

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Трофимов Павел Анатольевич

**Повышение эффективности гиротронов путем улучшения качества
электронного потока и многоступенчатой рекуперации остаточной энергии
электронов**

Направление подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_04 – Физическая электроника

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Трофимов Павел
Анатольевич

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н.,
Лукша Олег Игоревич

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей инженерно-физической школе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:

**Журихина Валентина
Владимировна**

доктор физико-математических
наук, доцент

Научный руководитель:

Лукша Олег Игоревич

доктор физико-математических
наук, доцент

Рецензент:

Григорьев Андрей Дмитриевич

доктор технических наук,
профессор

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина)», профессор

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время источники излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона и, в частности, гиротроны находят свое применение во многих важных фундаментальных исследованиях и практических приложениях [1–3]. Области применения современных гиротронов в установках по микроволновой обработке материалов, при нагреве высокотемпературной плазмы в токамаках и стеллараторах и для других приложений диктуют необходимость увеличения эффективности работы и снижения энергопотребления таких приборов.

Эффективность и достижимые параметры гиротронов зависят от скоростных и энергетических характеристик электронов формируемого винтового электронного потока (ВЭП), являющегося своеобразной активной средой [1–3]. Наиболее распространенным типом электронно-оптических систем (ЭОС), используемых в мощных гиротронах, является система, включающая магнетронно-инжекторную пушку (МИП) и область адиабатически нарастающего магнитного поля. Среди факторов, определяющих качество ВЭП, можно выделить среднюю осцилляторную энергию электронов, разброс их поперечной и продольной скорости, энергетический разброс, а также пространственную структуру потока (например, [4]). Формирование однородного в поперечном сечении ВЭП с малыми скоростным и энергетическим разбросами позволяет обеспечить работу гироприборов в режимах с увеличенной энергией циклотронного вращения частиц, которая является источником генерируемой высокочастотного излучения.

Значительное влияние на качество ВЭП в гиротронах оказывает неоднородность эмиссии с термокатода. Причинами возникновения неоднородности являются неравномерный нагрев поверхности эмиттера из-за неидеальности нагревательного элемента в конструкции, а также распределение работы выхода электронов, которое зависит от местоположения эмиссионных центров. Неоднородный по плотности тока ВЭП имеет повышенный скоростной

разброс и искаженное распределение электрического поля, что способствует развитию отличных от рабочей мод в резонаторе, а также приводит к неоднородному осаждению мощности электронного потока на коллектор [5–7]. Кроме того, неоднородность плотности тока может привести к развитию неустойчивости, которая возбуждается в облаке электронов, захваченном в своеобразную ловушку между магнитным зеркалом перед резонатором и катодом, и сопровождается появлением паразитных низкочастотных колебаний (НЧК) пространственного заряда [8–10]. Большинство исследований, направленных на изучение влияния неоднородности эмиттеров на работу гироприборов, базировались на оценке интегрального коэффициента эмиссионной неоднородности, полученной путем дифференцирования вольт-амперной характеристики МИП [11–13]. Однако, для более подробного рассмотрения катодной проблемы в гиротронах необходимо принимать во внимание не только значение интегрального коэффициента, но и пространственное распределение неоднородностей по поверхности термокатода. Актуальной поэтому является возможность изучить влияние формы пространственного распределения плотности тока эмиссии на качество ВЭП при помощи средств трехмерного численного моделирования, используя при этом измеренные экспериментально распределения с поверхности различных катодов. Такие распределения были ранее получены в СПбПУ [5, 8, 14].

Подробный теоретический анализ ВЭП в гироприборах с учетом статических и динамических процессов, даже с использованием современных систем численного моделирования, весьма сложен. Большой научно-практической ценностью поэтому обладают слабовозмущающие высокоинформативные методики, позволяющие экспериментально определить параметры электронного потока на разных участках прибора, особенно на участке его формирования. К сожалению, реализуемые в настоящее время методики (например, [15, 16]) не обеспечивают достаточный уровень информативности, либо неприменимы в рабочих режимах гиротронов из-за возмущающего действия анализаторов, устанавливаемых на пути движения электронов. Актуальной задачей является разработка новых слабовозмущающих методов диагностики ВЭП, позволяющих

определять параметры скоростного распределения электронов на участке формирования электронного потока.

Повышения качества ВЭП и, как следствие, электронного КПД гиротронов можно добиться в результате оптимизации распределений электрического и магнитного поля в области формирования пучка [8, 14, 17, 18]. Такая оптимизация позволяет снизить скоростной разброс электронов, подавить паразитные колебания пространственного заряда и увеличить средний питч-фактор α ($\alpha = v_{\perp} / v_{\parallel}$, где v_{\perp} и v_{\parallel} – поперечная и продольная компоненты скорости электрона).

Как показывает практика, электронный КПД мощных гиротронов обычно не превышает 30–40 %. При этом полный КПД, который определяется отношением выходной СВЧ мощности к мощности, потребляемой из сети, может быть дополнительно повышен при использовании коллектора с системой рекуперации энергии отработанного электронного потока. В таком коллекторе электроны тормозятся электрическим полем, тем самым возвращая часть остаточной энергии, не переданной электромагнитному полю, обратно в электрическую цепь. Системы одноступенчатой рекуперации широко применяются в мощных гиротронах, что позволяет увеличить их полный КПД до 50–55% [3, 19]. Дальнейшее повышение эффективности работы гиротрона возможно в результате отдельного торможения фракций электронного потока с разной энергией, что обеспечивает многоступенчатую рекуперацию электронного потока [20–23]. Однако сложность пространственной сепарации электронных фракций ВЭП в коллекторной области гиротронов из-за наличия остаточного магнитного поля в этой области, а также вследствие имеющегося в пучке разброса электронов по компонентам скорости и координатам значительно усложняют реализацию систем многоступенчатой рекуперации в этих приборах. На данный момент большинство разрабатываемых систем многоступенчатой рекуперации для гиротронов находятся на стадии численных расчетов.

Таким образом, актуальным является проведение исследования, направленного на достижение повышенной эффективности гиротронов как за счет формирования ВЭП высокого качества при оптимизированных распределениях

электрического и магнитного полей, так и за счет эффективной многоступенчатой рекуперации энергии отработанного ВЭП.

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключалась в определении закономерностей формирования винтового электронного потока высокого качества в гиротронах и возможностей повышения на этой основе их электронного КПД, а также в выявлении эффективных методов пространственной сепарации электронов отработанного пучка для построения коллекторов с многоступенчатой рекуперацией в мощных гироприборах.

Задачи:

Определение закономерностей влияния неоднородности эмиссии с катода на качество ВЭП с помощью трехмерного численного моделирования при использовании распределений плотности тока эмиссии, измеренных для различных катодов в гиротроне СПБПУ с частотой 74.2 ГГц и выходной мощностью примерно 100 кВт.

Проведение комплексного численного моделирования процессов в гиротроне СПБПУ, включающего траекторный анализ в электронно-оптической системе, расчет взаимодействия электронного пучка с высокочастотным полем в резонаторе и траекторный анализ в коллекторной области, с целью определения режимов с малым скоростным разбросом электронов и повышенными питч-фактором и электронным КПД и получения информации о параметрах отработанного пучка для разработки системы рекуперации.

Разработка слабовозмущающего метода диагностики, позволяющего определять скоростные характеристики электронного пучка перед поступлением в резонатор, и проектирование диагностической секции для реализации этого метода диагностики в гиротроне СПБПУ.

Разработка нового метода пространственной сепарации электронов с различной энергией в ВЭП гиротронов, предназначенного для реализации на его основе системы многоступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов.

Разработка систем многоступенчатой рекуперации энергии в коллекторах гиротрона СПБПУ и прототипа гиротрона для проекта DEMO. Определение возможностей достижения повышенных значений полного КПД в разработанных системах многоступенчатой рекуперации.

Экспериментальное исследование возможностей повышения полного КПД гиротрона СПБПУ в режимах с малым скоростным разбросом, подавленными паразитными колебаниями пространственного заряда и высоким питч-фактором, достигнутыми в результате оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП, а также при реализации системы рекуперации остаточной энергии электронов.

Научная новизна

Впервые был проведен трехмерный траекторный анализ в ЭОС гиротрона с неоднородными катодами, который показал необходимость учета влияния на качество ВЭП не только интегрального коэффициента эмиссионной неоднородности, но и особенностей пространственного распределения тока эмиссии на поверхности катода.

Разработан новый слабозмущающий метод определения скоростных характеристик электронов в ВЭП, основанный на усилении СВЧ сигнала малой мощности при взаимодействии ВЭП с электромагнитным полем в замедляющей системе с дисперсией.

Разработан новый метод пространственной сепарации электронов в коллекторной области гиротрона, основанный на радиальном дрейфе электронов под действием скрещенных азимутальном магнитном и продольном электрическом полях. На базе данного метода были спроектированы системы многоступенчатой рекуперации для гиротронов средней и высокой мощности. В результате численного моделирования показана возможность достижения полного КПД гиротронов 70-80 % при использовании разработанных систем рекуперации энергии.

Экспериментально исследован метод повышения качества ВЭП, основанный на регулировании распределения электрического поля у поверхности

эмитирующего пояса электронной пушки при использовании катода с многосекционным управляющим электродом. Реализованы режимы гиротрона СПБПУ с электронным КПД свыше 45 % в результате оптимизации распределений электрического поля в прикатодной области и магнитного поля в области компрессии пучка. Экспериментально показана возможность повышения полного КПД гиротрона СПБПУ до значений более 60 % в результате рекуперации остаточной энергии электронов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в определении новых закономерностей влияния неоднородности эмиссии с термокатода на качество ВЭП в гиротронах; в установлении механизмов повышения качества ВЭП и эффективности работы гиротронов при оптимизации распределений электрического и магнитного полей в области формирования пучка; в определении механизма для эффективной пространственной сепарации электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях для многоступенчатой рекуперации энергии в гиротронах.

Практическая значимость заключается в разработке нового метода улучшения качества ВЭП за счет оптимизации распределения электрического поля при использовании многосекционного управляющего катодного узла. Данный метод может быть применен в гиротронах для уменьшения скоростного разброса электронов, что позволит реализовывать рабочие режимы с высоким питч-фактором и, следовательно, с высоким электронным КПД. Разработанный слабовозмущающий метод диагностики может быть использован в гиротронах и других устройствах вакуумной электроники для определения средних значений компонент скорости электронов в пучке. Новый метод пространственной сепарации электронов в скрещенных продольном электрическом и азимутальном магнитном полях позволит реализовать системы эффективной многоступенчатой рекуперации энергии в гиротронах и других вакуумных электронных приборах с аксиально-симметричным потоком.

Апробация работы

Основные результаты исследования докладывались на 40-й, 41-й, 43-й и 44-й международных конференциях "Infrared, millimeter and terahertz waves IRRMW-THz" (Гонг-Конг, Китай, 2015; Копенгаген, Дания, 2017; Нагоя, Япония, 2018; Париж, Франция, 2019); 44-м, 45-м и 46-м научном форуме с международным участием «Неделя Науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, Россия, 2015, 2016, 2017); на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 2018); на 18-й международной конференции "IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC" (Лондон, Великобритания, 2017); на международной конференции "Emerging trends in applied and computational physics ETACP" (Санкт-Петербург, Россия, 2019); на 29-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Россия, 2019); на международной конференции "Youth conference on electronics, telecommunications and information technologies" (Санкт-Петербург, Россия, 2020).

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликована 21 работа. Из них 6 статей в реферируемых изданиях, входящих в список ВАК, 4 статьи в других изданиях и 11 трудов конференций. Список публикаций приведен в конце работы.

Представление научного доклада: основные положения

Снижение качества ВЭП, вызванное неоднородностью эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки, определяется не только интегральным коэффициентом эмиссионной неоднородности, но и распределением эмиссионного тока по поверхности катода, определяемым локальными неоднородностями работы выхода и температуры.

Метод СВЧ диагностики, основанный на анализе частотной зависимости коэффициента усиления сигнала с частотой в области единиц гигагерц, позволяет определять средние значения компонент скорости электронов и питч-фактора в ВЭП гиротронов.

Метод, основанный на дрейфе электронов в скрещенных аксиальном электрическом и продольном магнитном полях, позволяет осуществлять

эффективную сепарацию электронов с разными энергиями в отработанном ВЭП гиротронов, что может быть использовано для разработки на его основе систем многоступенчатой рекуперации энергии.

Повышение полного КПД гиротронов до 70-80 % может быть достигнуто в результате создания высококачественного ВЭП при оптимизированных распределениях электрического и магнитного полей в области формирования пучка и многоступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов при использовании метода пространственной сепарации электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектами исследований являются винтовой электронный поток в гирорезонансных приборах, экспериментальный гиротрон СПбПУ с частотой 74.2 ГГц и выходной мощностью примерно 100 кВт и прототип гиротрона, спроектированного для использования в проекте DEMO для нагрева высокотемпературной плазмы.

Предметом исследования является процессы формирования и транспортировки ВЭП в гироприборах, взаимодействия ВЭП с электромагнитным полем в резонаторе гиротрона и закономерности рекуперации остаточной энергии электронов.

Экспериментальное оборудование и методики исследований

Экспериментальный гиротрон

Экспериментальные исследования в настоящей работе были выполнены на базе гиротрона, изготовленного в СПбПУ [5, 8, 14, 17, 18]. Схематическое изображение сечения гиротрона показано на рис. 1. Основные параметры

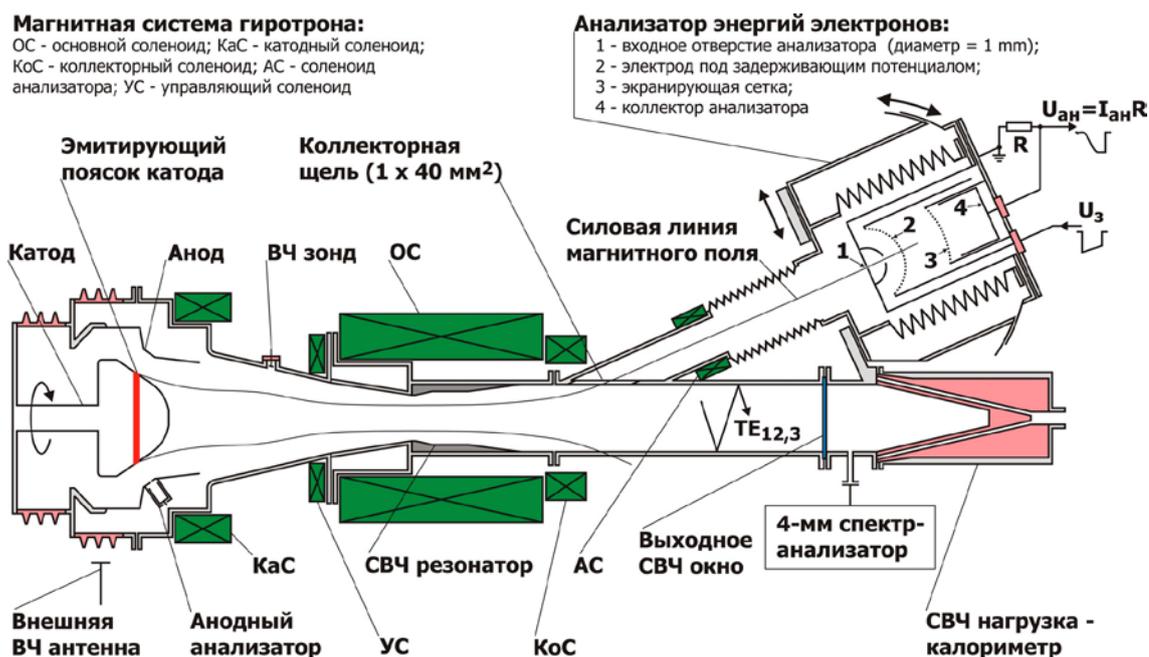


Рис. 1. Схематическое изображение сечения экспериментального гиротрона СПбПУ.

расчетного рабочего режима гиротрона следующие: ускоряющее напряжение $U_0 = 30$ кВ, ток пучка $I_{\text{п}} = 10$ А, индукция магнитного поля в области резонатора $B_0 = 2.75$ Тл, коэффициент магнитной компрессии $B_0 / B_{\text{к}} = 18.02$ ($B_{\text{к}}$ – индукция магнитного поля у катода), средний питч-фактор в области резонатора $\bar{\alpha} = 1.28$. Прибор работал в режиме разовых импульсов длительностью до 100 мкс, что позволяло эксплуатировать магнитную систему, состоящую из нескольких катушек (см. рис. 1), при комнатной температуре.

В рамках данной работы была разработана и изготовлена модернизированная версия коллекторной системы гиротрона для реализации рекуперации остаточной энергии ВЭП, основанная на методе пространственной сепарации электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этом случае коллектор гиротрона и энергоанализатор тормозящего поля заменялся новым коллектором с системой электродов и дополнительными магнитными катушками. Разработка коллектора гиротрона СПбПУ описана далее в результатах работы.

Экспериментальные методы, которые использовались в данной работе при проведении измерений параметров ВЭП, были ранее опробованы в гиротроне СПбПУ (см., например, [5, 8, 14]). Однако при реализации этих методов в модернизированной версии гиротрона были внесены необходимые изменения в диагностические элементы прибора, учитывающие новую конструкцию катодного блока и коллекторной системы. Набор диагностик, которыми оснащен экспериментальный прибор, позволяет определять распределение тока эмиссии с катода, характеристики динамических процессов, происходящих в пространственном заряде ВЭП, а также энергетические спектры электронов в коллекторной области.

Методики регулирования распределений статических полей в области формирования ВЭП

Для улучшения качества ВЭП и повышения электронного КПД гиротрона применялся ряд методик регулирования статических электрического и магнитного полей в области формирования пучка. Одна из методик предполагала оптимизацию

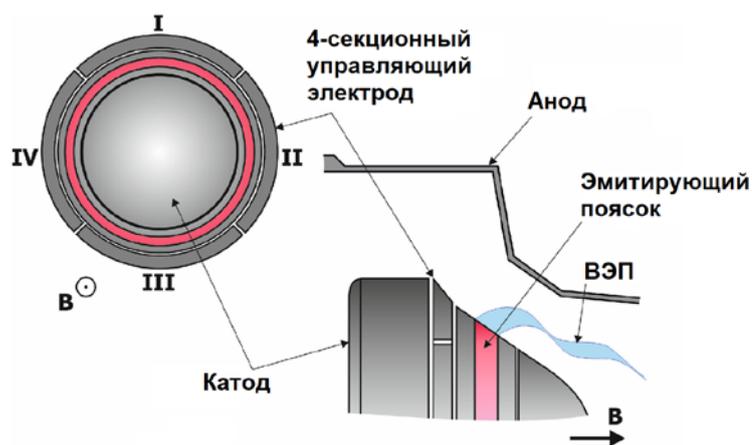


Рис. 2. Модифицированная МИП гиротрона с управляющим электродом.

распределения электрического поля в прикатодной области МИП. Для этого использовался специальный управляющий электрод, входящий в состав катодного узла и изолированный от других его элементов. Изменение потенциала этого электрода позволяет регулировать распределение электрического поля непосредственно в процессе работы гиротрона. В данной работе применялся управляющий электрод, который состоял из четырех секций I–IV, смещенных друг относительно друга по азимуту (рис. 2). Оптимизация распределения электрического поля с помощью этого электрода позволяет повысить средний пич-фактор в пучке, а также уменьшить скоростной разброс электронов, коэффициент отражения от магнитной пробки и амплитуду паразитных низкочастотных колебаний.

В эксперименте также регулировалось распределение магнитного поля в области перемагничивания ВЭП. Ранее в расчетах [5, 10] и экспериментах [8] было установлено, что изменение формы распределения магнитного поля в области перемагничивания пучка может уменьшить инкремент развития и, как следствие, амплитуду паразитных НЧК, что позволит повысить пич-фактор в ВЭП, не возбуждая колебаний. Для реализации данной методики в гиротроне использовалась управляющая катушка, которая располагалась в конце области перемагничивания (УС на рис. 1). Число витков и расположение катушки было выбрано таким образом, чтобы обеспечить распределение магнитного поля,

приближенное к распределению, при котором в расчетах максимально подавлена неустойчивость в захваченном в ловушку пространственном заряде.

Результаты и их обсуждение

Численное моделирование высокоэффективного гиротрона

В работе было проведено численное моделирование процессов формирования и транспортировки ВЭП в гиротроне СПБПУ. Подробно исследованы закономерности влияния неоднородности термоэлектронной эмиссии на качество ВЭП, выявлены особенности взаимодействия ВЭП с ВЧ полем в резонаторе и выполнен поиск наиболее эффективного режима работы гиротрона. Кроме того, был разработан новый метод определения скоростных характеристики электронов в ВЭП и выполнено численное моделирование диагностической секции, предназначенной для реализации этой диагностики в гиротроне СПБПУ.

Описание расчетной модели

Расчеты в данной работе выполнялись при помощи программного пакета 3D моделирования CST Studio Suite [24]. Данный программный пакет позволяет проводить трехмерное численное моделирование как статических, так и динамических систем. При траекторном анализе использовался вычислитель Tracking Solver, а при моделировании процессов в резонаторе – Particle-In-Cell Solver.

Траекторный анализ в ЭОС гиротрона проводился для двух конфигураций МИП: стандартной и модифицированной. Конфигурация модифицированной электронной пушки отличается наличием управляющего катодного электрода, находящегося за эмитирующим пояском и имеющего увеличенный угол наклона конусной образующей $\varphi_k = 50^\circ$ по сравнению с $\varphi_k = 35^\circ$ в стандартной МИП. Путем изменения потенциала на управляющем электроде регулировалось распределение электрического поля в области пушки.

Магнитное поле формировалось с помощью включенных последовательно магнитных катушек, геометрические параметры которых совпадали с параметрами

катушек экспериментального гиротрона (рис. 1). Как и в экспериментах, коэффициент магнитной компрессии B_0 / B_k регулировался путем изменения числа витков катодной катушки.

При расчете траекторий ВЭП в ЭОС гиротрона параметры пучка (средний питч-фактор $\bar{\alpha}$, скоростной разброс δv_{\perp} и др.), обсуждаемые ниже в данном разделе, регистрировались в плоскости поперечного сечения на расстоянии $z = 260.5$ мм от центра эмиттера электронной пушки. Данное аксиальное положение соответствует максимуму распределения продольного магнитного поля $B_z(z)$ и привязано к середине регулярной части резонатора.

В рамках траекторного анализа эмиттер катода состоял из 72 азимутальных секторов, каждый из которых являлся источником 50 электронных траекторий. Суммарный эмиссионный ток с каждого сектора задавался в соответствии с азимутальными зависимостями плотности тока эмиссии $j_e(\theta)$, полученными в экспериментах с разными катодами.

В расчетах, направленных на поиск рабочего режима гиротрона с наибольшим электронным КПД и реализацию в этом режиме многоступенчатой рекуперации, рассматривались две модели термокатода: катод с однородной эмиссией и секционированный катод, в котором эмиссия отсутствовала с двух азимутальных участков "длиной" 70° . При моделировании ЭОС с однородным катодом электронный поток состоял из 3600 частиц (трубок тока), а при моделировании ЭОС с секционированным катодом – из 2200 частиц. Ток пучка для обоих катодов был одинаковым и равнялся 10 А.

При расчетах процессов взаимодействия ВЭП с электромагнитным полем в резонаторе гиротрона СПБПУ использовалась модель резонатора с радиусом 14.45 мм и длиной регулярной части 28 мм, рассчитанная на рабочую моду $TE_{12,3}$. Расчетная область ограничивалась координатами $z = 222.5$ мм и $z = 320$ мм. В выходной плоскости был установлен выходной порт, регистрирующий СВЧ мощность. При выбранном сеточном разбиении количество ячеек сетки в модели

резонатора составляло примерно $6 \cdot 10^6$. Временной шаг интегрирования равнялся $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ нс.

Влияние неоднородности эмиссии на качество электронного потока

При исследовании влияния неоднородности эмиссии с катода на качество ВЭП были использованы азимутальные распределения эмиссионного тока для разных катодов, измеренные ранее в гиротроне СПБПУ [8, 14]. Рассматривались два катода, изготовленных из гексаборида лантана (С1 и С2), и один катод, изготовленный из металлопористого вольфрама бария (С3). Для сравнения был также совершен расчет для катода с интегральным коэффициентом неоднородности $\delta j_e = 0\%$ С0 и для смоделированного «катода» С4, распределение плотности тока эмиссии для которого задавалось с помощью функции $j_e(\theta) \sim \sin(\theta) + 0.3\sin(3\theta)$. Данное распределение характеризуется интегральным коэффициентом эмиссионной неоднородности $\delta j_e = 74\%$, таким же, как для катода С3, но отличающимся от С3 формой зависимости $j_e(\theta)$. Распределения $j_e(\theta)$ для катодов С1–С4 показаны на рис. 3.

Значения основных параметров ВЭП (коэффициент эмиссионной неоднородности δj_e , средний питч-фактор $\bar{\alpha}$, скоростной и энергетический разбросы $\delta v_{\perp}, \delta \varepsilon$, коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$), полученные в рамках траекторного анализа для катодов С0–С4 для двух конфигураций МИП, приведены в табл. 1. При стандартной геометрии МИП (верхняя часть таблицы) наблюдается возрастание скоростного и энергетического разброса по мере увеличения коэффициента эмиссионной неоднородности. При этом следует отметить появление в стандартной конфигурации МИП отраженных частиц у катодов С3 и С4, которые могут оказать негативное влияние на качество ВЭП, приводя к накоплению пространственного заряда в области компрессии пучка и развитию паразитных НЧК [5, 8, 14].

При моделировании МИП с управляющим электродом (нижняя часть табл. 1) электрическое поле вблизи катода было оптимизировано с целью уменьшения

Результаты траекторного анализа в ЭОС для различных катодов.

Стандартная МИП					
Катод	$\delta j_e, \%$	$\bar{\alpha}$	$\delta v_{\perp}, \%$	$\delta \varepsilon, \%$	$K_{отр}, \%$
C0	0	1.277	6.93	0.26	–
C1	23	1.279	7.04	0.50	–
C2	50	1.283	7.52	1.33	–
C3	74	1.288	8.07	2.10	0.26
C4	74	1.283	8.09	2.63	0.1
Оптимизированная МИП (с упр. эл.) ($U_{упр} = -9$ кВ)					
Катод	$\delta j_e, \%$	$\bar{\alpha}$	$\delta v_{\perp}, \%$	$\delta \varepsilon, \%$	$K_{отр}, \%$
C0	0	1.288	3.05	0.28	–
C1	23	1.288	3.29	0.50	–
C2	50	1.290	4.26	1.34	–
C3	74	1.294	5.35	2.10	–

позиционной составляющей скоростного разброса, которая возникает из-за различия в точках вылета электронов с эмиттера и вследствие этого попадания изначально в электрическое и магнитное поля разной величины. Последствием подобной оптимизации электрического поля для катода C0 является более заметное увеличение скоростного разброса для модифицированной МИП с ростом интегрального коэффициента δj_e по сравнению с МИП стандартной конфигурации.

Из табл. 1 видно, что с увеличением коэффициента эмиссионной неоднородности возрастает энергетический разброс электронов, причем это возрастание примерно одинаково для обеих конфигураций пушек. Следовательно, влияние эмиссионных неоднородностей на разброс энергий электронов не зависит от распределения полей в области катода. Этот разброс определяется главным образом «провисанием» потенциала электронного пучка в плоскости поперечного сечения, где определяется величина $\delta \varepsilon$.

На рис. 3 изображены распределения центров электронных орбит частиц в плоскости, соответствующей центру резонатора и указаны значения толщины стенки пучка ΔR_{\perp} для различных катодов. Приведенные зависимости показывают,

что наиболее значительное смещение радиальных координат электронных траекторий происходит на участках с наибольшим градиентом распределения $j_e(\theta)$, что связано с возникающим радиальным дрейфом частиц под действием азимутального электрического поля пространственного заряда частиц и удерживающего продольного магнитного поля. Таким образом, существующая в потоке неоднородность плотности тока, связанная с неоднородной эмиссией, увеличивается по мере движения электронов, при этом рост неоднородности определяется пространственным масштабом начальной неоднородности эмиссии. Сравнение распределений $R_n(\theta)$ и параметров ВЭП для катодов С3 и С4 позволяет сделать вывод, что влияние неоднородности на качество электронного потока не ограничивается величиной интегрального коэффициента δj_e . Значительное влияние на качество ВЭП оказывает форма распределения плотности эмиссионного тока. Отсутствие влияния формы распределения $j_e(\theta)$ на скоростной разброс объясняется тем, что он по большей части определяется неоднородной

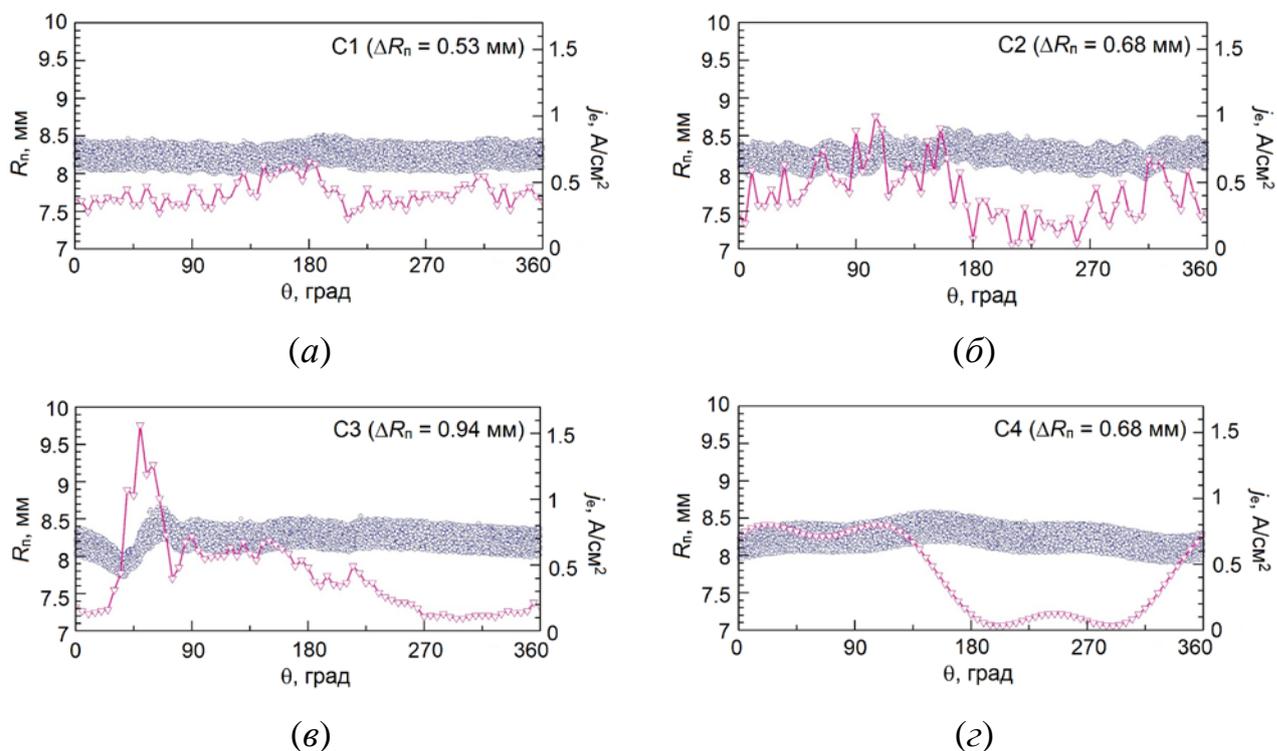


Рис. 3. Распределения по азимуту радиальных координат ведущих центров электронных траекторий $R_n(\theta)$ (синие точки), значения толщины стенки ВЭП ΔR_n и распределения плотности тока эмиссии $j_e(\theta)$ (красные линии) для катодов С1 (а), С2 (б), С3 (в), С4 (г).

экранировкой внешнего электрического поля вблизи катода собственным пространственным зарядом ВЭП.

ВЭП с улучшенными характеристиками в ЭОС гиротрона

В данных расчетах использовалась ЭОС, в состав которой входила МИП с управляющим электродом. Расчеты производились для катода с однородной эмиссией и для секционированного катода. Данные для секционированного катода будут затем использоваться при траекторном анализе в коллекторной системе с рекуперацией.

На начальном этапе проводилась оптимизация величины магнитного поля в прикатодной области с целью определения оптимального среднего радиуса пучка в резонаторе гиротрона. Расчеты взаимодействия ВЭП с ВЧ полем в резонаторе, описанные ниже, показали, что наибольшая выходная мощность гиротрона достигается при среднем радиусе пучка 8.5 мм, что соответствует коэффициенту магнитной компрессии $B_0 / B_k = 17.01$.

При выбранном коэффициенте магнитной компрессии величины скоростного разброса электронов и среднего питч-фактора изменялись при регулировании напряжения на управляющем электроде и на аноде. Результатом оптимизации стали значения напряжения на аноде $U_a = 8.4$ кВ и на управляющем электроде $U_{упр} = -44.5$ кВ относительно заземленного корпуса прибора (напряжение на катоде равнялось $U_0 = -30$ кВ). В данном режиме ВЭП имел следующие параметры: $\bar{\alpha} = 1.57$, $\delta v_{\perp} = 2.8$ % для однородного катода и $\bar{\alpha} = 1.52$ и $\delta v_{\perp} = 3.4$ % для секционированного катода. Важно отметить, что в ВЭП с высоким питч-фактором и разбросом скоростей часть электронов неизбежно отражается от магнитной пробки, что приводит к развитию паразитных НЧК. В работе [8] был определен пороговый коэффициент отражения от магнитной пробки, равный $R_{пор} = 1.7 \cdot 10^{-3}$, превышение которого приведет к возникновению этих колебаний. При гауссовом распределении электронов по скоростям для питч-фактора $\bar{\alpha} = 1.57$ данное значение $R_{пор}$ достигается при $\delta v_{\perp} = 6.3$ %, а для $\bar{\alpha} = 1.52$.

Рассчитанные значения скоростного разброса для обоих катодов меньше приведенных предельных значений. Однако следует отметить, что в этих расчетах учитывались не все факторы, оказывающие влияние на результирующее значение разброса электронов по скоростям. В частности, не были учтены шероховатость поверхности эмиттера, неидеальности изготовления и юстировки элементов ЭОС, возможности развития динамических процессов в пространственном заряде ВЭП. Но в то же время максимальный КПД гиротрона, равный примерно 46 %, был получен в эксперименте при расчетном питч факторе $\bar{\alpha} \sim 1.6$ и величине скоростного разброса, при котором не возникали НЧК (см. ниже в результатах эксперимента). Это дает основание утверждать, что режимы работы прибора, при которых формируется ВЭП с питч-фактором $\bar{\alpha} = 1.5 - 1.6$, исследуемые в настоящей работе, могут быть реализованы в отсутствии отражений, либо развитие НЧК вследствие этих отражений может быть в некоторой степени подавлено.

Полученные при траекторном анализе в ЭОС гиротрона данные о скоростных и позиционных параметрах ВЭП в виде специального интерфейса экспортировались и использовались на следующем этапе при моделировании взаимодействия электронов с ВЧ полем в модели резонатора.

Взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем в резонаторе гиротрона

На начальном этапе в модели резонатора был проведен расчет собственных мод. По результатам этого расчета были определены резонансные частоты и добротности различных мод, а также соответствующие этим модам распределения электрической и магнитной составляющих высокочастотного поля.

Расчеты производились на основе данных о ВЭП, эмитирующем в рабочем режиме с оптимальным коэффициентом магнитной компрессии $B_0 / B_k = 17.01$, обеспечивающим средним радиусе пучка 8.5 мм в центре резонатора гиротрона, что соответствует радиальному максимуму рабочей моды $TE_{12,3}$. Максимальная мощность генерации соответствовала значению индукции магнитного поля в резонаторе $B_0 = 2.747$ Тл. На рис. 4 показано изменение во времени амплитуд

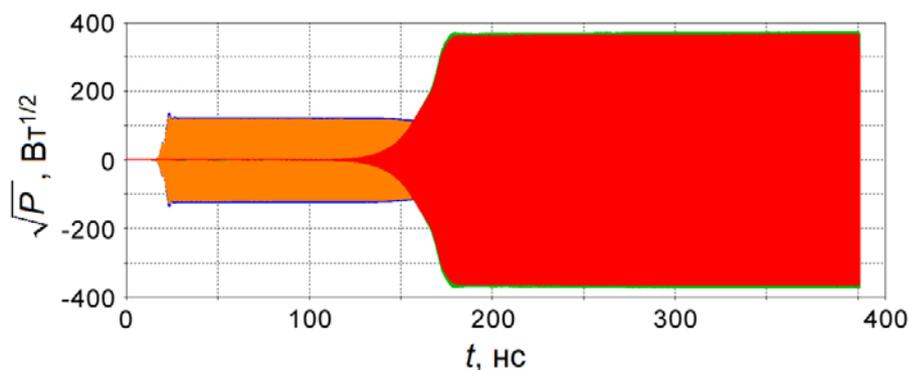


Рис. 4. Изменение во времени амплитуды мод $TE_{11,3}$ (оранжевый и синий) и $TE_{12,3}$ (красный и зеленый) в конце модели резонатора гиротрона с однородным катодом.

сигналов ведущих мод на выходе из резонатора для однородного катода. Порядковые номера данных мод определены по структуре высокочастотного электромагнитного поля. На участке $20 \text{ нс} < t < 150 \text{ нс}$ генерируется паразитная мода $TE_{11,3}$ на частоте примерно 71.4 ГГц. Во временной период $180 < t < 400 \text{ нс}$ мода $TE_{11,3}$ подавляется рабочей модой $TE_{12,3}$ и наблюдается стабильная генерация излучения на частоте около 74.5 ГГц. Возбуждаемые в резонаторе моды имеют круговую поляризацию и разделены на две поляризационные составляющие с близкой амплитудой (выделены разным цветом на рис. 4). Определенная для $t = 400 \text{ нс}$ суммарная генерируемая СВЧ мощность составила $P_{\text{СВЧ}} = 141 \text{ кВт}$, а электронный КПД $\eta_{\text{эл}} = 47 \%$. В случае аналогичной симуляции для секционированного катода наблюдалась похожая картина, различающаяся только незначительным снижением генерируемой мощности, которая для момента $t = 400 \text{ нс}$ составляла около 138 кВт.

Расчетные данные о параметрах отработанного ВЭП на выходе из резонатора фиксировались и затем использовались в расчетах коллектора гиротрона СПБПУ, оснащенного системой многоступенчатой рекуперации энергии.

СВЧ диагностика скоростных характеристик ВЭП

Обеспечение эффективной и стабильной работы гиротронов, как и других вакуумных приборов СВЧ, возможно на основе достаточного объема знаний о характеристиках электронного потока. Расчет этих характеристик, даже с использованием современных систем численного моделирования, не всегда

позволяет учесть все факторы, которые определяют качество электронного пучка. Необходимые сведения о параметрах ВЭП могут быть получены экспериментально с помощью высокоинформативного метода диагностики. В данном разделе предлагается и исследуется новый метод диагностики, предназначенный для определения скоростных характеристик ВЭП на участке формирования потока перед резонатором гиротрона.

Диагностика основана на усилении электромагнитной сигнала, распространяющегося вдоль электродинамической системы с фазовой скоростью, близкой к продольной скорости электронов в ВЭП. Для обеспечения синхронизма электронов с волной используется замедляющая система (ЗС) с дисперсией. Анализ частотной зависимости коэффициента усиления входного сигнала малой амплитуды позволяет определить средние значения компонент скорости электронов в потоке.

СВЧ устройство, предназначенное для реализации данной диагностики, должно состоять из ЗС, а также согласующих элементов, обеспечивающих прохождение сигнала со входа ЗС на ее выход без заметных потерь. В канале дрейфа ВЭП гиротрона СПБПУ перед входом в резонатор имеется участок (см. рис. 1), в котором, при правильном выборе геометрии, может быть реализована диагностическая секция. Размеры этой полости задают следующие ограничения на размеры диагностической секции: длина секции $L_{сек}$ не должна превышать 57 мм, а ее максимальный радиус $R_{сек} - 30$ мм. Расстояние от пучка до проводящих элементов ЗС Δd выбиралось из диапазона 1 – 1.5 мм для того, чтобы добиться необходимой связи пучка с электромагнитным полем, а также обеспечить прохождение электронов вдоль ЗС без осаждения на ее элементы. В результате была выбрана ЗС в виде отрезка диафрагмированного волновода [25], удовлетворяющая требованиям метода диагностики.

На начальном этапе проектирования проводились расчеты для упрощенной системы с прямолинейным потоком и постоянным магнитного полем. В результате была сконструирована замедляющая система с размерами, при которых обеспечивается синхронизм электронов с волной на частоте входного сигнала

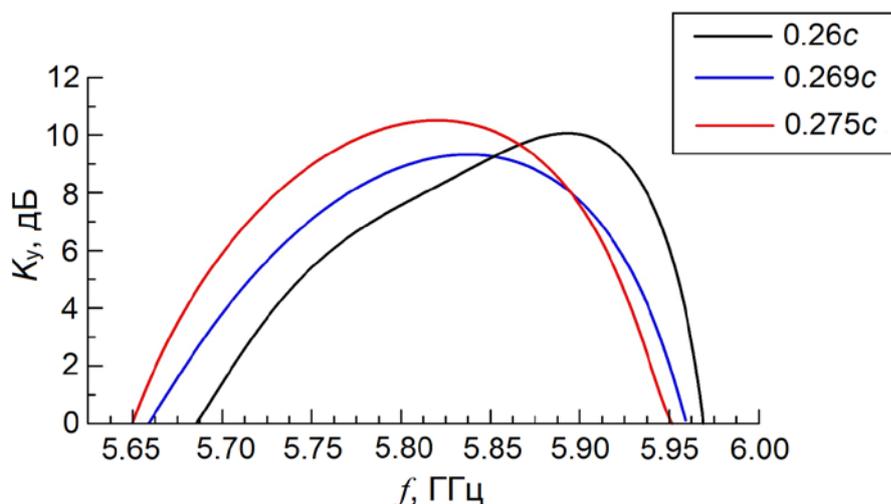


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента усиления K_y для разных значений начальной продольной скорости электронов в пучке $v_{||}$.

примерно 6 ГГц. На длине ЗС укладывается достаточное число периодов для того, чтобы обеспечить заметное усиление входного сигнала.

На базе данных аналитических расчетов была разработана электродинамическая система конусной формы с согласующими элементами, приспособленная для использования в гиротроне СПБПУ. Было проведено численное моделирование взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем в ЗС, используя пакет CST Studio Suite. Путем тщательного подбора геометрических параметров согласующих элементов ЗС удалось добиться коэффициента отражения входного сигнала ниже уровня -20 дБ, а коэффициента прохождения ВЧ-сигнала через диагностической секцию, равного примерно -10 дБ, в полосе частот 5.7 – 6.0 ГГц.

На завершающем этапе проведен расчет взаимодействия поля с электронным потоком в ЗС. Были получены частотные зависимости коэффициента усиления K_y , полученные при различных значениях средней продольной скорости электронов на входе в электродинамическую систему, представленные на рис. 5. Видно, что частотные зависимости смещаются в область нижних частот с увеличением продольной скорости. Таким образом, данная диагностика позволяет определять средние значения продольной скорости электронов. В предположении отсутствия в ВЭП паразитных высокочастотных неустойчивостей данный метод также

позволит определить средние значения компоненты поперечной скорости и питч-фактора, предполагая моноэнергетичность электронов в пучке.

Разработка коллекторов с многоступенчатой рекуперацией энергии для гиротронов

Новый метод пространственной сепарации электронных фракций с разной энергией в отработанном ВЭП гиротрона, исследованный в данной работе, основывается на введении в коллекторную область, помимо удерживающего продольного магнитного поля B_z и тормозящего продольного электрического поля E_z , также и азимутального магнитного поля B_θ . Скорость радиального дрейфа электронов определяется отношением амплитуд полей E_z / B_θ . Следовательно, смещение электрона по радиусу определяется исключительно временем пролета им области скрещенных $E_z \times B_\theta$ полей, которое зависит от его энергии при влете в эту область. Это дает возможность разделить в пространстве энергетические фракции электронов, чтобы впоследствии обеспечить их осаждение на секции под различным потенциалом, осуществляя многоступенчатую рекуперацию энергии отработанного ВЭП.

Разработка коллекторной системы для экспериментального гиротрона СПбПУ

В работе было выполнено проектирование коллекторной системы с 4-ступенчатой системой рекуперации для экспериментального гиротрона СПбПУ. Модель данной системы, созданной в программе CST Studio, показана на рис. 6. Основными ее элементами являются: коллекторные секции-электроды конусной формы I–IV, предназначенные для создания электрического поля и для осаждения на них электронов, корректирующие соленоиды, дополняющие удерживающее магнитное поле основного соленоида гиротрона для создания квазиоднородного распределения магнитной индукции в области скрещенных полей, и тороидальный соленоид, создающий азимутальное магнитное поле. Проводники, соединяющие внутреннюю и наружную обмотки тороидального соленоида со стороны,

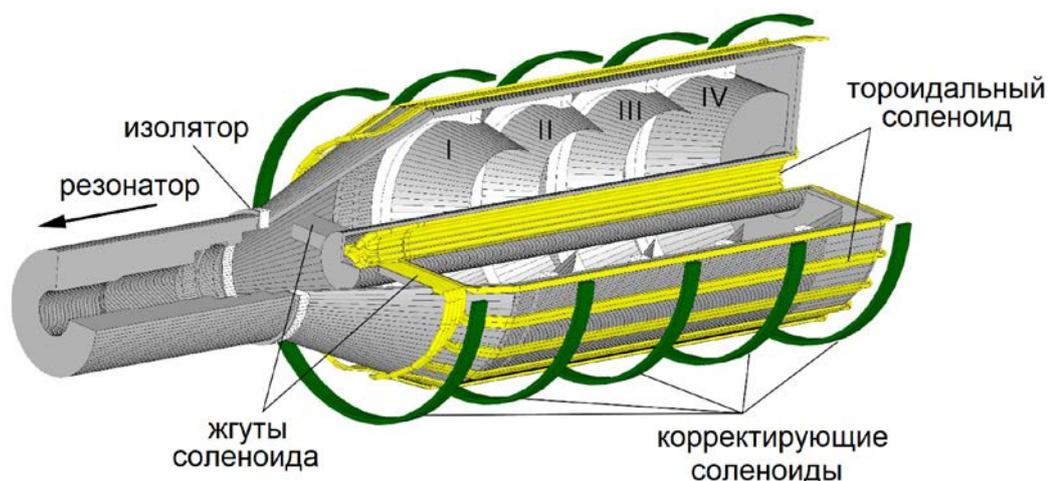


Рис. 6. Трехмерное изображение модели коллектора гиротрона СПБПУ, I–IV – коллекторные секции.

обращенной к резонатору, собраны в два "жгута" (рис. 6) для того, чтобы обеспечить прохождение электронного потока в область рекуперации, где расположены секции коллектора. При этом локальное магнитное поле этих жгутов искажает близлежащие траектории электронов, что приводит к снижению эффективности рекуперации и увеличению потока частиц, отраженных от коллектора в сторону резонатора.

Был выполнен анализ распределений электрического и магнитного полей в рекуператоре для оптимизации геометрии его элементов. Размеры секций и их потенциалы были выбраны на основе аналитического расчета дрейфовых расстояний для электронов с разной энергией при заданных амплитудах полей E_z и B_0 , которые, в свою очередь, были определены на основе результатов аналитических расчетов.

Распределения компонент продольного B_z и азимутального B_θ магнитного поля вдоль координаты z , определенных на типичных траекториях электронов, распространяющихся в системе на различных азимутах относительно жгута в отсутствие поля тороидального соленоида, представлены на рис. 7. Зависимости демонстрируют, что суммарное продольное магнитное поле, создаваемое соленоидами основной магнитной системы гиротрона, корректирующими катушками и тороидальным соленоидом, имеет характерное возмущение в окрестности жгута, расположенного в плоскости $\theta = 0$. Продольное магнитное

поле жгутов либо складывается с полем основного соленоида, либо вычитается из него в зависимости от того, с какой стороны азимутальных углов – положительной ($+\theta$) или отрицательной ($-\theta$) – регистрируется это поле. При вычитании поля жгута возможна смена направления суммарного магнитного поля, что может приводить к отражению электронов, двигающихся в этой области, обратно в сторону резонатора. При коэффициенте отражения от коллектора, превышающем единицы процентов, поток отраженных частиц может приводить к заметному снижению выходной СВЧ мощности и электронного КПД гиротрона (например, [26]). Показанное на рис. 7 распределение азимутального поля $B_\theta(z)$ было определено в азимутальной плоскости, равноудаленной от жгутов.

Для снижения негативного влияния локального поля жгутов при проведении траекторного анализа в коллекторе с тороидальным соленоидом использовался электронный поток, сформированный с помощью секционированного катода, описанного выше. Азимутальное положение участков катода, в которых отсутствовала эмиссия, соответствовало азимутальному положению жгутов тороидального соленоида. При проведении траекторного анализа была выполнена завершающая оптимизация геометрии секций в коллекторной системе. Целью оптимизации являлось достижение минимального значения рассеиваемой

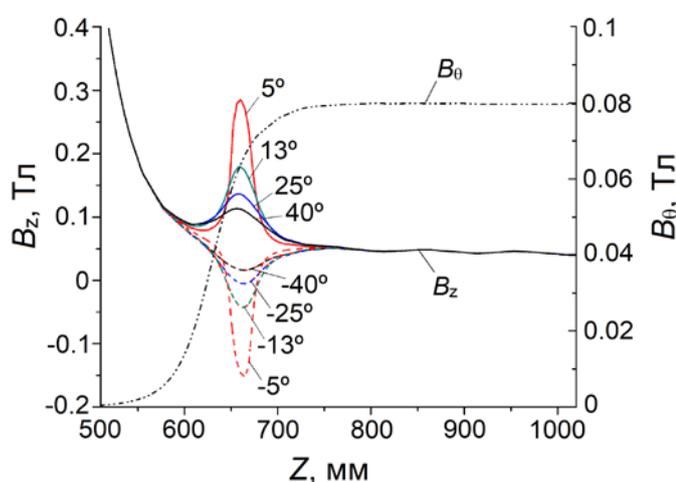


Рис. 7. Распределения компонент магнитного поля $B_z(z)$ и $B_\theta(z)$ в коллекторной области гиротрона. Распределение $B_z(z)$ показано для различного удаления от жгута в азимутальном направлении в сторону положительных $+\theta$ (сплошные линии) и отрицательных $-\theta$ (пунктирные линии) углов.

Результаты траекторного анализа в коллекторе с четырехступенчатой системой рекуперации для гиротрона СПБПУ

Номер секции	Потенциал секции φ_N , кВ	Рассеиваемая мощность P_N , кВт
I	-7.72	36.15
II	-10.72	4.79
III	-14.72	5.24
IV	-24.72	7.58
		Суммарная мощность: $P_{\text{расс}} = \sum_{i=1}^{\text{IV}} P_i = 54.19 \text{ кВт}$

мощности на секциях рекуператора при малой доле отраженных от коллектора электронов, не превышающей 1–2 %.

В табл. 2. приведены значения потенциалов секций φ_N , определенных на этапе оптимизации при использовании данных энергетического распределения электронов в отработанном ВЭП, и значения мощности P_N , рассеиваемой на секциях коллектора, при указанных значениях потенциалов. Необходимость уменьшения потенциала первой секции $|\varphi_I|$ и уменьшения внутреннего радиуса первой секции коллектора для обеспечения малого отражения от коллектора обуславливает повышенное значение осаждаемой на первой секции мощности. В данном режиме коэффициент отражения равнялся 1.37 %. При этом полный КПД гиротрона $\eta_{\text{п}}$ равнялся 71.8 % при выходной СВЧ мощности 138 кВт, а КПД коллектора, характеризующий долю возвращенной в электрическую сеть мощности, равнялся $\eta_{\text{колл}} = 66.5 \%$.

Разработка коллекторной системы для прототипа гиротрона DEMO

В целях определения актуальности разработанного метода сепарации для создания систем многоступенчатой рекуперации мощных гиротронов было выполнено проектирование коллектора с рекуперацией для прототипа гиротрона,

предназначенного для использования в термоядерном реакторе DEMO [27, 28]. Прототип гиротрона имеет следующие характеристики: частота генерации $f_0 = 250$ ГГц, ускоряющее напряжение $U_0 = 55$ кВ, ток пучка $I_{\text{п}} = 10$ А, магнитное поле в центре резонатора $B_0 = 9.57$ Тл. В расчетах использовался типичный энергетический спектр электронов в отработанном ВЭП, соответствующий рабочему режиму мощного гиротрона с электронным КПД $\eta_{\text{эл}} = 36\%$ [28]. Источник частиц состоял из $71 \cdot 10^3$ частиц, различающихся радиальной координатой, энергией, питч-фактором и фазой циклотронного вращения при влете в рабочее пространство. Внутренний радиус цилиндрической части коллектора задавался равным 160 мм, совпадающим с радиусом коллектора данного гиротрона без рекуперации.

Основные принципы проектирования коллектора были подобны изложенным выше для гиротрона СПБПУ. На первом этапе проводился траекторный анализ в коллекторной системе с идеализированным распределением азимутального магнитного поля, которое создавалось проводником, расположенным на оси системы. Выбором параметров этого проводника обеспечивалась адиабатичность нарастания азимутального магнитного поля при влете в область рекуперации.

На рис. 8 показаны точки пересечения электронных траекторий с плоскостью YZ ($x = 0$) при оптимальных потенциалах секций I–IV: $U_{\text{I}} = -23.6$ кВ, $U_{\text{II}} = -29.1$ кВ, $U_{\text{III}} = -32.4$ кВ, $U_{\text{IV}} = -37.8$ кВ. Корпус коллектора при этом находился под нулевым потенциалом. Продольное B_z и азимутальное B_0 магнитные поля были квазиоднородными вдоль координаты z в области рекуперации. Амплитуды этих полей составляли: $B_z = 0.016$ Тл, $B_0 = 0.08$ Тл и 0.13 Тл – траекторный анализ производился для двух режимов с разной величиной B_0 . В режиме с $B_0 = 0.08$ Тл было достигнуто наибольшее значение полного КПД гиротрона, равное 84 %, с учетом отраженных от коллектора электронов, ток которых составил 0.012 % от полного тока $I_{\text{п}}$. Столь высокий КПД, близкий к максимально возможному при идеальной сепарации электронов в

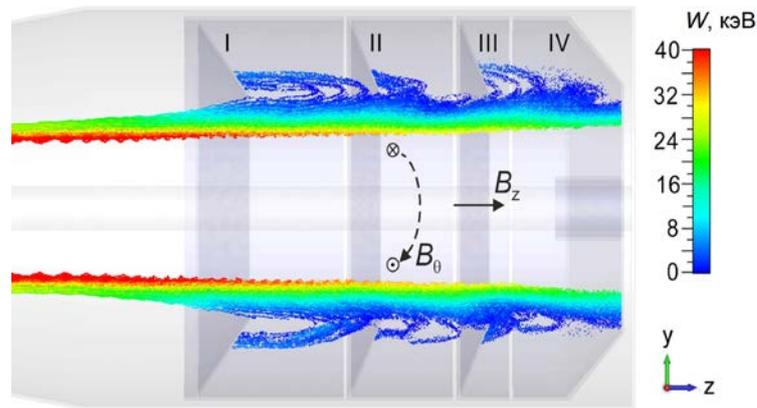


Рис. 8. Положение частиц в плоскости YZ при идеализированном магнитном поле (цвет соответствует энергии частиц W). Показано направление аксиальной и азимутальной компонент магнитного поля.

четырёхступенчатой схеме рекуперации, подтверждает эффективность предложенного способа пространственного разделения электронных фракций в скрещенных $E_z \times B_0$ полях.

Полученные для идеализированного магнитного поля данные были использованы для проектирования тороидального соленоида. Выбор параметров этого соленоида основывался на анализе траекторий единичных электронов, различающихся друг от друга азимутальным положением точки эмиссии. Такой анализ показал возрастание негативного влияния магнитного поля жгутов по сравнению с гиротроном СПбПУ, что связано с уменьшением удерживающего продольного магнитного поля, созданного основным соленоидом гиротрона и корректирующими катушками. При малом удерживающем магнитном поле велик радиальный разброс траекторий в области рекуперации для частиц, эмитируемых из точек с различным азимутальным положением.

Данный негативный эффект был заметно снижен в результате смены направления азимутального магнитного поля, создаваемого тороидальным соленоидом. В этом случае следует учитывать комбинированное действие радиальной силы Лоренца, действующей на влетающий в область азимутального магнитного поля электрон, и силы, приводящей к искривлению силовой линии магнитного поля вследствие изменения плотности магнитного потока вблизи жгутов [29]. При измененном направлении азимутального магнитного поля действие одной из этих сил частично компенсируется действием другой. Как

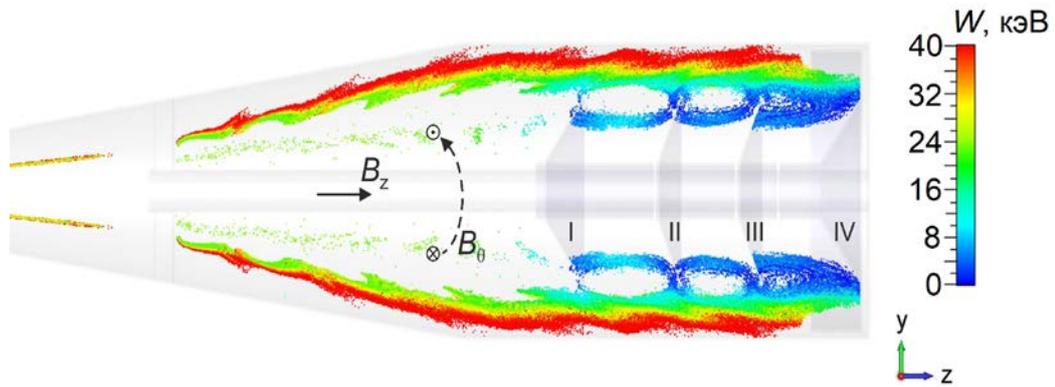


Рис. 9. Положение частиц в плоскости YZ в модели с тороидальным соленоидом (цвет соответствует энергии частиц W). Показано направление аксиальной и азимутальной компонент магнитного поля.

следствие, при оптимальных параметрах тороидального соленоида, в частности расстояния от жгутов до области рекуперации, радиальное положение электронной траектории в этой области незначительно изменяется при изменении азимутального положения точки эмиссии.

"Следы" электронных траекторий в плоскости YZ в модели коллектора с тороидальным соленоидом показаны на рис. 9. Значения потенциалов секций $U_I - U_{IV}$ и магнитной индукции B_z были аналогичны используемым в расчете системы с идеализированным магнитным полем. Значение индукции азимутального магнитного поля B_θ равнялось -0.08 Тл. Расчеты были проведены для секционированного ВЭП, в котором отсутствовали электроны в пределах двух азимутальных секторов по 70° каждый. Мощность, рассеиваемая на электродах коллектора, в этом режиме равнялась 39.5 кВт, что при электронном КПД $\eta_{эл} = 36\%$ и выходной мощности $P_{вч} = 198$ кВт, соответствует полному КПД $\eta_{п} = 82.6\%$. Доля отраженных электронов при этом составляла 0.4% от полного тока пучка.

Следует отметить, что при расчете коллектора гиротрона DEMO входные параметры электронных траекторий (питч-фактор, энергия, радиальная координата и фаза вращения) задавались вручную в соответствии с имеющимися данными о распределениях частиц по этим величинам в ВЭП гиротрона. При задании входного пучка, в большей степени приближенного к реальному пучку в гиротроне,

следует ожидать снижения полного КПД. Однако это снижение, по-видимому, не должно быть велико, если принять во внимание данные расчетов в гиротроне СПБПУ, где были использованы распределения электронов в отработанном ВЭП, полученные как выходной интерфейс при моделировании процессов в резонаторе.

При проектировании коллектора для гиротрона ДЕМО, работающего в квазинепрерывном режиме, актуальным также является расчет тепловой нагрузки на коллекторные секции. Такой расчет был проведен как для системы с идеализированным магнитным полем, так и для системы с тороидальным соленоидом. Значение средней плотности мощности, рассеиваемой на коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией, составляло примерно 200 Вт/см^2 , что заметно меньше, чем в коллекторе без рекуперации, где это значение равнялось примерно 800 Вт/см^2 .

Экспериментальное исследование высокоэффективного гиротрона

Проведенное численное моделирование показало возможность реализации режимов работы гиротрона СПБПУ с электронным КПД, превышающим 40 %, при условии, что в этих режимах средний питч-фактор электронов в ВЭП повышен до значений 1.5-1.6. Однако при высоком питч-факторе возможно возбуждение низкочастотных колебаний захваченного в ловушку между катодом и магнитным зеркалом пространственного заряда. При возбуждении этих колебаний снижается качество ВЭП, что не позволяет достичь высоких значений электронного КПД. Для предотвращения возникновения НЧК необходимо сформировать высококачественный ВЭП с малым скоростным разбросом и снизить инкремент нарастания неустойчивости, связанной с возникновением колебаний в пространственном заряде в ловушке. В настоящей работе данные задачи решаются путем регулирования распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП.

Подавление паразитных низкочастотных колебаний в результате оптимизации распределения электрического поля в области МИП

Оптимизация электрического поля в области пушки осуществлялась при изменении напряжения на управляющем катодном электроде. Этот электрод состоял из четырех секций, изолированных друг от друга и от остальных элементов катодного узла (см. рис. 2). Потенциал каждой из секций мог изменяться в диапазоне от -5 кВ до $+5$ кВ относительно катода. При разных комбинациях напряжения на секциях проводился поиск такого рабочего режима гиротрона, при котором НЧК, в случае их появления, имеют наименьшую амплитуду. Развитие в электронном потоке НЧК регистрировалось с помощью специального зонда-антенны (ВЧ-зонд на рис. 1), настроенного на сигналы в диапазоне частот $0-350$ МГц.

В результате проведенного экспериментального исследования было установлено, что оптимальным является положение секций управляющего электрода, при котором секция I располагалась напротив участка катода с уменьшенной плотностью тока эмиссии и напряжение на этой секции было отличным от напряжения на других секциях. Пониженная эмиссия с этого участка была обусловлена неоднородностью нагрева термопоояска катода из-за разрыва в спирали подогревателя. Наиболее оптимальный режим характеризовался следующими напряжениями на секции управляющего электрода: $\phi_I = +1$ кВ, $\phi_{II}-\phi_{IV} = +4$ кВ. В данном режиме амплитуда НЧК была такой же, как в отсутствие напряжения на управляющем электроде, однако средний расчетный питч-фактор был повышен с 1.4 до 1.5. Наблюдаемое улучшение качества ВЭП является, по-видимому, следствием корреляции азимутального распределения плотности тока эмиссии и азимутального распределения напряженности электрического поля в области МИП. При оптимальных напряжениях на секциях управляющего электрода уменьшен вклад фактора скоростного разброса, связанного с неоднородностью эмиссии. Это позволяет повысить рабочий питч-фактор в ВЭП, не приводя к возникновению паразитных НЧК. Кроме того, снижение амплитуды НЧК может быть связано также с введением дополнительного канала ухода частиц из ловушки в режиме, когда потенциал одной из секций управляющего электрода отличается от потенциала других секций.

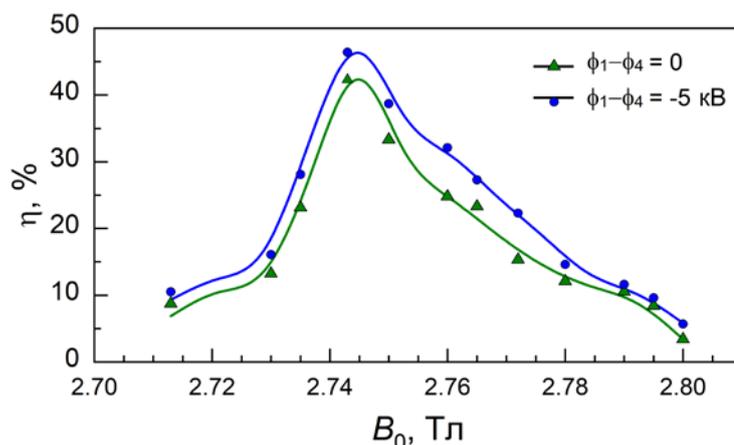


Рис. 10. Зависимость электронного КПД от индукции магнитного поля в резонаторе гиротрона в режимах с разным значением напряжения на секциях управляющего электрода $\phi_1 - \phi_{IV}$.

Повышение электронного КПД гиротрона с помощью регулирования распределения электрического в области МИП

Описанные выше эксперименты показали необходимость подавления паразитного влияния фактора, связанного с неоднородностью эмиссии с катода, на качество ВЭП. Поэтому следующие эксперименты были проведены с катодным узлом, в котором была повышена однородность нагрева эмитирующего пояса. Кроме этого, был использован достаточно однородный гексаборид-лантановый термокатод с коэффициентом δj_e менее 20 %, при котором влияние эмиссионной неоднородности на качество ВЭП незначительно [5, 8].

Определялось влияние напряжения на управляющем электроде при соединенных секциях на значение электронного КПД гиротрона в зоне возбуждения рабочей моды $TE_{12,3}$. На рис 10 показаны зависимости КПД от индукции магнитного поля в центре резонатора гиротрона при генерации моды $TE_{12,3}$, измеренные для значений напряжения на управляющем электроде $\phi_1 - \phi_{IV} = 0$ кВ и $\phi_1 - \phi_{IV} = -5$ кВ. Во время экспериментов поддерживался рабочий режим с постоянными значениями $U_0 = 30$ кВ, $I_{II} = 10$ А и $B_0 / B_k = 19$. Режим с напряжениями на секциях $\phi_1 - \phi_{IV} = -5$ кВ характеризовался уменьшенной амплитудой НЧК, что связано со снижением скоростного разброса электронов в ВЭП. Повышение коэффициента магнитной компрессии B_0 / B_k приводило к тому,

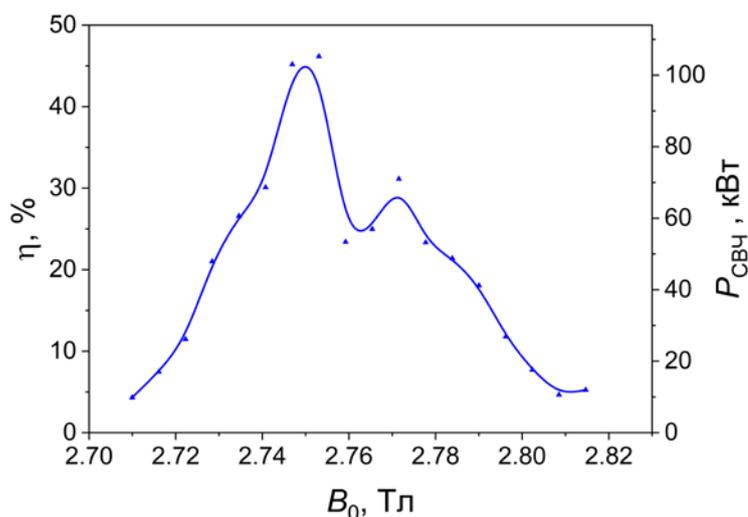


Рис. 11. Зависимости электронного КПД $\eta_{\text{эл}}$ и генерируемой СВЧ мощности $P_{\text{СВЧ}}$ от индукции магнитного поля B_0 в резонаторе гиротрона с новой коллекторной системой с рекуперацией при ускоряющем напряжении $U_0 = 30$ кВ и токе пучка $I_{\text{п}} = 7.6$ А.

что в центре рабочей моды при $B_0 = 2.75$ Тл расчетный питч-фактор равняется примерно ~ 1.6 . При этом паразитные НЧК во всей зоне возбуждения моды $TE_{12,3}$ не были зафиксированы. Максимальное значение электронного КПД составляло примерно 46 % (см. рис. 10).

Исследование работы гиротрона с системой рекуперации

На заключительном этапе экспериментальных исследований было выполнено измерение КПД гиротрона, оснащенного системой рекуперации, в режимах с улучшенным качеством ВЭП, достигнутым в результате оптимизации распределений электрического и магнитного полей. Управляющий электрод с увеличенным до 50° углом наклона конусной образующей в этих экспериментах был односекционным и находился под потенциалом катода. Это позволяло проводить измерения азимутальных распределений плотности эмиссионного тока без разгерметизации прибора. Дополнительное снижение амплитуды НЧК было обеспечено в результате выбора оптимальной величины тока через управляющий соленоид, расположенный в конце области компрессии ВЭП (см. рис. 1). В этом случае реализовывалось распределение магнитного поля, при котором изменялись параметры потенциальной ямы перед резонатором и тем самым снижался инкремент развития НЧК и паразитных неустойчивостей в этой области.

Зависимости электронного КПД гиротрона и выходной СВЧ мощности от индукции магнитного поля в резонаторе показана на рис. 11. В результате принятых мер по снижению скоростного разброса в ВЭП и подавлению паразитных НЧК был реализован режим работы с электронным КПД ~ 46 %, подобным полученному в гиротроне без рекуперации. В данном режиме гиротрона был измерен полный КПД прибора, при одноступенчатой рекуперации остаточной энергии ВЭП. Тормозящее напряжение на коллекторе создавалось при протекании тока через резистор, который был установлен в цепи между коллектором и землей. В режиме с электронным КПД 40 %, при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 10 А, был получен максимальный полный КПД, равный примерно 60 %.

Заключение

Подводя итоги проведенного исследования, следует выделить основные полученные результаты.

Установлено, что снижение качества ВЭП, вызванное неоднородностью эмиссии с катода магнетронно-инжекторной пушки, определяется не только интегральным коэффициентом эмиссионной неоднородности, но и распределением эмиссионного тока по поверхности катода, определяемым локальными неоднородностями работы выхода и температуры.

Разработан новый метод СВЧ диагностики, основанный на анализе частотной зависимости коэффициента усиления сигнала с частотой в области единиц гигагерц, который позволяет определять средние значения компонент скорости электронов и питч-фактора в ВЭП гиротронов. Спроектирована диагностическая секция для реализации этой диагностики в гиротроне СПбПУ.

Разработан метод сепарации электронов в скрещенных аксиальном электрическом и продольном магнитном полях, который позволяет осуществлять эффективную сепарацию электронов с разными энергиями в отработанном ВЭП гиротронов. Данный метод может быть использован для разработки на его основе систем многоступенчатой рекуперации энергии в гиротронах.

В результате проведенного в работе численного моделирования показана возможность увеличения полного КПД гиротронов до 70-80 % в результате

повышения качества ВЭП при оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП и многоступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов при использовании метода пространственной сепарации электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Разработаны и реализованы в эксперименте методы снижения скоростного разброса и подавления паразитных колебаний пространственного заряда при регулировании распределений электрического и магнитного полей в области формирования ВЭП, которые позволили повысить КПД гиротрона СПбПУ до 46 % в режиме без рекуперации и до 60 % при одноступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Лукша, О.И. Стабилизация магнитного поля теплой катушки импульсного соленоида гиротрона при неуправляемом разряде батареи емкостного накопителя / С.А.Фефелов, О.И.Лукша, Д.Б.Самсонов, П.А.Трофимов // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 5. – С. 124–127
2. Лукша, О.И. Метод сепарации электронов для систем многоступенчатой сепарации в гиротронах / О.И.Лукша, П.А.Трофимов // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 18. – С. 38–45.
3. Колмакова, Н.Г. Разработка методики определения скоростей электронов в гиротроне / Н.Г.Колмакова, О.И.Лукша, Г.Г.Соминский, П.А.Трофимов // ЖТФ. – 2016. – Т. 86, № 12, С. 145–151.
4. Лукша, О.И. Моделирование неоднородных электронных потоков в электронно-оптической системе гиротрона / О.И.Лукша, П.А.Трофимов // ЖТФ. – 2018. – Т. 88, № 4. – С. 614–620.
5. Лукша, О.И. Высокоэффективный гиротрон с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов / О.И.Лукша, П.А.Трофимов // ЖТФ. – 2019. – Т. 89, № 12. – С. 1988–1996.
6. Лукша, О.И. Разработка коллектора с многоступенчатой рекуперацией для гиротрона / О.И.Лукша, П.А.Трофимов // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 8. – С. 813–819.

Публикации в других изданиях

1. Louksha, O.I. A method of sorting of electrons in gyrotron multistage depressed collectors / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // Proc. 40th Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves. – Hong Kong, China, 2015. – P. 7327434.

2. Трофимов, П.А. Новый метод сепарации электронов для систем многоступенчатой рекуперации в гиротронах / П.А.Трофимов, О.И.Лукша // «Неделя науки СПбПУ». Материалы н.-т. конференции. ИФНиТ. – Санкт-Петербург, Россия, 2015. – С. 139–142.
3. Трофимов, П.А. Новый метод определения скоростных характеристик электронов в гиротроне / П.А.Трофимов, Н.Г.Колмакова, О.И.Лукша // «Неделя науки СПбПУ». Материалы н.-т. конференции. ИФНиТ. – Санкт-Петербург, Россия, 2015. – С. 201–205.
4. Louksha, O.I. Gyrotron research at SPbPU: diagnostics and quality improvement of electron beam / O.I.Louksha, G.G.Sominski, A.V.Arkipov, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – V. 44, N. 8. – P. 1310–1319.
5. Kolmakova, N.G. A new microwave diagnostics of electron beam in gyrotrons / N.G.Kolmakova, O.I.Louksha, G.G.Sominski, P.A.Trofimov // Proc. 41st Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves. – Copenhagen, Denmark, 2016. – P. 7758518.
6. Louksha, O.I. A multistage depressed collector with azimuthal magnetic field for gyrotrons / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // Proc. 41st Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves. – Copenhagen, Denmark, 2016. – P. 7758519.
7. Трофимов, П.А. Разработка системы многоступенчатой рекуперации для гиротронов с использованием нового метода сепарации электронов / П.А.Трофимов, О.И.Лукша // «Неделя науки СПбПУ». Материалы н.-т. конференции. Лучшие доклады. – Санкт-Петербург, Россия, 2016. – С. 157–161.
8. Трофимов, П.А. Влияние неоднородности эмиссии с катода в электронно-оптической системе гиротрона / П.А.Трофимов, О.И.Лукша // «Неделя науки СПбПУ». Материалы н.-т. конференции. ИФНиТ. – Санкт-Петербург, Россия, 2017. – С. 226–229.
9. Лукша, О.И. Исследование влияния неоднородности эмиссии с катода на качество электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона / О.И.Лукша, П.А.Трофимов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 165–169.
10. Louksha, O.I. Simulations of nonuniform electron beams in a gyrotron electron optical system / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // Proc. 43rd Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves. – Nagoya, Japan, 2018. – P. 1–2.
11. Louksha, O.I. A multistage depressed collector system for gyrotrons / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // Proc. 18th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. – London, UK, 2018. – P. 1–2.
12. Louksha, O.I. High-efficiency gyrotron with beam energy recovery / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // Proc. 44th Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves. – Paris, France, 2019. – P. 1–2.
13. Louksha, O.I. Development of the gyrotron collector system with multistage energy recovery / O.I.Louksha, P.A.Trofimov // J. Phys. Conf. Series. – 2019. – N. 1236. – P. 012047.

14. Trofimov, P.A. Simulation of high-efficiency gyrotron with the system of multistage energy recovery / P.A.Trofimiv, O.I.Louksha // ITM Web Conf. – 2019. – V. 30. – P. 02001.
15. Trofimov, P.A. Development of multistage energy recovery system for gyrotrons / P.A.Trofimiv, O.I.Louksha // ITM Web Conf. – 2019. – V. 30. – P. 02002.

Список цитируемой литературы

- [1] Гапонов, А.В. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике / Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1967. – Т. 10, №9–10. – С. 1414–1453.
- [2] Flyagin, V.A. Gyrotronoscillators / V.A.Flyagin, G.S.Nusinovich // Proceedings of the IEEE. – 1988. – V. 76, N. 6. – P. 646–647.
- [3] Nusinovich, G.S. Introduction to the physics of gyrotron / G.S.Nusinovich. – Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004. – 335 p.
- [4] Tsimring, Sh.E. Gyrotron electron beams: velocity and energy spread and beam instabilities / Sh.E.Tsimring // Int. J. Infrared Millim. Waves. – 2001. – V. 22, N. 10. – P. 1433–1468.
- [5] Лукша, О.И. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.04 / Лукша Олег Игоревич. – СПбПУ, Санкт-Петербург, 2011. – 285 с.
- [6] Kuftin, A.N. Theory of helical electron beams in gyrotrons / A.N.Kuftin, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, et al. // Int. J. Infrared Millim. Waves. – 1993. – V. 14, N. 4. – P. 783–816.
- [7] Nusinovich, G.S. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation / G.S.Nusinovich, A.N.Vlasov, M.Botton, et al. // Phys.Plasmas. – 2001. – V. 8, N. 7. – P. 3473–3479.
- [8] Лукша, О.И. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов / О.И.Лукша, Д.Б.Самсонов, Г.Г.Соминский, С.В.Сёмин // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, № 5. – С. 132–140.
- [9] Мануилов, В.Н. Численное моделирование низкочастотных колебаний пространственного заряда и потенциала в электронно-оптической системе гиротрона / В.Н.Мануилов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 10. – С. 872–879.
- [10] Лукша, О.И. Моделирование низкочастотных коллективных процессов в электронных потоках гиротронов / О.И.Лукша // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 5–6. – С. 425–437.
- [11] Glyavin, M.Yu. Experimental studies of gyrotron electron beam systems / M.Yu.Glyavin, A.L.Goldenberg, A.N.Kuftin, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1999. – V. 27, N.2. – P. 474–483.
- [12] Anderson, J.P. Design and emission uniformity studies of a 1.5-MW gyrotron electron gun / J.P.Anderson, S.E.Korbly, R.J.Temkin, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2002. – V. 30, N. 6. – P. 2117–2123.

- [13] Anderson, J.P. Experimental studies of local and global emission uniformity for a magnetron injection gun / J.P.Anderson, R.J.Temkin, M.A.Shapiro // IEEE Trans. Electron Devices. – 2005. – V. 52, N. 5. – P. 825–828.
- [14] Louksha, O.I. On potentials of gyrotron efficiency enhancement: measurements and simulations on a 4-mm gyrotron / O.I.Louksha, B.Piosczyk, G.G.Sominski, et al. // IEEE Trans.Plasma Sci. – 2006. –V. 34,N. 3. –P. 502-511.
- [15] Kuftin, A.N. Advanced numerical and experimental investigation for gyrotrons helical electron beams / A.N.Kuftin, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, et al. // Int. J. Infrared Millim. Waves. – 1999. – V. 20, N. 3. – P. 361-381.
- [16] Guss, W.C. Velocity spread measurements on a magnetron injection gun beam / W.C.Guss, M.A.Basten, K.E.Kreischer, R.J.Temkin // J. Appl. Phys. – 1994. –V. 76, N. 6. – P. 3237-3243.
- [17] Лукша, О.И. Повышение качества винтового электронного потока и КПД гиротрона при регулировании распределения электрического поля в области магнетронно-инжекторной пушки / О.И.Лукша, Д.Б.Самсонов, Г.Г.Соминский, А.А.Цапов // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, № 6. – С.101–105.
- [18] Louksha, O.I. Experimental study and numerical modeling of the electron beam formed in the electron-optical system of a gyrotron / O.I.Louksha, G.G.Sominskii, D.V.Kas'yanenko // J. Commun. Technol. Electron. – 2000. – V. 45, N. 1. – P. S71-S75.
- [19] Thumm, M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers / M.Thumm // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. – 2020. – V. 41, N. 1. – P. 1–140.
- [20] Manuilov, V.N.Gyrotron collector systems: types and capabilities / V.N.Manuilov, M.V.Morozkin, O.I.Luksha, M.Yu.Glyavin // Infrared Phys. Tech. – 2018. – V. 91. – P. 46–54.
- [21] Fix, A.Sh. The problems of increase in power, efficiency and frequency of gyrotrons for plasma investigations / A.S.Fix, V.A.Flyagin, A.L.Goldenberg, et al. // Int. J. Electron. – 1984. – V. 57, N. 6. – P. 821–826.
- [22] Wu, C. Preliminary studies on multistage depressed collectors for fusion gyrotrons / C.Wu, I.Gr.Pagonakis, S.Illy, et al. // German Microwave Conf. – Bochum, Germany, 2016. – P. 365–368.
- [23] Ling, G. A new approach for a multistage depressed collector for gyrotrons / G.Ling, B.Piosczyk, M.K.Thumm // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – V. 28, N. 3. – P. 606–613.
- [24] <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>
- [25] Силин, Р.А. Замедляющие системы / Р.А.Силин, В.П.Сазонов. – М.: Советское радио, 1966. – 632 с.
- [26] Завольский, Н.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование мощных гиротронов с рекуперацией / Н.А.Завольский, В.Е.Запелалов, А.Н.Куфтин, А.С.Постникова // Мат. 28-ой межд. Крымскойконф. – Севастополь, Россия, 2018. – С. 1131–1137.
- [27] Denisov, G.G. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics / G.G.Denisov,

- M.Yu.Glyavin, A.P.Fokin, et al. // Review of Scientific Instruments. – 2018. –V. 89, N. 8, P. 084702-1–084702-4.
- [28] Glyavin, M.Yu. Two-stage energy recovery system for DEMO gyrotron / M.Yu.Glyavin, V.N.Manuilov, M.V.Morozkin // Proc. 43rd Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves.– Nagoya, Japan, 2018. – P. 8510139-1–8510139-2.
- [29] Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д.Сушков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 305 с.

Аспирант _____/Трофимов П.А./