



Трофимов Павел Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИРОТРОНОВ ПУТЕМ
УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА И
МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ОСТАТОЧНОЙ
ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2020

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»

Научный руководитель: **Лукша Олег Игоревич**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Запевалов Владимир Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гиротронов для термоядерных исследований, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Григорьев Андрей Дмитриевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехническая электроника», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «22» декабря 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.01.04.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус IV, аудитория № 305.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке и на сайте <https://www.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « ____ » ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.01.04.04,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Соловьев Константин Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гиротроны являются наиболее эффективными мощными генераторами электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [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 качества формируемого в них винтового электронного потока (ВЭП), являющего своеобразной активной средой [1, 3]. Наиболее распространенным типом электронно-оптических систем (ЭОС), используемым 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 [4]. Формирование однородного в поперечном сечении ВЭП с малыми скоростным и энергетическим разбросами позволяет реализовать рабочие режимы гироприборов с увеличенной долей энергии, сосредоточенной в осцилляторном движении частиц, из которой черпается энергия выходного электромагнитного излучения [5].

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество ВЭП, является неоднородность термоэлектронной эмиссии с катода [6]. Практикуемые в настоящее время методы оценки неоднородности эмиссии в гироприборах базируются на определении интегрального коэффициента эмиссионной неоднородности, полученного путем дифференцирования вольт-амперной характеристики электронной пушки [7, 8]. Однако для выявления причин неоднородности эмиссии, а также для уточнения закономерностей ее влияния на качество ВЭП и эффективность работы гиротронов, необходимы знания не только об интегральном коэффициенте неоднородности, но также и о пространственном распределении эмиссионного тока по поверхности катода. Метод диагностики, реализованный ранее в СПбПУ, позволяет получать такие распределения непосредственно в работающем гиротроне [5, 9]. Новая информация о влиянии эмиссионной неоднородности на работу гиротронов может быть получена с помощью трехмерного траекторного анализа, используя при этом измеренные распределения плотности тока эмиссии с поверхности различных катодов.

Для обеспечения эффективной работы гиротрона важным является знание скоростных характеристик ВЭП, особенно на этапе его формирования. Существующие методы диагностики скоростей электронов (например, [10, 11]) не обеспечивают достаточный уровень информативности, либо неприменимы в рабочих режимах гиротронов из-за возмущающего действия датчиков и анализаторов. Актуальной задачей поэтому является разработка новых слабозмущающих 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 [5, 6]. 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 соответственно). Среди паразитных колебаний в ВЭП можно отдельно выделить низкочастотные колебания (НЧК), развивающиеся в пространственном заряде в ловушке между катодом и пробкой магнитного поля [9, 12]

Электронный КПД мощных гиротронов, как правило, 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, 13]. Дальнейшее повышение эффективности работы гиротрона возможно в результате раздельного торможения фракций электронного потока с разной энергией, что обеспечивает многоступенчатую рекуперацию электронного потока [13–15]. Однако системы с многоступенчатой рекуперацией пока не были реализованы в гиротронах. Это связано со сложностью пространственной сепарации электронных фракций ВЭП в коллекторе из-за наличия остаточного магнитного поля в этой области, а также вследствие имеющегося в пучке разброса электронов по компонентам скорости и координатам.

Таким образом, актуальным является проведение исследования, направленного на достижение повышенных значений полного КПД 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 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.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. 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.

2. 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.
3. Разработка слабовозмущающего метода диагностики скоростных характеристик электронного пучка перед поступлением в резонатор, и проектирование диагностической секции для реализации этого метода диагностики в гиротроне СПБПУ.
4. Разработка нового метода пространственной сепарации электронов с различной энергией в ВЭП гиротронов, предназначенного для реализации на его основе системы многоступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов.
5. 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.
6. Определение в эксперименте 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 диссертационной работы. 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 эмиссионного тока на поверхности катода.

Разработан новый слабовозмущающий 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 азимутального магнитного и продольного электрического полей. 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 эмиттера 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 значимость работы заключается в определении новых закономерностей влияния неоднородности эмиссии 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 механизмов 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, 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, основанный на использовании продольного электрического и азимутального магнитного полей, позволит реализовать системы эффективной многоступенчатой рекуперации энергии в гиротронах и других вакуумных электронных приборах с аксиально-симметричным потоком.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. 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.
2. 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.
3. Метод, основанный на дрейфе электронов в скрещенных аксиальном электрическом и азимутальном 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.
4. 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.

Личный вклад автора. Представленные в диссертационной работе результаты расчетов, численного моделирования и экспериментальных измерений были получены автором лично. Постановка задач исследований, выбор методов и инструментов достижения поставленных целей, анализ полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, профессором О. И. Лукшой.

Апробация результатов. 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);
- 16-й и 17-й международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, Россия, 2015, 2018);
- 10-м Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, Россия, 2016);
- 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, Россия, 2018);
- 18-й международной конференции "IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC-2017" (Лондон, Великобритания, 2017);
- Международной конференции "Emerging Trends in Applied and Computational Physics ETACP-2019" (Санкт-Петербург, Россия, 2019);
- 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КРЫМиКо-2019» (Севастополь, Россия, 2019);
- Международной конференции "Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies YETI-2020" (Санкт-Петербург, Россия, 2020).

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационного исследования опубликованы 22 работы. Из них 8 статей в реферируемых изданиях, входящих в список ВАК, 3 статьи в других изданиях и 11 трудов конференций. Список публикаций приведен в конце работы.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 158 страницах и состоит из введения, пяти основных глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 123 наименований. Диссертация содержит 72 рисунка и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обозначена актуальность темы диссертации, определяется цель и устанавливаются задачи исследования. Отмечены новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в работе результатов, приведены защищаемые положения, а также кратко изложено содержание работы. Представлена информация об апробации результатов работы и публикациях по теме диссертационного исследования.

В 1 главе приводится обзор научно-технической литературы по предмету исследования, содержащий общие сведения о ВЭП в гиротронах, влиянии различных факторов на его качество, а также традиционно применяемые методы определения характеристик пучка. Кроме этого, в обзоре рассмотрены применяемые в гиротронах коллекторные системы, в частности оснащенные системами рекуперации энергии электронного потока.

В главе 2 приводится описание экспериментальной установки, а также методик измерения и способов управления параметрами ВЭП, применяемые в данной работе.

В п. 2.1 приводится описание экспериментального гиротрона СПбПУ [5, 6, 9]. Схематическое изображение сечения гиротрона показано на рис. 1. Основные параметры прибора представлены в табл. 1. 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, отличная от показанной на рис. 1, для реализации рекуперации остаточной энергии ВЭП.

В п. 2.2 описаны методики измерений, реализованные в гиротроне СПбПУ. Эти методики позволяют определять распределение тока эмиссии с катода, характеристики динамических процессов, происходящих в пространственном заряде ВЭП, а также энергетические спектры электронов в коллекторной области.

В п. 2.3 описаны методики улучшения качества ВЭП и повышения КПД гиротрона.

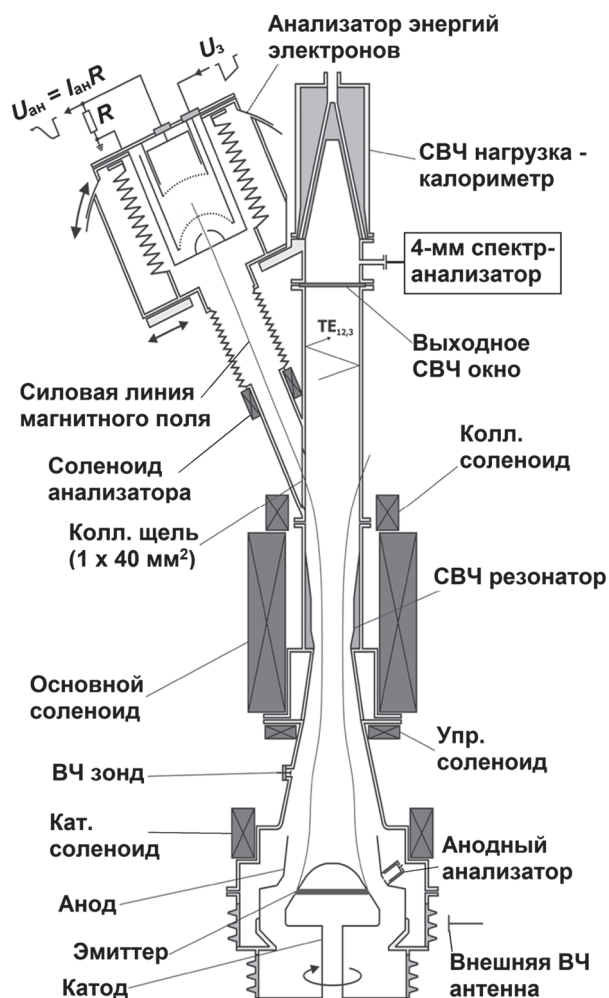


Рис. 1. Схематическое изображение сечения экспериментального гиротрона СПбПУ.

Оптимизация распределения электрического поля в области пушки производилась с помощью многосекционного управляющего электрода, находящегося за эмитирующим пояском катода и изолированного от остальных катодных элементов (рис. 2). Такая оптимизация позволяет уменьшить скоростной разброс электронов, подавить паразитные низкочастотные колебания пространственного заряда в области формирования ВЭП и, как следствие, повысить средний питч-фактор в пучке. Также в рамках экспериментов регулировалось распределение магнитного поля в области перемагничивания ВЭП, что дополнительно позволяло уменьшить инкремент развития и интенсивность паразитных НЧК. Для этого использовался управляющий соленоид (рис. 1), ток через который регулировался для обеспечения требуемого распределения поля.

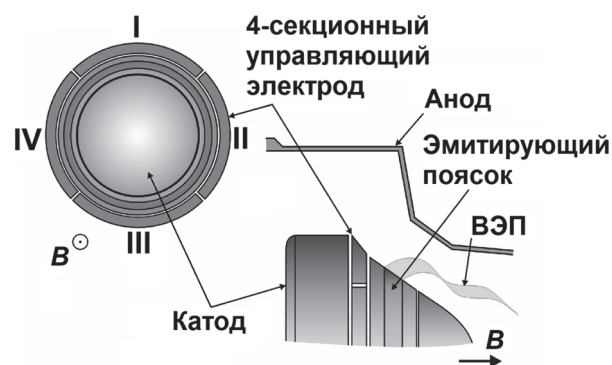


Рис. 2. Модифицированная геометрия МИП гиротрона с управляющим электродом.

В главе 3 изложены результаты численного моделирования процессов в гиротроне СПБПУ, направленные на повышение его эффективности.

В п. 3.1 приводится описание методов моделирования и расчетных моделей. Основной программой для расчетов являлась лицензионная версия программного пакета 3D моделирования CST Studio Suite [16].

В п. 3.2 описаны результаты численного моделирования, направленного на определение влияния неоднородности эмиссии с катода на качество ВЭП с использованием азимутальных распределений эмиссионного тока, измеренные ранее для разных катодов в гиротроне СПБПУ. Расчеты проводились для моделей стандартной и модифицированной версий МИП. В модифицированной версии за эмитирующим пояском катода присутствовал управляющий электрод с углом наклона конусной образующей $\phi'_k = 50^\circ$, увеличенным по отношению к углу

Таблица 1

Основные характеристики расчетного рабочего режима СПБПУ.

Рабочая мода	$TE_{12,3}$
Рабочая частота	$f_0 = 74.2$ ГГц
Ускоряющее напряжение	$U_0 = 30$ кВ
Коэффициент магнитной компрессии	$B_0 / B_k = 18.02$
Средний питч-фактор в резонаторе	$\bar{\alpha} = 1.28$
Магнитное поле в области резонатора	$B_0 = 2.75$ Тл
Ток электронного пучка	$I_{II} = 10$ А

наклона стандартной МИП $\phi_k = 35^\circ$. Рассматривались экспериментальные распределения для катодов из гексаборида лантана (С1 и С2) и для металлопористого W-Va катода (С3). Кроме этих катодов, расчеты также производились для катода с однородной эмиссией С0 и для модельного распределения С4 с равным катоду С3 интегральным коэффициентом эмиссионной неоднородности $\delta j_e = 74\%$, но иной формой зависимости $j_e(\theta)$.

Параметры ВЭП для катодов с различной эмиссионной неоднородностью.

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

Значения параметров ВЭП, определенные в центре резонатора гиротрона, для катодов C0–C4 и двух конфигураций МИП, приведены в табл. 2. Кроме значений коэффициента эмиссионной неоднородности δj_e , среднего пичч-фактора $\bar{\alpha}$, разбросов поперечных скоростей δv_{\perp} и энергий $\delta \varepsilon$, здесь приведен коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$, который характеризует долю электронов, отраженных от магнитной пробки в сторону катода. Как показывают результаты, 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 $\delta \varepsilon$.

В рамках моделирования неоднородных ВЭП исследовалось влияние неоднородности эмиссии на пространственную структуру ВЭП гиротрона. На рис. 3 изображены распределения центров электронных орбит частиц $R_{\text{п}}(\theta)$ в плоскости, соответствующей центру резонатора для катода C3, а также соответствующее ему распределение плотности тока эмиссии $j_e(\theta)$. Этот катод характеризуется локальной областью с аномальной плотностью тока, где наблюдается заметное уширение толщины стенки пучка $\Delta R_{\text{п}}$ из-за действия азимутального электрического поля, существующего в неоднородном

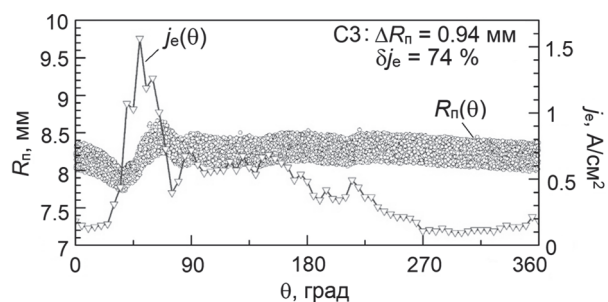


Рис. 3. Азимутальное распределения центров орбит электронов $R_{\text{п}}(\theta)$ и соответствующее распределение плотности тока эмиссии для катода C3.

ВЭП, которое в сочетании с продольным магнитным полем приводит к дрейфу электронов по радиусу. Сравнение данных для катодов С3 и С4, которые имеют одинаковый интегральный коэффициент неоднородности δj_e , но разные распределения $j_e(\theta)$, позволило сделать вывод, что распределение электронов в плоскости поперечного ВЭП, а также другие параметры ВЭП будут определяться не только перепадом плотности тока эмиссии с разных участков катода, но и пространственным масштабом неоднородностей эмиссии.

В п. 3.3 приведены результаты расчетов, направленных на поиск рабочего режима гиротрона с наибольшим электронным КПД. В рамках моделирования использовалась модифицированная МИП с управляющим электродом и рассматривались две модели термо катода: катод с однородной эмиссией и секционированный катод, в котором эмиссия отсутствовала с двух азимутальных участков "длиной" 70° . Необходимость расчета секционированного катода была обусловлена его использованием для гиротрона с рекуперацией, подробности разработки которого описаны в главе 4. Процедура оптимизации параметров ВЭП заключалась в варьировании величины магнитной компрессии B_0/B_k и напряжений на электродах МИП для формирования ВЭП с минимальным скоростным разбросом и высоким питч-фактором.

В результате проведенной оптимизации были выбраны значения напряжения на аноде $U_a = 8.4$ кВ и на управляющем электроде $U_{упр} = -44.5$ кВ относительно заземленного корпуса прибора при напряжении на катоде $U_0 = -30$ 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. Следует отметить, что в этих расчетах не учитывались факторы, которые могут влиять на суммарное значение разброса электронов по скоростям: шероховатость поверхности катода, неидеальное изготовление и юстировка элементов ЭОС, развитие динамических процессов в пространственном заряде ВЭП. Однако, как показали описанные в главе 5 экспериментальные исследования, режимы с подобным высоким питч-фактором могут быть реализованы в гиротроне СПБПУ при относительно малом суммарном скоростном разбросе, при котором отсутствуют паразитные НЧК.

В п. 3.4 рассмотрено взаимодействие электронов пучка с высокочастотным полем в резонаторе. В этих расчетах в качестве входных данных использовалась информация о параметрах ВЭП, создаваемых однородным и секционированным катодами, полученная в п. 3.3. Резонатор гиротрона СПБПУ имеет радиус 14.45 мм, длину регулярной части 28 мм и рассчитан на рабочую моду $TE_{12,3}$. На начальном этапе в модели резонатора был проведен расчет собственных мод. По результатам этого расчета были определены резонансные частоты мод с наибольшей добротностью, а также соответствующие этим модам распределения электрической и магнитной составляющих высокочастотного поля.

В результате моделирования был зарегистрирован устойчивый режим генерации, при котором для однородного катода суммарная генерируемая СВЧ мощность $P_{вч}$ на частоте около 74.5 ГГц была равна 141 кВт, что соответствует электронному КПД $\eta_{эл} = 47$ %. При переходе к секционированному ВЭП

наблюдалось некоторое снижение выходной СВЧ мощности, обусловленное, очевидно, более низким качеством ВЭП. Суммарная выходная мощность для этого катода составляла около 138 кВт. Данные о характеристиках отработанного ВЭП после его взаимодействия с высокочастотным полем в резонаторе использовались в дальнейшем при траекторном анализе в коллекторе гиротрона СПБПУ с многоступенчатой рекуперацией, результаты которого обсуждаются в главе 4.

В п. 3.5 приведены результаты разработки нового слабозмущающего метода диагностики, предназначенного для определения скоростных характеристик электронов в области формирования ВЭП. Метод основан на усилении электромагнитной волны, распространяющейся с фазовой скоростью, близкой к продольной скорости электронов в потоке. Подобный метод лежит в основе работы ламп бегущей волны. СВЧ устройство, предназначенное для реализации данной диагностики, должно состоять из замедляющей системы (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 специальная полость (см. рис. 1), в которую может быть установлена диагностическая секция. Геометрия данной полости определяла параметры модели диагностической секции при ее разработке.

На базе данных аналитических расчетов был выбран тип ЗС – диафрагмированный волновод [17], как наиболее подходящий для взаимодействия с аксиально-симметричным полым ВЭП гиротрона, и разработана модель диагностической секции. В данной модели было проведено численное моделирование взаимодействия ВЭП с входным сигналом с частотой в диапазоне 5.6–6.0 ГГц, в результате которого были получены частотные зависимости коэффициента усиления при различных значениях средней продольной скорости электронов в потоке, представленные на рис. 4. Наблюдаемое смещение максимума коэффициента усиления в область меньших частот с увеличением продольной скорости электронов доказывает, что разработанная методика может быть использована для определения средних значений продольной компоненты скорости электронов для типичных параметров ВЭП в мощных гиротронах. По значению продольной скорости, в принципе, можно определить значения поперечной компоненты скорости и питч-фактора, исходя из предположения о моноэнергетичности электронов в пучке.

В главе 4 описываются результаты моделирования коллекторных систем с многоступенчатой рекуперацией энергии.

Параграф 4.1 посвящен описанию нового метода пространственной сепарации электронов с разной энергией в отработанном ВЭП гиротрона и

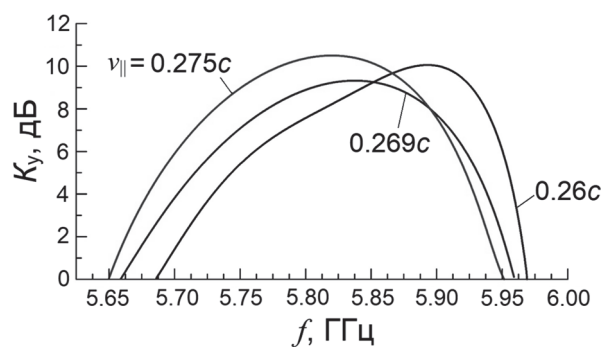


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления K_y от частоты входного сигнала f при различной продольной скорости электронов $v_{||}$ при влете в область диагностики.

определению требований к коллекторной системе для реализации подобного метода сепарации. Он 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

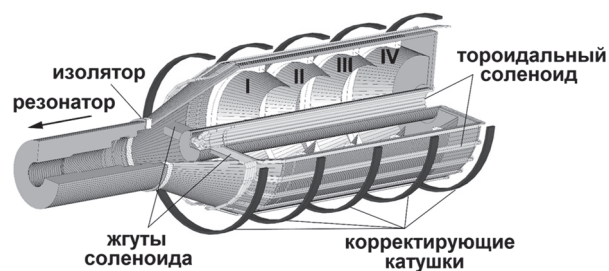


Рис. 5. Схематическое изображение модели коллектора гиротрона СПБПУ, I – IV – коллекторные секции.

электронов определяется отношением амплитуд полей E_z / B_θ и не зависит от их начальной энергии. Как следствие, смещение электрона в радиальном направлении будет определяться временем его пребывания в области скрещенных полей, которое, в свою очередь, зависит от начальной энергии. Это дает возможность обеспечить разделение в пространстве электронных фракций с разной энергией и их осаждение на секции под различным потенциалом, что позволит обеспечить многоступенчатую рекуперации энергии отработанного ВЭП.

В п. 4.2 приведены результаты проектирования коллектора с 4-ступенчатой системой рекуперации, основанной на разработанном методе сепарации, для гиротрона СПБПУ. В п. 4.2.1 описываются модель коллекторной системы (см. рис. 5), а также результаты анализа распределений полей в данной системе. Размеры секций I–IV и их потенциалы были выбраны на основе оценок дрейфовых расстояний для электронов с разной энергией при заданных амплитудах полей E_z и B_θ , которые, в свою очередь, были определены на основе результатов аналитических расчетов. Корректирующие катушки обеспечивают квазиоднородное распределение продольного магнитного поля в области рекуперации. Азимутальное магнитное поле создается тороидальным соленоидом. Проводники, соединяющие внутреннюю и наружную обмотки тороидального соленоида со стороны, обращенной к резонатору, собраны в два "жгута" для того, чтобы обеспечить прохождение электронного потока в область рекуперации, где расположены секции коллектора. Данные жгуты создают паразитное локальное магнитное поле, которое искажает близлежащие траектории электронов, что приводит к снижению эффективности рекуперации и увеличению потока частиц, отраженных от коллектора в сторону резонатора, что также влечет за собой снижение выходной СВЧ мощности и электронного КПД гиротрона [18]. Для снижения негативного влияния локального поля жгутов при проведении траекторного анализа в коллекторе с тороидальным соленоидом использовался секционированный отработанный ВЭП, параметры которого были получены в рамках описанного в п. 3.4 моделирования. Азимутальное положение участков катода, в которых отсутствовала эмиссия, соответствовало положению жгутов тороидального соленоида.

В п. 4.2.2 представлены результаты траекторного анализа отработанного ВЭП в разработанной коллекторной системе с рекуперацией при варьировании параметров коллектора: геометрии и потенциалов секций и азимутального

положения секторов катода без эмиссии. Задачей траекторного анализа являлось достижение минимального значения рассеиваемой мощности на секциях рекуператора при малой доле отраженных от коллектора электронов, не превышающей 1–2 %.

В табл. 3. приведены значения потенциалов секций φ_N и значения мощности P_N , рассеиваемой на секциях коллектора, определенные в результате оптимизации. Суммарная мощность, рассеиваемая на коллекторе, составила

$P_{\text{расс}} = 54.19$ кВт. В данном рекуператоре основная часть электронов осаждается на первой секции, что вызвано необходимостью уменьшения радиуса внутреннего отверстия этой секции и снижения величины $|\varphi_1|$ для обеспечения малого отражения от коллектора. 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 $\eta_{\text{колл}} = 66.5$ %.

В п. 4.3 приведены результаты моделирования коллекторной системы, основанной на разработанном методе сепарации электронов, для прототипа гиротрона, предназначенного для использования в термоядерном реакторе DEMO [14]. Основные параметры этого гиротрона представлены в табл. 4. Этот гиротрон разрабатывается в ИПФ РАН. В расчетах использовался типичный энергетический спектр электронов в отработанном ВЭП, соответствующий рабочему режиму мощного гиротрона с электронным КПД $\eta_{\text{эл}} = 36$ % [14]. В качестве основы для модели использовался традиционный коллектор цилиндрической формы с внутренним радиусом, равным 160 мм, совпадающим с радиусом коллектора данного гиротрона без рекуперации. Основные принципы проектирования коллектора были подобны изложенным выше для гиротрона СПбПУ.

В п. 4.3.1 описана разработка коллекторной системы с идеализированным распределением азимутального магнитного поля, которое создавалось проводником, расположенным на оси системы. Выбором параметров этого проводника обеспечивалась адиабатичность нарастания азимутального магнитного поля в переходной области между резонатором и областью рекуперации. В модели с идеализированным полем было достигнуто значение полного

Таблица 3

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

Таблица 4

Основные характеристики прототипа гиротрона DEMO

Рабочая частота	$f_0 = 250$ ГГц
Ускоряющее напряжение	$U_0 = 55$ кВ
Магнитное поле в области резонатора	$B_0 = 9.57$ Тл
Ток электронного пучка	$I_{\text{п}} = 10$ А

КПД гиротрона, равное 84 %, при незначительном отражении электронов от коллектора. Результаты, полученные в данной модели, подтверждают эффективность предложенного метода сепарации. Данные, полученные для идеализированного распределения магнитного поля, были использованы для проектирования тороидального соленоида.

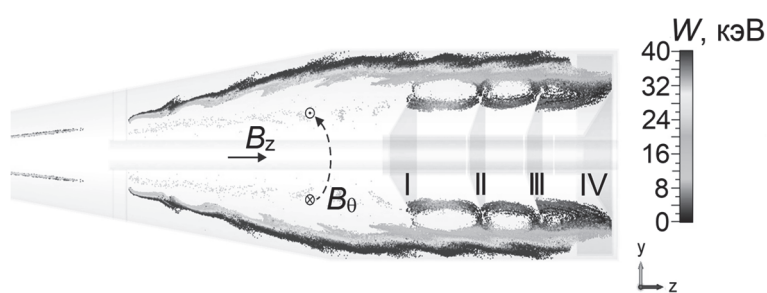


Рис. 6. Положение частиц с разной энергией W в плоскости $y-z$ в модели с тороидальным соленоидом. Показано направление аксиальной и азимутальной компонент магнитного поля.

В п. 4.3.2 описана разработка коллекторной системы с тороидальным соленоидом для прототипа гиротрона DEMO. В этом гиротроне значение удерживающего продольного магнитного поля в области рекуперации заметно меньше, чем в гиротроне СПБПУ, что приводит к увеличению негативного эффекта локального магнитного поля жгутов тороидального соленоида. В этом случае велик радиальный разброс траекторий в области рекуперации для частиц, эмитируемых из точек с различным азимутальным положением.

В результате проведенного теоретического анализа сил, действующих на траектории электронов в области жгутов, было установлено, что радиальный разброс электронов вызван комбинированным действием силы Лоренца, действующей на электрон,двигающийся в продольном направлении, при его влете в азимутальное магнитное поле, и силы, связанной с наличием градиента магнитного потока при увеличении или уменьшении продольного магнитного поля [19]. Эти силы могут частично компенсировать друг друга при смене направления азимутального магнитного поля, создаваемого тороидальным соленоидом, что заметно снижает негативное влияние магнитного поля жгутов. Изменение направления азимутального поля также влечет за собой изменение направления радиального дрейфа, играющего ключевую роль в сепарации электронов, что потребовало изменения геометрии секций.

Пересечения электронных траекторий с плоскостью $y-z$ в обновленной модели коллектора с тороидальным соленоидом для прототипа гиротрона DEMO показаны на рис. 6. Значение индукции азимутального магнитного поля B_0 в области рекуперации на среднем радиусе ВЭП равнялось -0.08 Тл. Расчеты в данной модели были проведены для секционированного ВЭП, в котором отсутствовали электроны в пределах двух азимутальных секторов по 45° каждый. Результаты траекторного анализа представлены

Таблица 5

Результаты траекторного анализа в 4-ступенчатой коллекторной системе с тороидальным соленоидом для прототипа гиротрона DEMO.

Номер секции	Потенциал секции φ_N , кВ	Рассеиваемая мощность P_N , кВт
I	-23.6	9.03
II	-29.1	5.61
III	-32.4	11.50
IV	-37.8	12.84
Корпус	0	0.42

в табл. 5. Суммарная мощность, рассеиваемая на электродах коллектора, в этом режиме равнялась 39.4 кВт, что при электронном КПД $\eta_{эл} = 36\%$ и выходной мощности $P_{вч} = 198$ кВт, соответствует полному КПД $\eta_{п} = 83.4\%$. Доля отраженных электронов при этом составляла 0.35 % от полного тока пучка.

Следует отметить, что при расчете коллектора гиротрона ДЕМО входные параметры электронных траекторий (энергия, питч-фактор, радиальная координата) 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.

Для прототипа гиротрона ДЕМО были проведен расчет тепловой нагрузки на коллектор. Значение максимальной плотности мощности, рассеиваемой на коллекторе с четырехступенчатой рекуперацией, составляло примерно 200 Вт/см², что заметно меньше, чем в коллекторе без рекуперации, где это значение равнялось примерно 800 Вт/см².

Глава 5 посвящена экспериментальному исследованию гиротрона СПБПУ.

В п. 5.1 представлены результаты измерения энергетических спектров отработанного ВЭП в различных режимах работы гиротрона. Измеренные спектры характеризовались минимальной энергией электронов $W_{мин}$, равной 7–8 кэВ, и протяженным участком в области высоких энергий, достигающим ~ 35 кэВ, что превышает начальную энергию электронов eU_0 . По значениям минимальной энергии $W_{мин}$ была выбрана величина тормозящего напряжения на корпусе коллектора при реализации схемы с одноступенчатой рекуперацией в гиротроне.

Параграф 5.2 посвящен реализации метода подавления паразитных низкочастотных колебаний путем регулирования распределения электрического поля в области МИП с помощью многосекционного управляющего электрода (рис. 2). При разных комбинациях напряжения на секциях проводился поиск рабочего режима гиротрона с наименьшей амплитудой НЧК с частотой примерно 160 МГц, регистрируемых с помощью специального зонда-антенны (рис. 1).

Наиболее оптимальный режим характеризовался следующими потенциалами секций управляющего электрода: $\varphi_I = +1$ кВ, $\varphi_{II} - \varphi_{IV} = +4$ кВ относительно катода. При этом секция I располагалась напротив участка катода с уменьшенной плотностью тока эмиссии, вызванной наличием разрыва в спирали подогревателя катода для приложения напряжения накала. 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 пич-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.

В п. 5.3 приведены данные экспериментов по повышению электронного КПД гиротрона с помощью регулирования электрического поля в области пушки. Эти эксперименты были проведены с катодным узлом, у которого была повышена однородность нагрева катода, а также был использован эмиттер с малым коэффициентом $\delta j_e < 20 \%$, при котором влияние эмиссионной неоднородности на качество ВЭП незначительно.

При проведении измерений определялось влияние напряжения на односекционном управляющем электроде на значение электронного КПД гиротрона в зоне возбуждения рабочей моды $TE_{12,3}$. Во время экспериментов поддерживался рабочий режим с постоянными значениями $U_0 = 30$ кВ, $I_{\text{п}} = 10$ А и $B_0 / B_k = 18.78$. Режим с отрицательным напряжением на управляющем электроде $\phi_{\text{упр}} = -5$ 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, что в центре рабочей моды при $B_0 = 2.75$ Тл расчетный пич-фактор равнялся 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 %.

Параграф 5.4 содержит результаты завершающего этапа экспериментального исследования, заключающегося в измерении КПД гиротрона, оснащенного системой рекуперации, в режимах с улучшенным качеством ВЭП, достигнутым в результате оптимизации распределений электрического и магнитного полей.

Зависимости электронного КПД гиротрона и выходной СВЧ мощности от индукции магнитного поля в резонаторе показана на рис. 7. В результате предпринятых мер по снижению скоростного разброса в ВЭП и подавлению паразитных НЧК был реализован режим работы с электронным КПД $\sim 46 \%$, 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

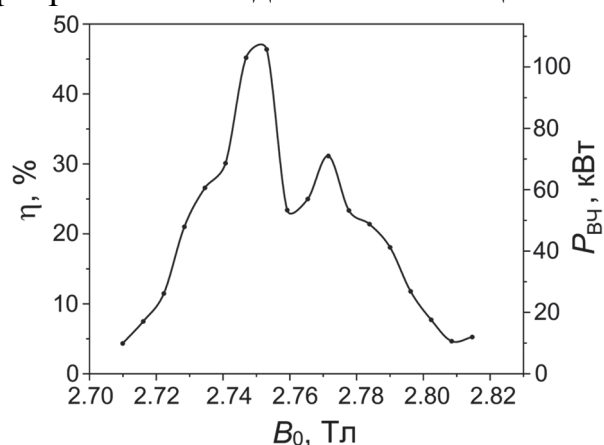


Рис. 7. Зависимости электронного КПД $\eta_{\text{эл}}$ и генерируемой СВЧ мощности $P_{\text{вч}}$ от индукции магнитного поля B_0 в резонаторе гиротрона с новой коллекторной системой с рекуперацией ($U_0 = 30$ кВ, $I_{\text{п}} = 7.6$ А).

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 %.

Основные выводы и результаты диссертации. Подводя итоги проведенного исследования, следует отметить важнейшие полученные в работе результаты.

1. В результате траекторного анализа, выполненного в гиротроне СПБПУ, было определено влияние неоднородности эмиссии с катода на качество ВЭП. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета не только интегрального коэффициента эмиссионной неоднородности, но также и реального вида распределения плотности тока эмиссии по катодной поверхности. Как показало сравнение результатов расчетов для гиротрона с пушками разной геометрии, относительный вклад всех факторов, влияющих на характеристики ВЭП (скоростной и энергетический разброс электронов, пространственную структуру пучка, коэффициент отражения от магнитной пробки) определяет предельный уровень эмиссионных неоднородностей, приемлемый для конкретного прибора.

2. Была предложена и исследована новая слабовозмущающая СВЧ диагностика, предназначенная для определения скоростных характеристик ВЭП перед его поступлением в резонатор гиротрона. Проведено численное моделирование, которое показало возможность определения средних значений компонент скорости и питч-фактора в гиротроне СПБПУ на базе анализа частотных зависимостей коэффициента усиления сигнала с частотой в диапазоне единиц гигагерц, распространяющегося в специально установленной в гиротроне замедляющей системе.

3. Разработан метод сепарации электронов в скрещенных аксиальном электрическом и азимутальном магнитном полях, который позволяет осуществлять эффективную сепарацию электронов с разными энергиями в отработанном ВЭП гиротронов. С использованием данного метода были разработаны и исследованы коллекторные системы с четырехступенчатой рекуперацией для гиротрона СПБПУ и прототипа гиротрона ДЕМО. В обеих системах для формирования азимутального магнитного поля были использованы тороидальные соленоиды. В результате проведенного численного моделирования показана возможность достижения полного КПД порядка 70–80 % в режимах с улучшенным качеством ВЭП при многоступенчатой рекуперации остаточной энергии электронов.

4. 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. Реализация режимов с высоким качеством ВЭП в гиротроне СПБПУ, достигнутым в результате оптимизации распределений электрического и магнитного полей при использовании катода с достаточной степенью однородности, позволила повысить электронный КПД прибора до примерно 46 % без рекуперации энергии. Реализация системы одноступенчатой рекуперации обеспечила повышение полного КПД до ~ 60 %.

Публикации по теме диссертации

- [A1] Фефелов, С.А. 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
- [A2] 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.
- [A3] 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.
- [A4] 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.
- [A5] 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.
- [A6] 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.
- [A7] Louksha, O.I. Gyrotron research at SPbPU: diagnostics and quality improvement of electron beam / O.I. Louksha, G.G. Sominski, A.V. Arkhipov, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – V. 44, N. 8. – P. 1310–1319.
- [A8] 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.
- [A9] 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.
- [A10] 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.
- [A11] 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.
- [A12] 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.
- [A13] 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.

- [A14] 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.
- [A15] 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.
- [A16] 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.
- [A17] 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.
- [A18] 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.
- [A19] Trofimov, P.A. Simulation of high-efficiency gyrotron with the system of multistage energy recovery / P.A. Trofimov, O.I. Louksha // ITM Web Conf. – 2019. – V. 30. – P. 02001.
- [A20] Trofimov, P.A. Development of multistage energy recovery system for gyrotrons / P.A. Trofimov, O.I. Louksha // ITM Web Conf. – 2019. – V. 30. – P. 02002.
- [A21] Лукша, О.И. Разработка коллектора с многоступенчатой рекуперацией для гиротрона / О.И. Лукша, П.А. Трофимов // Радиотехника и электроника. – Т. 65, № 8. – С. 813–819.
- [A22] Лукша, О.И. Траекторный анализ в коллекторе с многоступенчатой рекуперацией энергии для прототипа гиротрона ДЕМО. Часть I. Идеализированное распределение магнитного поля / О.И. Лукша, П.А. Трофимов, В.Н. Мануилов, М.Ю. Глявин // ЖТФ. – 2021. – Т. 91, № 1. – С. 135–140 (в печати).

Список цитируемой литературы

- [1] Flyagin, V.A. Gyrotron oscillators / V.A. Flyagin, G.S. Nusinovich // Proceedings of the IEEE. – 1988. – V. 76, N. 6. – P. 646–647.
- [2] Денисов, Г.Г. Гиротроны мегаваттного уровня мощности для систем электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в установках УТС / Г.Г. Денисов, В.Е. Запелалов, А.Г. Литвак, В.Е. Мясников // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46, № 10. – С. 845–858.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Программное обеспечение для электромагнитной симуляции и анализа CST Studio Suite 3D [Электронный ресурс] // Программное обеспечение для 3D-проектирования – Дассо Систем [сайт]. [2002]. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite> (дата обращения 20.10.2020).
- [17] Силин, Р.А. Замедляющие системы / Р.А. Силин, В.П. Сазонов. – М.: Советское радио, 1966. – 632 с.
- [18] Завольский, Н.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование мощных гиротронов с рекуперацией / Н.А. Завольский, В.Е. Запевалов, А.Н. Куфтин, А.С. Постникова // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* – 2019. – Т. 62, №11. – С. 842–854.
- [19] Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 305 с.