо апробированы. **Достоверность** полученных автором результатов обеспечивается взаимной согласованностью результатов численных расчётов и экспериментальных исследований. Эта достоверность также подтверждается публикациями автора в высокорейтинговых научных журналах, а также представлением автором результатов своих исследований на всероссийских и международных конференциях. Результаты диссертационной работы изложены в 56 публикациях, из которых 12 статей опубликовано в рецензируемых российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 43 статей и тезисов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, один патент.

Диссертационная работа А.С. Зуева представляет самостоятельное и целостное исследование, выполненное на актуальную тему и на высоком профессиональном уровне. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Работа отвечает всем требованиям к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор А.С. Зуев несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Выступление Андрея Сергеевича Зуева по материалам, изложенным в диссертации «Исследование методов управления частотными характеристиками гиротронов», и отзыв ведущей организации, составленный по результатам прочтения её текста, заслушаны и одобрены на Семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН, проведенном 23 января 2024 года.

Отзыв составил главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН, доктор физико-математических наук А.В. Аржанников.

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



А.В. Аржанников

Сведения о ведущей организации:

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»

(ИЯФ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

Телефон: +7 383 329-47-60

Телефон: +7 383 329-40-00 - справочная информационная служба

Email: <http://www.inp.nsk.su>