

В диссертационный совет 24.1.238.01

при ФГБНУ «Федеральный

исследовательский центр

Институт прикладной физики им.

А.В. Гапонова-Грехова

Российской академии наук»

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 – радиофизика

Генерация СВЧ-излучения высокой и сверхвысокой мощности основана в настоящее время на использовании методов и устройств вакуумной электроники. Принципы такой генерации базируются на взаимодействии электронного потока, обладающего большим энергетическим потенциалом, с электромагнитным полем, возбуждающимся в электродинамических структурах с высокой электропрочностью. Сохраняющаяся потребность в повышении частоты и мощности выходного излучения стимулирует поиск новых механизмов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем, перспективных, в частности, для продвижения устройств вакуумной СВЧ электроники в область субтерагерцовых волн. Среди таких устройств следует выделить гирорезонансные приборы, в которых винтовой электронный поток (ВЭП) взаимодействует с модами открытого резонатора на частоте, близкой к циклотронной частоте электронов или ее гармоникам. Для ряда современных приложений требуются гиротроны, способные обеспечить в миллиметровом диапазоне длин волн мегаваттный и субгигаваттный уровень выходной СВЧ-мощности. Добиться столь высокой выходной мощности возможно при использовании сильноточных ВЭП с релятивистскими энергиями частиц. Реализация релятивистских гиротронов

сопряжена с решением ряд сложных задач, связанных как с формированием ВЭП в электронно-оптической системе, так и с обеспечением эффективной передачи энергии от электронов к электромагнитному полю в электродинамической системе. В связи с этим диссертационная работа Леонтьева А.Н., в которой (1) теоретически и экспериментально исследуются релятивистские гиротроны с частотой в диапазоне 90–100 ГГц и с частотой около 30 ГГц с различными типами пушек: магнетронно-инжекторной пушкой с термокатодом и пушкой с взрывоэмиссионным катодом, и (2) аналитически и с использованием численного моделирования исследуются новые резонаторные системы, перспективные для получения субтерагерцового излучения большой мощности в релятивистских гиротронах, представляет собой вполне актуальное исследование и соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика.

Научная новизна работы очевидна: автором предложены и исследованы новые типы резонаторов для сильноточных гиротронов с релятивистскими энергиями электронов, рассчитана и экспериментально реализована система формирования винтового электронного пучка на основе коаксиального диода с взрывоэмиссионным катодом, обеспечивающая значительное токопрохождение при движении частиц от катода до резонатора, впервые в эксперименте с релятивистским гиротроном 3-мм диапазона длин волн показана возможность генерации СВЧ-излучения с мощностью около 5 МВт, экспериментально продемонстрирована возможность генерации СВЧ-мощности в десятки мегаватт в гиротроне с взрывоэмиссионным катодом, в результате расчетов показаны перспективы достижения высокой частоты излучения в релятивистских гиротронах, работающих на высоких циклотронных гармониках в режиме умножения частоты. Не вызывает сомнения также и практическая значимость работы. Поставленные в работе задачи решены автором.

Полученные результаты изложены в трех главах. Остановлюсь ниже на наиболее важных, на мой взгляд, результатах работы.

Глава 1 посвящена исследованию мощного импульсного релятивистского гиротрона с термоэмиссионным катодом, рассчитанного на генерацию СВЧ-излучения в 3-мм диапазоне длин волн. В первом разделе описаны результаты

расчета формирования ВЭП в электронно-оптической системе и его взаимодействия с электромагнитным полем в резонаторе. На основе расчетных данных предсказана возможность генерации СВЧ-излучения с мощностью 5–10 МВт с КПД более 30%. Во втором разделе описаны особенности экспериментальной установки и методик измерений, которые были использованы в экспериментах с релятивистским гиротроном с термокатодом. В результате этих экспериментов на частоте 94,4 ГГц была зарегистрирована мощность в максимуме импульса СВЧ-излучения, равная 5,6 МВт, что соответствует КПД более 20%.

Глава 2 посвящена исследованию релятивистского гиротрона 8-мм диапазона длин волн излучения с взрывоэмиссионным катодом, предназначенного для генерации СВЧ-излучения с мощностью в десятки мегаватт. В разделе 2.1 изучается электронно-оптическая система этого гиротрона. В расчетах показана возможность формирования ВЭП со средним питч-фактором около 1 при использовании коаксиального диода, расположенного в слабом магнитном поле, и специальной катушки (кикера), предназначенной для увеличения поперечной скорости электронов. Для снижения осаждения электронов на канале транспортировки и обеспечения высокого токопрохождения до резонатора используется магнитная компрессия пучка. Распределения электронов в плоскости поперечного сечения ВЭП, полученные в расчетах, удовлетворительно согласуются с аналогичными распределениями, зарегистрированными в модельных экспериментах при использовании специальных мишеней, установленных в коллекторной области гиротрона. В разделе 2.2 теоретически исследуются характеристики нового типа щелевых резонаторов, предназначенных для возбуждения ТМ-мод в релятивистском гиротроне, а в разделе 2.3 численно моделируется взаимодействие ВЭП с параметрами, которые могут быть реализованы в гиротроне с взрывоэмиссионным катодом, с электромагнитным полем в классическом регулярном и пластинчато-щелевом резонаторах. В результате показана возможность генерации СВЧ-мощности более 200 МВт на частотах в диапазоне 30–35 ГГц. В разделе 2.4 описаны результаты экспериментальных исследований. Специальные меры приняты для подавления самовозбуждения паразитного излучения в области формирования ВЭП до его

попадания в резонатор. Эксперименты показали возможность достижения пиковой выходной мощности около 40 МВт в 8-мм диапазоне длин волн излучения.

Важными представляются результаты, описанные в Главе 3. В ней рассмотрены перспективы повышения частот релятивистских гиротронов до нескольких сотен гигагерц. Изучена возможность возбуждения связки мод с кратными азимутальными индексами в щелевых резонаторах и в расчетах показана возможность генерации СВЧ-излучения с мощностью 70-80 МВт и частотами порядка 0.3 и 0.5 ТГц. Кроме этого, теоретически исследованы режимы работы релятивистского гиротрона при генерации излучения на высоких гармониках циклотронной частоты одновременно с генерацией на основной гармонике. При уровне выходной мощности примерно 200 МВт на основной гармонике мощность излучения на третьей гармонике может достигать 700 кВт, а на четвертой и пятой – примерно 200 кВт.

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить, что она оставляет хорошее впечатление. Это законченная научно-исследовательская работа, связанная с исследованием релятивистских гиротронов. В ней представлен большой объем новой экспериментальной информации, получение которой, безусловно, потребовало больших усилий и профессиональных навыков. Преимуществом работы является использование гиротронов с различными параметрами и системами формирования электронного потока для достижения общей цели продвижения гирорезонансных генераторов в область сверхбольшой выходной мощности и высокой частоты излучения. Основные результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на представительных международных конференциях. Диссертация написана понятным языком.

Отмечу основные замечания и вопросы.

1. Практически нет оценок погрешности измерения тех или иных величин в работе. Понятно, что в сложном комплексном эксперименте дать такую оценку для всех величин затруднительно. Однако в отдельных случаях, на мой взгляд, это может быть важно. Например, выходная СВЧ-мощность в работе оценивается по энергии, поглощенной в калориметре, с учетом формы сигнала

выходного излучения, длительность импульса которого может составлять единицы наносекунд. При сильной изрезанности этого сигнала (рис. 2.28) на его форму может оказывать влияние частотные характеристики измерительной цепи и приемной аппаратуры. Какова точность измерения "пиковой" СВЧ-мощности?

2. С чем может быть связана причина указанной выше сильной изрезанности импульса выходного излучения, которая не наблюдается в расчетах?
3. Чем обусловлен выбор временного вычислителя для определения параметров резонаторов в программе CST Studio Suite (стр. 83)? Насколько известно, для подобных целей обычно используется вычислитель Eigenmode Solver, который может довольно быстро рассчитать параметры трехмерного объемного резонатора.
4. Общее замечание касается отсутствия в отдельных случаях важных подробностей расчетов и экспериментов, а также обоснованности сделанных выводов и предположений, которые могли бы, на мой взгляд, помочь читателю лучше оценить данную работу. Некоторые подобные примеры:
 - каким образом вспомогательный катод позволяет регулировать ток основного катода (стр. 39) и как такая регулировка позволит обеспечить выполнение требований к электронно-оптической системе (стр. 35) при отсутствии компрессии ВЭП;
 - использовался ли отдельный емкостной накопитель для питания кикера или такой накопитель был один для питания всех частей магнитной системы гиротрона (стр. 66);
 - какие выводы можно сделать из результатов изменений в гиротроне с термокатодом при длинном импульсе напряжения (стр. 31) и чем эти результаты могут дополнить данные, полученные при коротком импульсе;
 - какие решения по оптимизации параметров электронно-оптической системы могут позволить достичь уровня выходной мощности более 100 МВт в релятивистских гиротронах с взрывоэмиссионными катодами (стр. 74);
5. Следует также отметить имеющиеся в отдельных случаях недостатки в представлении материала диссертационной работы: отсутствие единиц измерения у некоторых величин на рисунках; смесь русского и английского

языков на рисунках; ошибки в нумерации рисунков (рис. 2.27); отсутствие или лишние точки, запятые, заглавные буквы, в частности в названиях рисунков и таблиц; использование тире вместо запятой при обозначении индексов мод; отсутствие ссылок при использовании известных уравнений или разработанных ранее методик измерений.

Отмечу, что указанные замечания не ставят под сомнение общий высокий уровень диссертационной работы.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Научные положения работы в полной степени обоснованы. Достоверность результатов не вызывает сомнения. Личный вклад автора также очевиден.

Исходя из вышесказанного, считаю, что диссертационная работа Леонтьева А.Н. соответствует требованиям и критериям "Положения о порядке присуждения степеней" ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Официальный оппонент –

Лукша Олег Игоревич

уч. звание – доцент, уч. степень – доктор физ.-мат. наук

профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

07.09.2023

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

E-mail: gyrotron@mail.ru

Тел.: +7(812)552-61-27

Адрес: 195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,

д. 29, СПбПУ

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

