

На правах рукописи



**ЛЕЩЕВА КСЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
ВИНТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ  
ДЛЯ НОВЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ГИРОПРИБОРОВ**

1.3.5. – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена на кафедре квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

Научный руководитель: **Мануилов Владимир Николаевич**  
доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры квантовой радиофизики и электроники  
радиофизического факультета ННГУ  
им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Морев Сергей Павлович**  
доктор физико-математических наук, эксперт  
научно-технической сферы Акционерного общества  
«Научно-производственное предприятие «Исток»  
им. А. И. Шокина», г. Фрязино

**Свешников Виктор Митрофанович**  
доктор физико-математических наук, главный  
научный сотрудник Института вычислительной  
математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Институт радиотехники и  
электроники Российской академии наук», г. Москва

Защита состоится 14 октября 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 10 корпус, аудитория 511.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-leshchevoy-ksenii>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.392.01,  
доктор физико-математических наук,  
доцент



Сысоев Илья  
Вячеславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Мазеры на циклотронном резонансе (МЦР) [1 – 4] являются несомненными лидерами среди источников электромагнитного излучения диапазона миллиметровых и субмиллиметровых волн как по мощности и КПД, так и по рабочему диапазону частот. Наиболее успешными среди большого числа вариантов МЦР, предложенных к настоящему времени, являются гиротроны, гироклистроны и гиро-ЛБВ [5 – 7]. Во всех указанных приборах в качестве активной среды (источника энергии для генерации излучения) используются электронные потоки с частицами, движущимися по винтовым траекториям в однородном магнитном поле. Наиболее важными характеристиками винтовых электронных пучков (ВЭП) являются питч-фактор  $g$  - отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения вдоль магнитного поля, относительный разброс вращательных (осцилляторных) скоростей  $\delta v_{\perp}$  и ток пучка  $I_0$ . Поскольку в МЦР в энергию электромагнитного поля преобразуется только вращательная энергия электронов, для эффективной генерации необходимо обеспечить условие  $g > 1$ . Наличие скоростного разброса снижает КПД, но что еще более важно - существенным образом влияет на устойчивость ВЭП [8, 9]. Наконец, ток пучка  $I_0$ , совместно с полным ускоряющим напряжением  $U_0$ , во многом определяют выходную мощность прибора, что особенно важно для мегаваттных гиротронов с частотой 170 – 250 ГГц, используемых для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза и так называемых технологических гиротронов диапазона частот 24 – 45 ГГц.

Как правило, для систем формирования ВЭП характерно выполнение двух условий

- аксиальной симметрии

$$\partial/\partial\varphi = 0 \quad (1)$$

- адиабатичности (слабой неоднородности) формирующих ВЭП электрического и магнитного полей.

$$L_E, L_B \gg r_{\perp}, h \quad (2)$$

Здесь  $L_E, L_B$  – масштабы неоднородности электрического и магнитного полей,  $r_{\perp}, h$  – радиус вращения и шаг электронной траектории. Условие (1) упрощает изготовление как электродинамической, так и электронно-оптической систем (ЭОС) гиротрона, а условие (2) обеспечивает низкую критичность ЭОС к изменению электрического режима и ошибкам юстировки прибора. При одновременном выполнении (1) и (2) приходим к схеме формирования ВЭП, которая получила название адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [10].

Для МИП характерна пробочная конфигурация магнитного поля, в которой доля вращательной энергии электронов адиабатически увеличивается по мере их движения от катода к резонатору. В силу специфики процесса формирования ВЭП в МИП в скрещенных электрическом и магнитном полях, формируемый такой

системой электронный пучок приобретает весьма существенный разброс вращательных скоростей электронов, обусловленный целым рядом физических факторов [10, 11]. Негативное влияние части указанных факторов (неоднородные поля электродов и пространственного заряда пучка) может быть скомпенсировано соответствующим выбором конфигурации электрического и магнитного полей [11 – 13], но ряд факторов принципиально неустраним. К последним относятся шероховатости эмиттера и начальные тепловые скорости электронов, которые даже в приборах длинноволновой части миллиметрового диапазона ( $f = 24 - 30$  GHz) ограничивают, для сохранения устойчивости пучка, величину питч-фактора  $g$  значением порядка 1.5 – 1.7, а при переходе к частотам 140 – 170 ГГц и выше, достижимое значение  $g$  уменьшается до 1.1 – 1.2 и далее падает по мере увеличения частоты. С этой точки зрения представляет интерес исследование потенциальных возможностей неадиабатических систем, где условие (2) нарушается. Неадиабатическая схема ЭОС существенно снижает влияние как шероховатостей поверхности, так и тепловых скоростей на процесс формирования скоростного распределения и за счет этого способна, в принципе, обеспечить получение ВЭП с меньшим скоростным разбросом и увеличенным питч-фактором. Такие ЭОС могут формировать как однолучевые, так и многолучевые ВЭП и иметь как аксиально-симметричную, так и несимметричную структуру.

Неадиабатические ЭОС, кроме того, позволяют формировать моновинтовые электронные потоки, где все частицы вращаются вокруг оси симметрии прибора. Такой электронный пучок эффективно взаимодействует только с модами, у которых азимутальный индекс равен номеру циклотронной гармоники. Соответствующая разновидность МЦР получила название гиротронов с большой орбитой [14 – 16]. Для этих приборов наиболее перспективными представляются схемы с неадиабатическим реверсом магнитного поля [17 – 22], представляющие интерес как для гиротронов с большой орбитой, так и для мощных широкополосных гиро-ЛБВ.

Конфигурация электронно-оптической системы в значительной степени определяется необходимостью электронной селекции рабочего типа колебаний в условиях плотного спектра мод в пределах полосы циклотронного резонанса. При увеличении мощности гироприборов и переходе к рабочим модам все более высокого порядка, возможности электронной селекции в аксиально-симметричных резонаторах, открытых с торцов, постепенно исчерпываются. Дополнительно проредить спектр мод можно путем использования резонаторов, открытых в двух (продольном и поперечном) направлениях [23, 24]. В рамках этого подхода представляет интерес разработка так называемых планарных гиротронов с ленточным винтовым электронным пучком [25]. Соответственно необходим анализ, оптимизация и экспериментальное исследование ЭОС, позволяющих формировать ВЭП указанной геометрии. Очевидно, что подобные электронно-оптические системы не будут обладать аксиальной симметрией и имеют ряд специфических особенностей, которые должны учитываться при моделировании и оптимизации. Моделирования процесса формирования ВЭП в трехмерной постановке требует и задача оптимизации винтовых гиро-ЛБВ. Здесь

интересным представляется подход, основанный на так называемой мультипучковой электронной оптике [26 – 30], когда формируются несколько моновинтовых электронных пучков, каждый из которых далее поступает в свое пространство взаимодействия [31, 32]. Такие ВЭП могут быть сформированы и аксиально-симметричными МИП, но требуют секционированных эмиттеров. Соответственно, поля пространственного заряда оказываются зависящими и от азимутальной координаты, что опять приводит к необходимости оптимизации соответствующей ЭОС в трехмерной постановке.

Таким образом, рассмотрение большого числа вариантов перспективных систем формирования ВЭП, как адиабатических, так и неадиабатических, где формирующие поля могут иметь двумерную или трехмерную структуру, представляется одним из наиболее актуальных направлений дальнейшего совершенствования giroприборов.

### **Цель и задачи исследований**

Цель работы состоит в исследовании и оптимизации электронно-оптических систем формирования ВЭП для giroприборов с улучшенной селекцией рабочего типа колебаний и повышенной мощностью.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритмов и специализированных программ пред- и пост-обработки результатов, позволяющих проводить трехмерный анализ и оптимизацию как адиабатических, так и неадиабатических электронно-оптических систем формирования винтовых электронных пучков.

2. Исследование и оптимизация новых вариантов электронно-оптических систем, основанных на принципе неадиабатической инжекции электронного пучка под углом к магнитному полю. Разработка методики аналитической оценки основных параметров формирующих систем. Изучение однолучевых и многолучевых ЭОС, пригодных как для классических гиротронов, так и для гиротронов с многозеркальными резонаторами.

3. Разработка однолучевых и многолучевых адиабатических и неадиабатических электронно-оптических систем формирования ВЭП, пригодных для достижения высокой мощности и селективности рабочего типа колебаний в giro-ЛБВ с гофрированными винтовыми волноводами.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование особенностей формирования и оптимизация параметров винтовых пучков для планарных гиротронов мегаваттного уровня мощности.

**Научная новизна** работы. Все результаты, включенные в диссертацию, являются новыми и оригинальными, в частности:

1. Разработана методика численного моделирования систем формирования ВЭП произвольной геометрии, основанная на совместном использовании пакета CST Studio Suite [33] и специализированных программ пред- и пост-обработки, написанных на языке Python [34]. Пакет программ предназначен для задания геометрии эмиттера (или системы эмиттеров) произвольной формы, скоростного распределения стартующих частиц и получения по данным траекторного анализа

сведений об итоговом электронном потоке (геометрические параметры и скоростной разброс). Разработанные алгоритмы позволяют вычислять указанные параметры как для пучка в целом, так и отдельных его фракций, что упрощает анализ физики происходящих в ВЭП процессов и оптимизацию двумерных и трехмерных электронно-оптических систем формирования ВЭП. В разработанном пакете программ есть возможность переключаться на различные алгоритмы задания стартовых условий и обработки результатов траекторного анализа, специфичные для адиабатических или неадиабатических систем и учитывающие пространственную структуру пучка для аксиально-симметричной, плоской или трехмерной геометрии.

2. Получены аналитические оценки основных параметров (геометрия, режим работы, доля вращательной энергии электронного пучка) для неадиабатических систем формирования ВЭП, основанных на инъекции первоначально прямолинейного пучка под углом к магнитному полю. Проведена численная оптимизация таких систем. Показано, что при сохранении устойчивости пучка возможно одновременное снижение скоростного разброса и увеличение питч-фактора по сравнению с традиционными адиабатическими МИП. Предложены новые схемы трехмерных вариантов неадиабатических ЭОС, пригодные для многозеркальных и многоствольных гиротронов.

3. Изучены основные особенности формирования моновинтовых электронных пучков для гиро-ЛБВ, формируемых в неадиабатическом магнитном поле, имеющем область реверса. Проанализированы как низкопервеансные (микропервеанс  $P \sim 0.1$ ), так и высокопервеансные ( $P \sim 1$ ) ЭОС. Предложены подходы, позволяющие в значительной степени скомпенсировать негативное влияние сил пространственного заряда и реализовать ЭОС с качеством пучка, приемлемым для высокоэффективного взаимодействия с высокочастотным полем. Оптимизированные варианты неадиабатических ЭОС послужили основой для разработки гиро-ЛБВ с двухкаскадной схемой усиления [35], ориентированной на детальную радиолокацию объектов, удаленных вплоть до геостационарной орбиты.

4. Впервые разработана и исследована 10-лучевая адиабатическая МИП с секционированным эмиттером, предназначенная для мощной многоствольной гиро-ЛБВ. Предложены способы компенсации дрейфа частиц, вызванного азимутальной компонентой пространственного заряда, и снижения скоростного разброса в каждом из парциальных пучков.

5. Теоретически и экспериментально изучены адиабатические системы, формирующие планарные винтовые электронные пучки. Даны аналитические оценки деформации краевых зон электронного пучка при дрейфе электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Оценки согласуются с данными численного расчета. Аналитическая теория и методика численного моделирования ленточных ВЭП при учете основных факторов, влияющих на его качество, позволили создать электронно-оптическую систему планарного 140 ГГц гиротрона с мощностью электронного пучка 3 МВт. Экспериментальное исследование ленточного ВЭП показало хорошее соответствие расчетных и измеренных параметров пучка.

## **Научно-практическая значимость работы**

1. Методики численного анализа систем формирования винтовых электронных пучков при произвольной трехмерной геометрии электродов открывают возможность расчета и оптимизации новых вариантов систем формирования ВЭП, как адиабатических, так и неадиабатических, в частности, для многолучевых и планарных гиротронов.

2. Предложены и исследованы новые варианты неадиабатических систем формирования ВЭП для гироприборов, позволяющие существенно снизить разброс вращательных скоростей электронов и за счет этого повысить устойчивость ВЭП и КПД гиротронов. Ряд указанных ЭОС пригоден для использования в многозеркальных гиротронах с повышенной селективностью рабочего типа колебаний, а также в новых вариантах многоствольных гиротронов. Разработана 10-лучевая система формирования ВЭП, обеспечивающая приемлемые для реализации выходной мощности порядка 300–400 кВт параметры в многоствольной гиро-ЛБВ, предназначенной для дальней радиолокации высокого разрешения.

3. Разработаны неадиабатические электронно-оптические системы для двухкаскадного широкополосного гироусилителя  $W$ -диапазона с выходной мощностью в несколько сотен киловатт.

4. Теоретически и экспериментально показано, что планарные МИП могут формировать электронные пучки с параметрами приемлемыми для генерации мегаваттного уровня мощности в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанные алгоритмы трехмерного траекторного расчета ВЭП пригодны для анализа и оптимизации как адиабатических, так и неадиабатических систем формирования пучков сложной геометрии с учетом физических факторов, влияющих на скоростной разброс.

2. По сравнению с традиционными адиабатическими МИП, в неадиабатических системах формирования ВЭП с инъекцией прямолинейного пучка под углом к магнитному полю возможно значительное снижение разброса вращательных скоростей электронов и существенное повышение питч-фактора при сохранении устойчивости ВЭП. Предложенные системы могут быть использованы как в традиционных гиротронах с цилиндрическим резонатором, так и в многозеркальных и многоствольных гиротронах.

3. Разработанные для перспективных гиро-ЛБВ  $W$ -диапазона неадиабатические системы формирования ВЭП с реверсом магнитного поля позволяют формировать моновинтовые электронные пучки, одновременно обеспечивающие умеренный скоростной разброс, высокий питч-фактор и малое отклонению ведущего центра электронной орбиты от оси системы в случае как малых ( $P \sim 0.1$  мкпв), так и больших ( $P \sim 1$  мкпв) первеансов.

4. В многоствольной гиро-ЛБВ возможно использование адиабатической аксиально-симметричной МИП с секционированным эмиттером, формирующей 10 парциальных моновинтовых электронных пучков с круговым поперечным

сечением при питч-факторах 1.2-1.5 и скоростном разбросе не более 8%. Для реализации указанных параметров необходимо проводить профилирование поверхности катода и использовать эллиптические эмиттеры, повернутые относительно продольной оси прибора.

5. Планарная адиабатическая МИП позволяет формировать ленточный винтовой электронный пучок мультимегаваттного уровня мощности с параметрами, приемлемыми для реализации высокого КПД планарного гиротрона с поперечным выводом энергии.

### **Личный вклад автора**

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1 – A20], получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом исследовании возможностей создания новых электронно-оптических систем гироприборов, анализе и оптимизации параметров, а также в последующем трехмерном моделировании систем. Оригинальные численные коды, представленные в работе, написаны автором лично. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов совместных работ. Экспериментальные исследования проводились группой соавторов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

### **Апробация результатов и публикации.**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах, семинарах, конференциях:

- The 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz'2021), Chengdu, China, 2021.
- Международной Крымской конференции: СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо, 2015, 2017, 2018);
- II российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева (17–19 ноября 2015 г., Нижний Новгород),
- X Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (29 февраля — 3 марта 2016 г., Нижний Новгород);
- V, VII, X Всероссийской конференции Электроника и микроэлектроника СВЧ (Санкт-Петербург, 2016, 2018, 2021),
- XXII Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2017),
- XXXIV Международной научно-практической конференции (Москва, 2019),

Результаты диссертации использованы при выполнении НИР поддержанных грантами РФФИ № 18-32-00142, 16-02-00674, РНФ №16-19-10332, 18-19-00704.

Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах: из них 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, [A1 — A6], 13 работ в сборниках трудов конференций [A7 — A19], а также патент на изобретение [A20].

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка

цитированной литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая 42 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 95 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели диссертационной работы, отмечены научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** изложена методика численного моделирования ЭОС giroприборов в трехмерной постановке.

**П. 1.1** посвящен обзору основных тенденций в разработке новых электронно-оптических систем giroприборов. На данный момент возник новый класс задач, требующих решения проблемы формирования ВЭП в трехмерной постановке. В адиабатических системах появился интерес к формированию многолучевых (мультипучковых) потоков. В этом случае эмиттер традиционной аксиально-симметричной МИП делается секционированным по азимуту, что приводит к необходимости учитывать азимутальную компоненту электрического поля пространственного заряда пучка. Другим перспективным направлением развития адиабатических систем является разработка и анализ ЭОС, формирующих ленточные ВЭП – так называемые планарные МИП. Очевидно, что в силу краевых эффектов адекватное решение такой задачи возможно только в трехмерной постановке.

Что касается неадиабатических ЭОС, то здесь наибольшее внимание привлекают два класса систем, востребованных соответственно в гиротронах с большой орбитой, giro-ЛБВ и в классических либо многозеркальных гиротронах умеренной мощности: это ЭОС с реверсом магнитного поля для формирования моновинтового электронного пучка (ведущий центр находится на оси симметрии системы), либо ЭОС с инжекцией прямолинейного пучка под углом к магнитному полю. Последние системы могут быть как двумерными аксиально-симметричными (формируется классический поливинтовой ВЭП в рабочем пространстве), так и трехмерными (формирование нескольких парциальных пучков произвольной геометрии, что требуется, например, в многозеркальных гиротронах).

В **п. 1.2** описана методика трехмерного моделирования и изложены основные алгоритмы траекторного анализа. Методика базируется на использовании получившего в настоящее время широкое распространение программного комплекса CST Studio Suite [33] и дополнении его целым рядом специализированных программ пред- и пост-обработки. Специфика систем формирования ВЭП, как адиабатических, так и неадиабатических, требует отдельного задания стартовых условий для частиц, а также адекватного описания геометрии стартовой поверхности. Для удобства выполнения указанных операций создан специализированный модуль на языке Python [34], позволяющий импортировать соответствующие данные в программу CST Studio Suite. В частности, он позволяет по методике [36] учесть влияние тепловых скоростей и

шероховатостей эмиттера. Кроме того, он вычисляет положение точек старта частиц при произвольной геометрии эмиттера (эмиттеров).

Специфика процесса формирования ВЭП предъявляет свои требования и к методике обработки результатов, для того чтобы ускорить и сделать более наглядной оптимизацию ЭОС. Предусмотрены различные алгоритмы расчета скоростного разброса в пучке в зависимости от типа рассматриваемой системы (адиабатическая, неадиабатическая) и целей оптимизации (системы с малым или большим первеансом). Помимо информации об интегральных параметрах электронного потока программа пост-обработки вычисляет свойства парциальных пучков или отдельных фракций одиночного пучка.

В п. 1.3 для оценки точности разработанных алгоритмов было выполнено численное моделирование магнетронно-инжекторной пушки гиротрона, с микропервеансом 1.5. Рассматривалась ЭОС (рисунок 1), формирующая регулярно пересекающийся пучок, где существенную роль при формировании скоростного распределения играют как поле пространственного заряда пучка, так и тепловые скорости и шероховатости эмиттера. Сопоставление результатов расчетов, выполненных по широко используемой и многократно апробированной в ИПФ РАН при моделировании большинства ЭОС гиротронов двухмерной программе EPOS [22] и по изложенной выше методике траекторного анализа показало, что близкими оказываются не только величины питч-фактора и скоростного разброса, но и функции распределения по вращательным скоростям. Близкие значения расчетных параметров получаются и при анализе неадиабатических систем с инжекцией прямолинейного пучка под углом к магнитному полю (см. п.2.1).

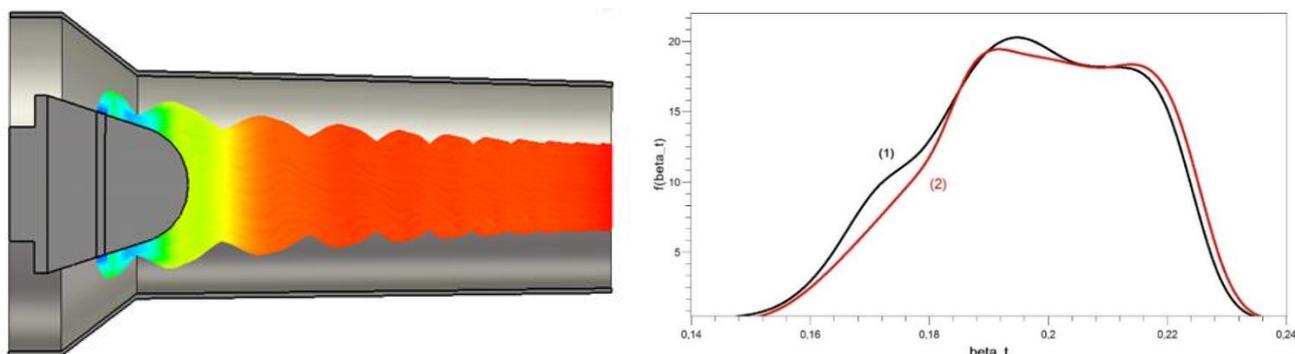


Рисунок 1 – Конфигурация МИП и функция распределения по осцилляторным скоростям. (1) программа EPOS, (2) CST Studio Suite с использованием разработанных программ пред- и пост-обработки

**Вторая глава** посвящена исследованию ряда новых неадиабатических систем формирования ВЭП как обладающих аксиальной симметрией, так и произвольной формы.

В п. 2.1 кратко изложен принцип формирования ВЭП в неадиабатических ЭОС с инжекцией пучка под углом  $\psi$  к магнитному полю (рисунок 2) и рассмотрены основные конфигурации электронных пушек, как с двумерными, так и трехмерными полями, пригодных для использования как в классических гиротронах, так и в многозеркальных, либо в многоствольных гиротронах.

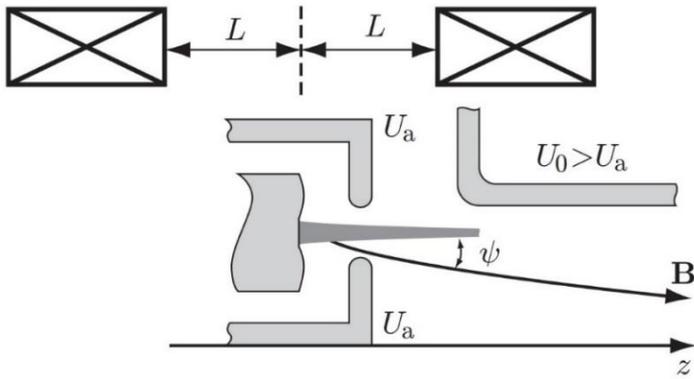


Рисунок 2 – Простейший вариант аксиально-симметричной ЭОС с инъекцией прямолинейного пучка под углом к магнитному полю

В п.2.2 из теоремы Буша, закона сохранения энергии и сохранения поперечного адиабатического инварианта после области первичного формирования осцилляторной скорости получены оценки основных геометрических параметров и режима работы неадиабатической ЭОС. Доля вращательной энергии электронов, разогнанных до скорости  $(2\eta U_a)^{1/2}$ , может быть оценена как

$$t_{\perp} = \frac{2\eta U_a \alpha \sin^2 \psi}{2\eta U_0} = \alpha \sin^2 \psi \frac{U_a}{U_0} \quad (3)$$

а средний радиус электронного пучка в резонаторе

$$R_k = \frac{R_0}{\sqrt{\alpha}} \quad (4)$$

Здесь  $\alpha = \frac{B_0}{B_k}$  – степень компрессии магнитного поля. Оценки могут быть использованы как для аксиально-симметричных систем, так и систем, где геометрия электродов не является аксиально-симметричной.

В п.2.3 на основе оценок п.2.2 выполнен синтез и последующая оптимизация геометрии неадиабатической ЭОС для технологического гиротрона на второй циклотронной гармонике с рабочей частотой 24 ГГц и ускоряющим напряжением 15 кВ. Показано, что, несмотря на большое значение параметра пространственного заряда  $t_j = I/I_L \sim 0.2 - 0.5$ , разброс осцилляторных скоростей составил 14 %, что в 1.5–2 раза меньше, чем в МИП при том же  $t_j$ . В результате удается достичь  $g = 2$  без отражения электронов магнитным зеркалом. Выявлены основные причины возникновения скоростного разброса.

В п.2.4 выполнен предварительный анализ ЭОС, пригодных для формирования ВЭП в многозеркальных и многоствольных гиротронах. Достоинством смоделированной ЭОС для двухзеркального гиротрона является более простая схема крепления и юстировки первого анода, поскольку в этом случае внутренняя и внешняя часть анода представляют собой единую деталь (рисунок 3), и отсутствует внутренний анод в виде «шляпки», прикрепленной к длинной тонкой шпильке (рисунок 2). Показано, что по сравнению с аксиально-симметричной системой, в ЭОС с секторной эмиссией разброс скоростей может существенно возрасти. Для его снижения целесообразно удалять края секторов от краев щели на расстояние порядка ширины щели. В ЭОС, предназначенной для формирования многоствольного ВЭП существенное влияние на скоростной

разброс, дополнительно оказывают неадиабатические поля, возникающие в области круговых вырезов для пропуска парциальных пучков через первый анод.

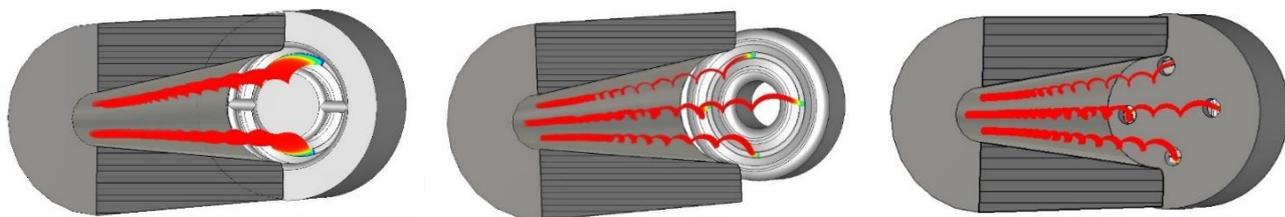


Рисунок 3 – Принципиальная схема формирования ВЭП для 2-зеркального гиротрона (слева) и для 4-ствольного гиротрона (справа)

**Третья глава** посвящена анализу электронно-оптических систем гиро-ЛБВ. В настоящее время перспективными вариантами таких приборов считаются гиро-ЛБВ с одним или несколькими моновинтовыми ВЭП, где каждый из моновинтовых электронных пучков вращается вокруг оси спиралевидного гофрированного волновода (ведущий центр располагается на оси волновода).

В п.3.1 проанализированы возможности формирования однолучевых ВЭП в неадиабатической системе с реверсом магнитного поля как для низкоперевансных (40 кВ, 0.5 А,  $P=0.1$  мкВт), так и высокоперевансных (80-100 кВ, 16 А,  $P=1$  мкВт) систем, предназначенных для использования в усилительном каскаде из двух гиро-ЛБВ, работающих в W-диапазоне (90-100 ГГц) при полосе перестройки 8 ГГц и выходной мощности до 350 кВт. Предварительные оценки соответствующих ЭОС выполнены по модели с мгновенным реверсом магнитного поля и дальнейшей адиабатической компрессией пучка на основе теоремы Буша, законов сохранения энергии и адиабатического инварианта. Численная оптимизация проводилась в рамках двумерной аксиально-симметричной модели ВЭП с нулевыми начальными скоростями электронов, поскольку первоначально ЭОС формирует прямолинейный пучок. Следует отметить, что по сравнению с МИП задача усложняется ограничением на малое (в масштабе ларморовского радиуса) отклонение ведущего центра  $\Delta R_0$  от оси системы.

Показано, что одним из важных параметров, определяющих влияние сил пространственного заряда как на скоростной разброс  $\delta v_{\perp}$ , так и на смещение ведущего центра является величина жесткости магнитной фокусировки  $F = (\omega_p / \omega_c)^2$ , где  $\omega_p$  и  $\omega_c$  - соответственно плазменная и циклотронная частоты, вычисленные в заданном поперечном сечении пучка. Для снижения  $F$  формировался большой градиент магнитного поля в диодной части пушки перед входом пучка в канал транспортировки. Дополнительное снижение  $\Delta R_0$ , реализовывалось за счет магнитного сопровождения пучка: в процессе оптимизации профили катода и анода электронной пушки подбирались так, чтобы после области реверса на входе в канал транспортировки электронные траектории были параллельны ведущим силовым линиям магнитного поля. В результате для низкоперевансной системы удалось обеспечить снижение фактора  $F$  с 3 в области эмиттера до 0.1 при входе в канал транспортировки и за счет этого реализовать ВЭП, в котором при компрессии электронного пучка около 2000 питч-фактор

$g = 1.2 - 1.5$ , скоростной разброс не превышает 3 %, а отклонение  $\Delta R_0$  в 3 раза меньше ларморовского радиуса.

Оптимизация высокоперевансной ЭОС является существенно более сложной задачей, поскольку здесь величина  $F$  в области эмиттера, в зависимости от его радиуса  $R_k$ , может достигать до 200. Увеличение  $R_k$ , помимо увеличения  $F$ , приводит к снижению  $V_k$  до уровня, сопоставимого с магнитным полем Земли. В результате было принято решение ограничиться вариантом  $R_k = 12.8$  мм, где  $F$  уменьшается до 70, а магнитное поле на катоде  $B_k$  еще остается приемлемым ( $B_k = -2.6$  мТл). Для снижения возмущающего действия сил пространственного заряда целесообразно увеличить ускоряющее напряжение до  $U_0 = 100$  кВ, а величину тока уменьшить до 13 А, сохранив таким образом мощность пучка неизменной. Как показали расчеты, при больших перевансах ВЭП существует оптимальное значение градиента магнитного поля  $\nabla B$ , которое одновременно обеспечивает допустимую жесткость фокусировки и магнитное сопровождение пучка. Но даже при оптимальном  $\nabla B$  для компенсации сил пространственного заряда, в отличие от случая  $P=0.1$  мкпв, необходимо использовать эмиттер более сложной формы с профилем в виде части дуги окружности. В этом случае удастся сформировать пучок с током до 13 А при пич-факторе 1.3 – 1.5, скоростном разбросе менее 10 % и полном отсутствии отраженных от магнитного зеркала электронов. Отклонение ведущего центра от оси в этом случае оказывается сопоставимым с ларморовским радиусом.

В п.3.2 рассмотрены особенности формирования многоствольных ВЭП для гиро-ЛБВ в адиабатических системах с секционированным эмиттером. На принципиальную возможность реализации таких схем в гироприборах указывалось еще в работах [29 – 32]. Однако, специфика оптимизации и возможность получения удовлетворительных параметров ВЭП в таких системах исследованы не были. Ниже такой анализ проведен на примере ЭОС для 10-ти ствольной гиро-ЛБВ на второй гармонике гирочастоты работающей в W-диапазоне, с винтовой гофрировкой каждого из 10 волноводов, ускоряющим напряжением 80 кВ и суммарным током всех 10 лучей 16 А ( $P=0.8$  мкпв). Гиро-ЛБВ предназначена для получения выходной мощности 350 кВт на частоте 95 ГГц. Здесь каждый из 10 лучей совершает вращение с циклотронной частотой вокруг оси своего волновода.

Оптимизация рассматриваемой ЭОС, несмотря на адиабатичность формирующих полей, представляет собой сложную и нетривиальную задачу вследствие жестких ограничений [37] на параметры каждого электронного луча, входящего в соответствующий гофрированный волновод. Пучок необходимо провести очень близко к стенкам волновода, обеспечить малое смещение ведущих центров электронных орбит с оси волновода и в тоже время малый коэффициент заполнения эмиссионной поверхности катода: отношение суммарной площади парциальных эмиттеров к общей площади эмиссионного кольца, на котором они расположены, порядка 0.2 [37], что приводит к необходимости использовать плотность тока вдвое большую, чем в типичных аксиально-симметричных МИП. Соответственно, резко возрастают возмущения скоростного распределения

силами пространственного заряда. Задача усложняется и вследствие появления азимутальной компоненты поля пространственного заряда.

Оптимизация МИП проводилась в два этапа. На первом этапе рассматривалась задача оптимизации аксиально-симметричной МИП с током пучка 80 А ( $80\text{А} \cdot 0.2 = 16\text{ А}$ , плотность тока  $7\text{ А/см}^2$ ). Здесь для снижения роли пространственного заряда пучка и более гибкого управления его параметрами использовалась триодная конфигурация МИП, а сам катод выполнялся профилированным с особой точкой электрического поля  $E \rightarrow 0$  для минимизации скоростного разброса в диапазоне рабочих токов пучка. Далее выполнялось трехмерное численное моделирование с той же плотностью тока, что и в аксиально-симметричной системе и током 16 А при эллиптической форме каждого парциального эмиттера. В этом случае, согласно расчетным данным, весьма существенную роль играет азимутальный дрейф электронов в скрещенных полях, приводящий к двум эффектам: во-первых, происходит поворот по азимуту всего парциального пучка как целого на угол порядка  $\pi/4$  относительно его стартового положения, что необходимо учитывать при размещении системы гофрированных волноводов; во-вторых, возникает неоднородный азимутальный дрейф частиц внутри каждого парциального пучка. Последний фактор ведет к искажению поперечного сечения пучка в рабочем пространстве по сравнению с требуемым круговым сечением и перехвату значительной части электронов стенками гофрированного волновода. Для подробного анализа указанного эффекта была написана специальная программа, позволявшая ставить «метку» на каждую стартующую с катода частицу и находить какие частицы выходят за предельно допустимый поперечный размер. Анализ этой информации позволил предложить способ подавления нежелательного дрейфа, основанный на наклоне продольной оси эллипса на некоторый угол  $\beta$  ( $\beta \sim 11^\circ$ ) относительно продольной оси прибора.

В результате удалось найти конфигурацию электродов и парциальных эмиттеров (рисунок 4), обеспечивающих формирование 10-ти лучевого ВЭП с током 16 А (мощность пучка 1.3 МВт) при пич-факторе 1.2 – 1.5, скоростном разбросе в каждом из лучей 8% при круговом поперечном сечении каждого луча и отсутствии токоперехвата на стенки гофрированных волноводов.

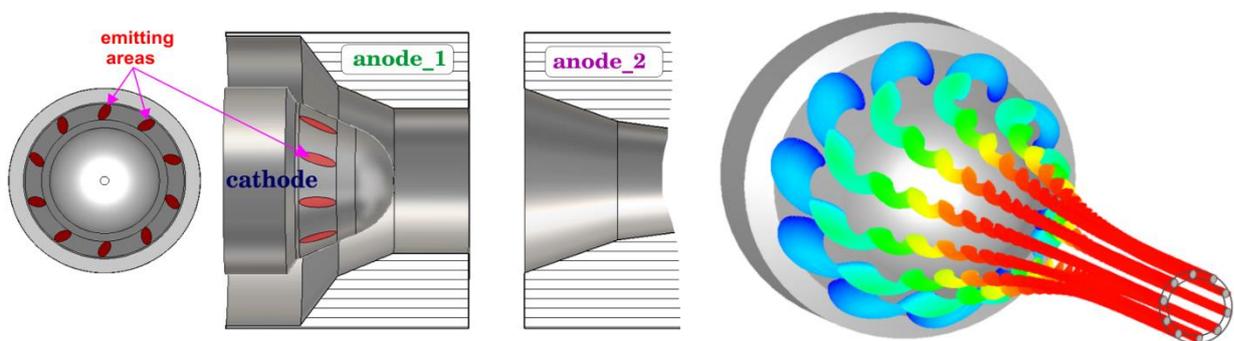


Рисунок 4 – Геометрия 10-ти ствольной МИП

**В четвертой главе** анализируются адиабатические МИП, предназначенные для формирования интенсивных ленточных ВЭП.

В п.4.1 для предварительной оценки параметров планарной МИП, использовано большинство формул, используемых в аналитической теории аксиально-симметричных МИП [9, 24]. Отличия заключаются в учете специфической формы эмиттера (прямоугольник) и необходимости располагать центр эмиттера в плоскости симметрии магнитного поля.

Отдельное внимание было уделено оценке искажения формы поперечного сечения электронного пучка, по сравнению с требуемой для эффективного взаимодействия с высокочастотным полем вследствие дрейфа частиц в краевых электрическом и магнитном полях. Вычисляя дрейфовую скорость частицы и время прохождения ею области скрещенных полей, можно показать, что в рабочем пространстве гиротрона относительное смещение краев пучка  $\Delta y$  в рабочем пространстве, измеренное в долях длины волны  $\lambda$

$$\frac{\Delta y_0}{\lambda} = \frac{4}{9\pi^2} K t_j \frac{\sqrt{2\eta U_a} L_\xi}{c D} \sqrt{\alpha} \quad (5)$$

где  $K = \sum_{n=0}^m \frac{1}{2n+1}$ .

Здесь

$$m = \frac{L_x}{L_\xi \sin \varphi} \quad (6)$$

где  $\varphi$  - угол наклона магнитного поля к поверхности эмиттера,  $L_\xi$  – ширина прямоугольного эмиттера по короткой стороне, а  $L_x$  – по длинной. Последующий траекторный анализ показал, что полученная аналитическая оценка дает ошибку порядка 10 %, что вполне приемлемо с практической точки зрения.

**П.4.2** посвящен анализу и оптимизации планарной МИП, формирующей пучок с мощностью 3 МВт (ток пучка 30 А, ускоряющее напряжением 100 кВ) в магнитном поле 5.6 Тл ( $\lambda \sim 2$  мм). Угол  $\varphi$  выбирался равным  $26^\circ$  для гарантированного формирования ламинарного ВЭП в прикатодной области пушки, что обеспечивает пониженное влияние сил пространственного заряда как на уменьшение пич-фактора, так и на увеличение разброса вращательных скоростей.

Спецификой планарных МИП является дрейф электронов в скрещенных полях, приводящий как к неоднородной (вдоль  $x$ ) экранировке электрического поля вдоль эмиттера и соответствующему увеличению разброса скоростей, так и отличию формы пучка от прямоугольной. Все отмеченные выше факторы учитывались в процессе оптимизации.

Показано, что для снижения позиционного скоростного разброса и разброса, вызванного полем пространственного заряда необходимо профилировать анод так, чтобы зазор анод—катод на краях эмиттера был несимметричным (в представленном примере для выбранного направления магнитного поля и соответствующего вращения электронов поле  $E$  на левом краю больше, чем в центральной части эмиттера, а на правом — меньше). Помимо этого, необходимо профилирование формы катода таким образом, чтобы позади эмиттера

образовывалась линия с особенностью электрического поля  $E \rightarrow 0$ , а поле на поверхности эмиттера монотонно возрастало как функция  $z$  в «холодном» режиме ( $\partial E / \partial z > 0$ ). Оптимизация в рамках упрощенной модели без учета шероховатостей эмиттера и начальных скоростей электронов позволила получить как умеренную величину  $\delta v_{\perp}$ , так и малое искажение формы пучка по сравнению с прямоугольной во всем диапазоне рабочих токов (рисунок 5).

На второй стадии оптимизации окончательные параметры пучка определялись с учетом действия шероховатостей эмитирующей поверхности и тепловых скоростей электронов. Согласно результатам численного моделирования, как функция распределения для всего пучка, так и распределения для отдельных фракций, стартующих из середины или краев эмиттера, остаются близкими к гауссовой, что свидетельствует об устойчивости формируемого ВЭП.

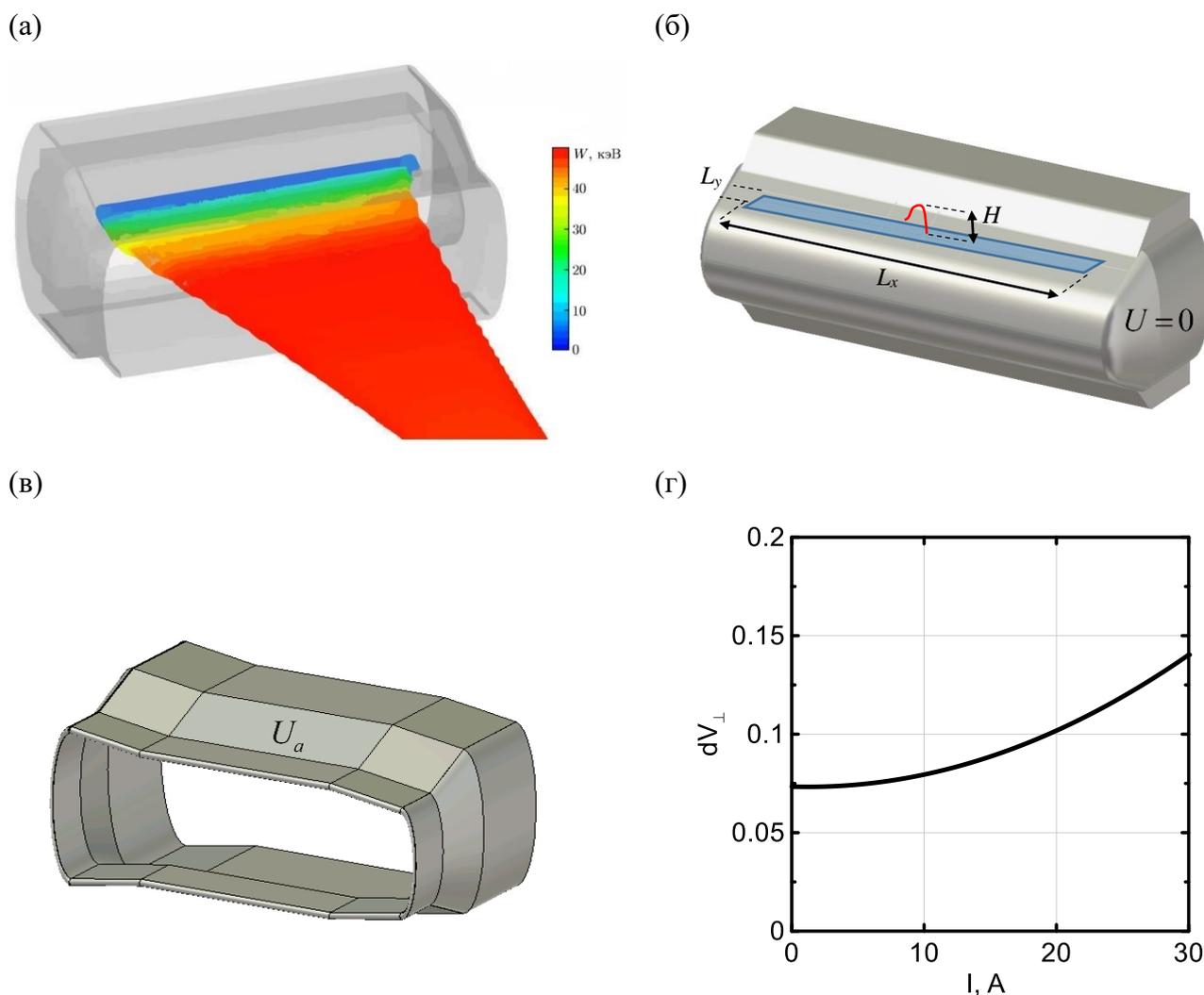


Рисунок 5 – (а) Схема прикатодной области планарной магнетронно-инжекционной пушки (МИП). Показаны найденные в рамках трехмерного моделирования траектории электронного пучка. (б) Катод, на котором расположен эмиттер, с которого стартует ленточный винтовой электронный пучок (ВЭП); (в) форма анода, (г) зависимость скоростного разброса от тока

**П.4.3** посвящен изложению данных экспериментальных измерений характеристик ВЭП, сформированного описанной в п.4.2 электронной пушкой. На первом этапе проводилось пиromетрирование катода, показавшее хорошую

температурную однородность в пределах эмиттера и в то же время его хорошую термоизоляцию от прилегающих частей катода: разница температур между эмиттером и окружающими его частями катода превышает 300–400°. Это позволяет существенно увеличить время жизни катода и уменьшить мощность подогревателя. Экспериментально показано, что высокотемпературный ( $T=1500^{\circ}\text{C}$ ) гексаборид-лантановый ( $\text{LaB}_6$ ) катод обеспечивает плотность тока  $3 \text{ A}/\text{cm}^2$  при мощности подогревателя около 800 Вт, что близко к характеристикам наиболее удачных аксиально-симметричных МИП большого диаметра.

Измерения питч-фактора пучка и скоростного разброса проводились методом тормозящего поля по кривой отсечки коллекторного тока анализатора в моделирующем режиме [12] (коэффициент моделирования по напряжению –  $U/U_{\text{mod}} = 10$ ). Результаты измерений подтвердили приемлемые для обеспечения выходной мощности порядка 1 МВт параметры электронного пучка и их хорошее соответствие данным теоретического расчета (рисунок 6).

а)



б)

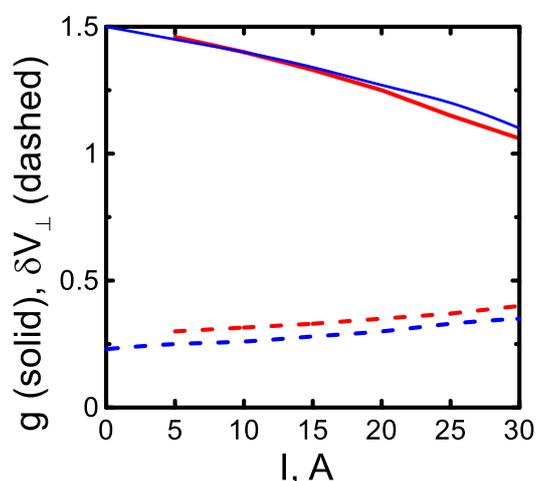


Рисунок 6 – Фото катода в процессе пирометрирования (а); экспериментальные (красные) и расчетные (синие) зависимости параметров от тока пучка (б)

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Развита основанная на использовании программы CST Studio Suite методика численного анализа адиабатических и неадиабатических систем формирования винтовых электронных пучков для новых разновидностей giroприборов при произвольной трехмерной геометрии электродов электронной пушки. Разработаны соответствующие алгоритмы и программы пред- и пост-обработки результатов траекторного анализа с пользовательским интерфейсом, позволяющим задавать исходные данные и обрабатывать результаты моделирования.

2. Предложены и проанализированы новые варианты неадиабатических систем формирования ВЭП, основанные на принципе инъекции прямолинейного электронного пучка под углом к магнитному полю для придания частицам первоначальной вращательной скорости. Показано, что при умеренных значениях тока ВЭП (несколько ампер) такие системы обеспечивают в 1.5–2 раза меньшие,

по сравнению с адиабатическими МИП, значения скоростного разброса, вследствие чего их питч-фактор может быть увеличен до 1.8–2 при сохранении устойчивости пучка.

3. Разработаны и оптимизированы неадиабатические электронно-оптические системы с реверсом магнитного поля, формирующие моновинтовые электронные пучки с разной, отличающейся на порядок, величиной первеанса (0.1 и 1 мкпв). Оптимизированные ЭОС, обеспечивающие значения питч-фактора 1.2–1.5 при величине скоростного разброса не более 10%, предназначены для усилительного каскада, включающего две винтовые гиро-ЛБВ. При этом удается добиться величин отклонения ведущих центров электронных орбит от оси приборов, не оказывающих существенного влияния на возбуждение рабочей моды.

4. Предложена и проанализирована 10-пучковая адиабатическая МИП с секционированным эмиттером для мощной гиро-ЛБВ W-диапазона. Для снижения скоростного разброса использован профилированный катод, где в области за эмиттером реализуется особая точка с напряженностью электрического поля стремящейся к нулю. Показано, что в мультипучковой МИП принципиально необходим учет азимутального дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, приводящий к двум эффектам – повороту каждого парциального пучка и искажению его поперечного сечения по сравнению с окружностью. Для компенсации указанного эффекта необходимо каждый эллиптический парциальный эмиттер поворачивать относительно продольной оси прибора.

5. Теоретически и экспериментально исследована адиабатическая МИП, формирующая мощный (3 МВт) ленточный ВЭП, предназначенный для использования в планарном гиротроне с рабочей частотой 140 ГГц с поперечным выводом СВЧ излучения. Показано, что влияние сил пространственного заряда на скоростной разброс может быть скомпенсировано за счет профилирования электродов ЭОС. Найдена геометрия электродов, обеспечивающая малое искажение формы пучка, значения питч-факторов порядка 1.2–1.3 и скоростной разброс менее 25%. Измерения параметров пучка методом тормозящего электрического поля продемонстрировали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Samsonov, S. V. Multitube helical-waveguide gyrotron traveling-wave amplifier: device concept and electron-optical system modeling / S. V. Samsonov, **К. А. Лещева**, V. N. Manuilov // IEEE Trans. Electron Devices. – 2020. – Vol. 67, No. 8. – P.3385 – 3390.

A2. Manuilov, V. N. Cusp guns for helical-waveguide gyro-TWTs of a high-gain high-power W-band amplifier cascade / V. N. Manuilov, S. V. Samsonov, S. V. Mishakin, A. V. Klimov, **К. А. Лещева** // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. – 2018. – Vol. 39, No. 9. – P. 447 – 455.

A3. Гольденберг, А. Л. Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона / А. Л. Гольденберг, М.Ю. Глявин, В. Н. Мануилов, **К. А. Лещева** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, №. 5. – P. 442 – 448.

A4. Мануилов, В. Н. Оптимизация магнетронно-инжекторной пушки для мощного планарного гиротрона миллиметрового диапазона длин волн / В. Н. Мануилов, В. Ю. Заславский, А. Н. Куфтин, **К. А. Лещева** // Изв. вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 253 – 264.

A5. **Лещева, К. А.** Численное 3D-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков гироприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии / К. А. Лещева, В. Н. Мануилов // Успехи прикладной физики. – 2019. – Т. 7. № 3. – С. 298 – 308.

A6. Гольденберг, А. Л. Влияние неоднородности эмиссии на качество винтовых пучков, формируемых неадиабатическими электронно-оптическими системами гироприборов / А. Л. Гольденберг, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов // Прикладная физика. – 2020. – № 4. – С. 40 – 44.

A7. Кунцевич, А. Д. Численное моделирование магнетронно-инжекторных пушек гиротронов с нарушением азимутальной симметрии плотности тока эмиссии / А. Д. Кунцевич, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов // «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015)». Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции. – Севастополь, 2015. – С. 193–194.

A8. Гольденберг, А. Л. Неадиабатическая электронно-оптическая система технологического гиротрона / А. Л. Гольденберг, М. Ю. Глявин, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов // «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение». Сборник трудов II российско-белорусской научно-технической конференции им. О. В. Лосева. – Нижний Новгород, 2015. – С.268 – 270.

A9. **Лещева, К. А.** Магнетронно-инжекторные пушки для гиротронов с эллиптическими и двухзеркальными резонаторами / К. А. Лещева, А. Д. Кунцевич, В. Н. Мануилов // «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение». Сборник трудов II российско-белорусской научно-технической конференции им. О. В. Лосева. – Нижний Новгород, 2015. – С. 261–263.

A10. **Лещева, К. А.** 3-D моделирование возмущения скоростного распределения в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов с нарушенной аксиальной симметрией / К. А. Лещева, И. Е. Уткина, В. Н. Мануилов // Тезисы

докладов X Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. – Нижний Новгород, 2016. – С.70–71

A11. Гольденберг, А. Л. Параметры винтового электронного пучка, формируемого в неадиабатической электронной пушке гиротрона / А. Л. Гольденберг, М. Ю. Глявин, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов, И. Е. Уткина // «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник статей V Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 215–217.

A12. **Лещева, К. А.** Неадиабатические электронно-оптические системы гиротронов / К. А. Лещева // XXII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. – Княгинино, 2017. – С. 55–56.

A13. **Лещева, К. А.** 3-D Моделирование влияния азимутальной несимметрии плотности тока эмиссии на параметры электронного пучка субтерагерцового гиротрона / К. А. Лещева, В. Н. Мануилов // «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017)». Материалы докладов 27-й Международной Крымской конференции. – Севастополь, 2017. – С. 271–275.

A14. Уткина, И. Е. Методика компьютерного моделирования трехмерных возмущений геометрии и распределения плотности объемного заряда в магнетронно-инжекторных пушках гиротронов / И. Е. Уткина, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов // «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник статей VII Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 630–632.

A15. **Лещева, К. А.** Численное моделирование и анализ параметров магнетронно-инжекторных пушек гиротронов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии / К. А. Лещева, В. Н. Мануилов // «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2018)». Материалы докладов 28-й Международной Крымской конференции. – Севастополь, 2018. – С. 1124–1130.

A16. Уткина, И. Е. Методика компьютерного моделирования трехмерных возмущений геометрии и распределения плотности объемного заряда в неадиабатических магнетронно-инжекторных пушках гиротронов / И. Е. Уткина, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов // «Научный форум: технические и физико-математические науки». Сборник статей по материалам XXXIV международной научно-практической конференции. – Москва, 2019. – С. 14–18.

A17. **Leshcheva, K. A.** Three-dimensional nonadiabatic electron-optical gyrotron systems with inhomogeneous current density / K. A. Leshcheva, V. N. Manuilov, A. L. Goldenberg // ITM Web of Conferences.– 2019. – Vol. 30. – Art. no. 09003.

A18. Гольденберг, А. Л. Проект электронно-оптической системы неадиабатической магнетронно-инжекторной пушки для гиротрона с частотой излучения 24 ГГц / А. Л. Гольденберг, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов, М. Д. Проявин // «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник статей X Всероссийской конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 257–261.

A19. Zaslavsky, V. Novel Magnetron-injection gun forming ribbon helical electron beam for terahertz gyrotrons of megawatt power level / V. Zaslavsky, V. Manuilov, A. Kuftin, A. Klimov, **K. Leshcheva** // The 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz'2021). – Chengdu, China, 2021. – P. 1–2.

A20. Патент: 2765773. Российская Федерация. МПК H01J23/06 H01J25/00 . Неадиабатическая электронная пушка для мазера на циклотронном резонансе / М. Ю. Глявин, А. Л. Гольденберг, **К. А. Лещева**, В. Н. Мануилов, М. Д. Проявин, Е. А. Солуянова, Е. М Тай; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН). – № 2021116212; заявл. 03.06.2021; опубл. 02.02.2022, Бюл. № 4

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапонов, А. В. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике / А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1967. – Т. 10, № 9–10. – С. 1414 – 1453.
2. Flyagin, V. A. The gyrotron / V. A. Flyagin [et al.] // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1977. – Vol. 25, No. 6. – P. 514–521.
3. Братман, В. Л. Циклотронные и синхротронные мазеры / В. Л. Братман [и др.] // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР. – 1979. – Вып. 1. – С. 157–216.
4. Bratman, V. L. Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers / V. L. Bratman [et al.] // Int. J. Electron. – 1981. – Vol. 51. – P. 541-567.
5. Thumm, M. K. A. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive / M. K. A. Thumm [et al.] // Nucl. Fusion. – 2019. – Vol. 59, No.7. – P. 073001.
6. Thumm, M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices and Free Electron Masers/ M. Thumm // J. Infrared Milli Terahz Waves. – 2020. – V. 41. – P. 1–140.
7. Nusinovich, G. Introduction to the physics of gyrotrons / G. Nusinovich – Baltimore, MD, USA: The Johns Hopkins Univ. Press, 2004. – 352 p.
8. Ергаков, В. С. Влияние разброса скоростей электронов на характеристики гиротрона / В. С. Ергаков, М. А. Моисеев, Р. Э. Эрм // Электронная техника, Электроника СВЧ. – 1980. – № 3. – С.20
9. Tsimring, Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics / Sh. E. Tsimring. – Hoboken, New Jersey: Wiley Interscience, 2007. – 573 p.
10. Goldenberg, A. L. Formation of helical electron beams in adiabatic gun/ A. L. Goldenberg, M. I. Petelin // Radiophys. QuantumElectron. – 1973. – Vol. 16, No. 1. – P.106-111.
11. Цимринг, Ш. Е. О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках / Ш. Е. Цимринг // Изв. вузов. Радиофизика. – 1972. – Т. 15, № 8. – С. 1247–1258.
12. Авдошин, Е. Г. Экспериментальное исследование адиабатических электронных пушек МЦР/ Е. Г. Авдошин, А. Л. Гольденберг // Изв. вузов. Радиофизика. – 1973. – Т.16, №10. – С.1605–1612.
13. Krivosheev, P. V. Numerical simulation models of forming systems of intense gyrotron helical electron beams / P. V. Krivosheev [et al.] // Int. J. Infrared Millim. Waves. – 2001. – Vol. 22, No. 8. – P. 1119 – 1146.
14. Idehara, T. Electron gun for powerful large orbit gyrotron / T. Idehara [et al.] // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2004. – Vol. 25, No. 1. – P. 3–14
15. Bratman, V. L. Large orbit gyrotron operation in the terahertz frequency range / V. L. Bratman, Y. K. Kalynov, V. N. Manuilov // Physical Review Letters. – 2009. – Vol.102, No. 24. – P. 245101
16. Du, C. H. Development of a magnetic cusp gun for terahertz harmonic gyrodevices / C. H. Du [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2012. – Vol. 59, No. 12. – P. 3635-3640.

17. Rhee, M. J. Relativistic electron dynamics in a cusped magnetic field / M. J. Rhee, W. W. Destler // *Phys. Fluids*. – 1974. – Vol. 17, No. 8. – P.1574–1581.
18. Gallagher, D. A. High-power cusp gun for harmonic gyro-device applications / D. A. Gallagher [et al.] // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* – 2000. – Vol. 28, No. 3. – P. 695 – 699.
19. Donaldson, C. R. Design and numerical optimization of a cusp-gun-based electron beam for millimeter-wave gyro-devices / C. R. Donaldson [et al.] // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2009. – Vol. 37, No. 11. – P. 2153 – 2157.
20. Donaldson, C. R. A cusp electron gun for millimeter wave gyrodevices / C. R. Donaldson [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 96, No. 16. – P. 141501
21. Sabchevski, S. Computer simulation of axis-encircling beams generated by an electron gun with a permanent magnet system/ S. Sabchevski [et al.] // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*. – 2000. – Vol. 21, No. 8. – P.1191–1209.
22. Bratman, V. L. Electron-optical system for a large-orbit gyrotron / V. L. Bratman [et al.] // *Technical Physics*. – 2005. – Vol. 50, No. 2. – P. 1611–1616.
23. Гинзбург, Н. С. Субмиллиметровые планарные гиротроны с поперечным дифракционным выводом излучения / Н. С. Гинзбург [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2011. – Т. 37. № 2. – С. 62–70.
24. Ginzburg, N. S. High-power terahertz-range planar gyrotrons with transverse energy extraction / N. S. Ginzburg [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – V. 108, – P. 105101.
25. Manuilov, V. N. Electron-optical systems for planar gyrotrons/ V. N. Manuilov [et al.] // *Physics of Plasmas*. – 2014. – V. 21. – P. 023106.
26. Boyd, M. R. The multiple-beam klystron / M. R. Boyd [et al.] // *IRE Trans. Electron Devices*. – 1962. – Vol. 9, No. 3. – P. 247-252.
27. Gelvich, E. A. The new generation of high-power multiple-beam klystrons/ E. A. Gelvich [et al.] // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. – 1993. – Vol. 41, No. 1. – P. 15-19.
28. Freydovich, I. A. A variable high-power multi-beam klystron design / I. A. Freydovich [et al.] // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. – 2005. – Vol. 539, No. 1–2. – P. 63-73.
29. Zapevalov, V. E. Multibarrel gyrotrons / V. E. Zapevalov, A. S. Zuev, A. N. Kuftin // *Radiophys Quantum Electron*. – 2020. – Vol. 63, No 2. – P. 97–105.
30. Патент: 2755826. Российская Федерация. МПК H01J23/06. Многоствольный гиротрон / Запевалов В. Е., Зуев А. С.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук" (ИПФ РАН). – №2021102698; заявл. 04.02.2021; опубл. 22.09.2021; Бюл. № 27
31. Grigoriev, A. D. O-type microwave devices / A. D. Grigoriev, V. A. Ivanov, S. I. Molokovsky // *Microwave Electronics, Springer Series in Advanced Microelectronics*. Springer, Cham. – 2018. – Vol. 61. – P.109-202.
32. Palmer, R. B. The cluster klystron demonstration experiment / R. B. Palmer [et al.] // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. – 1995. – Vol. 366, No. 1. – P. 1-16.
33. CST Studio Suite [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

34. Python Software Foundation [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [www.python.org](http://www.python.org)
35. Samsonov, S. V. Cascade of Two W -Band Helical-Waveguide Gyro-TWTs With High Gain and Output Power: Concept and Modeling / S. V. Samsonov [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2017. – Vol. 64, No. 3. – P. 1305 - 1309.
36. Lygin, V. K. Numerical simulation of intense helical electron beams with the calculation of the velocity distribution functions / V. K. Lygin // Int. J. of Infrared and MM waves. – 1995. – Vol. 16, No. 2. – P. 363-376.
37. Samsonov, S. V. Ka-band gyrotron traveling-wave tubes with the highest continuous-wave and average power / S. V. Samsonov [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No. 12. – P.4264–4267.