

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Лещевой Ксении Александровны **«Развитие методов формирования винтовых электронных пучков для новых разновидностей giroприборов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.5 – Физическая электроника**

Создание новых мощных источников электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн продолжает оставаться приоритетной задачей электроники СВЧ. При этом одной из сложных и нетривиальных проблем является разработка соответствующих электронно-оптических систем (ЭОС), которые должны обеспечивать как оптимальную с точки зрения эффективного взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем функцию распределения электронов по скоростям, так и форму пучка. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн среди СВЧ генераторов и усилителей несомненными лидерами как по достигнутой частоте, так и по мощности являются гирорезонансные приборы, в которых в качестве активной среды (источника энергии электромагнитного излучения) используются винтовые электронные пучки – ВЭП. Последние, как правило, формируются аксиально-симметричными магнетронно-инжекторными пушками (МИП). Аксиальная симметрия ВЭП в МИП, наряду с наличием достаточно большого разброса вращательных скоростей, ограничивают возможности селективного возбуждения рабочего типа колебаний при больших уровнях мощности или переходе в субмиллиметровый диапазон. Недавние теоретические работы показывают, что преодолеть указанное ограничение можно при использовании новых, принципиально трехмерных, типов электродинамических систем. Соответственно, реализация таких приборов требует и разработки новых электронно-оптических систем. Именно этой задаче, а также поиску адекватных методов их численного анализа и посвящена диссертационная работа К. А. Лещевой, поэтому тема диссертационной работы несомненно актуальна.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Работа изложена на 100 страницах, содержит 42 рисунка, 8 таблиц и список цитируемой литературы из 95 наименований. Автореферат полностью соответствует содержанию работы.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, четко сформулированы цели и задачи исследования, представлена научная новизна результатов, определена их научная и практическая значимость, приведены сведения о достоверности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе автора, апробации результатов работы, а также о структуре и объеме диссертации.

Первая глава диссертации содержит обзор современных тенденций в разработке новых giroприборов и связанных с ними требований к электронно-оптическим системам. Отмечено, что в целях дальнейшего увеличения мощности и частоты целесообразно рассмотреть ЭОС, где пучок является принципиально трехмерным. Сделан вывод о том, что перспективным представляется также исследование систем, где распределение формирующих ВЭП полей, в отличие от МИП, не является адиабатическим. Далее рассмотрен вопрос об адекватном выборе методики численного моделирования ЭОС, где могут быть нарушены как условия аксиальной симметрии, так и адиабатичности. Предложено использовать комбинацию широко известного пакета программ CST Studio Suite и разработанных в диссертации программных модулей пред- и пост-обработки, позволяющих учесть как специфические для ВЭП условия старта частиц с поверхности эмиттера (эмиттеров), так и особенности алгоритмов обработки данных траекторного анализа, позволяющих определить основные параметры ВЭП, значимые для сохранения устойчивости пучка и обеспечения высокого КПД приборов. На примере МИП с сильным возмущающим влиянием сил пространственного заряда проведено сравнение результатов траекторного анализа, проведенного по разработанной в диссертации методике, с данными полученными по широко используемой для расчета многих ЭОС giroтронов программы ЭПОС и продемонстрировано хорошее совпадение не только интегральных параметров (питч-фактор, скоростной разброс), но и функции распределения по осцилляторным скоростям.

Вторая глава посвящена рассмотрению новых вариантов неадиабатических систем, основанных на принципе инъекции прямолинейного пучка под углом к магнитному полю. Предложена простая методика предварительной аналитической оценки основных параметров ЭОС (компрессия магнитного поля, геометрия электродов и магнитной системы, питч-фактор, скоростной разброс и т.д.). Методика предварительной оценки параметров может быть использована как для двумерных, так и трехмерных ЭОС. Выполнен траекторный анализ простейших вариантов указанных ЭОС, показавший принципиальную возможность существенного снижения скоростного разброса и увеличения питч-фактора по сравнению с традиционными МИП giroтронов. Предложен

ряд новых вариантов ЭОС, пригодных для формирования ВЭП в многолучевых гиротронах и гиротронах с многозеркальными резонаторами.

Третья глава посвящена анализу и оптимизации однолучевых и многолучевых ЭОС гиро-ЛБВ со спирально-гофрированными электродинамическими системами. Для однолучевых систем рассмотрены ЭОС с реверсом магнитного поля в прикатодной области, что позволяет сформировать пучок, где центр электронных орбит находится на оси системы. Предложены и реализованы методы оптимизации как низкопервееансных ($P \sim 0.1$ мкпв), так и высокопервееансных ($P \sim 1$ мкпв) систем, позволяющие одновременно удовлетворить трем противоречивым требованиям – малого (в масштабе радиуса вращения) смещения ведущего центра с оси системы, малого (3-10%) скоростного разброса и достаточно высокого (1.2-1.5) питч-фактора.

Далее в главе исследована и оптимизирована адиабатическая МИП с секционированным эмиттером, способная формировать 10-струйный электронный поток с суммарным первееансом $P \sim 1$ мкпв. Предложены методы оптимизации формы катода и каждого из парциальных эмиттеров, позволяющие получить в рабочем пространстве пучки кругового поперечного сечения с умеренным скоростным разбросом и хорошим питч-фактором 1.2-1.5 при отсутствии токоперехвата на элементы электродинамической системы гиро-ЛБВ.

В четвертой главе теоретически и экспериментально исследована модификация адиабатической МИП, предназначенной для формирования 3-мегаваттного электронного пучка в планарном гиротроне миллиметрового диапазона длин волн (частота 140 ГГц). Особое внимание уделено реализации формы планарного электронного пучка с поперечным сечением в виде прямоугольника с отношением сторон 50:1. Получена простая аналитическая формула для предварительной оценки степени искажения формы пучка и показано, что аналитические оценки с хорошей точностью совпадают с данными траекторного анализа. Предложена и реализована методика профилирования формы катода и анода МИП, позволяющая в значительной степени скомпенсировать негативное влияние поля пространственного заряда на скоростной разброс. На основании данных траекторного анализа показано, что в указанной МИП возможно формирование ВЭП с малым (в масштабе длины волны) отличием поперечного сечения пучка от прямоугольника при умеренном скоростном разбросе и питч-факторе 1.2-1.3, что делает реальным достижение выходной мощности гиротрона порядка 1 МВт. Выполнено экспериментальное измерение параметров формируемого ВЭП, подтвердившее хорошее соответствие расчетных и измеренных параметров пучка.

В целом работа производит хорошее впечатление. В ней решен ряд новых сложных задач, позволивших разработать новые варианты электронно-оптических систем для мощных перспективных гиросприборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, предложить и оптимизировать их геометрию и режимы работы, что в дальнейшем можно будет использовать для дальнейшего улучшения селективности возбуждения рабочего типа колебаний при продвижении в область более коротких длин волн и увеличении выходной мощности. Полученные результаты являются новыми. Их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений. Достоверность основных положений и выводов диссертации обеспечивается применением апробированных методов численного моделирования электронно-оптических систем, а также сравнением полученных данных для частных случаев с результатами других исследователей и результатами экспериментов.

Вместе с тем, по диссертационной работе имеются следующие **замечания**.

1. Нет описания (хотя бы краткого) на каких сетках и по каким численным алгоритмам проводится моделирование в программе CST Studio Suite?
2. Приведено тестирование путем сравнения с программой EPOS. Почему тогда не использовать программу EPOS для расчетов?
3. Нет сравнений по точности предлагаемой методики на аналитических решениях, хотя бы для простейших задач.
4. Есть недостатки в форматировании текста и графического материала диссертации, что иногда затрудняет восприятие материала.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не изменяют общего положительного впечатления о работе. Диссертация свидетельствует о проведении автором большого объема работы по исследованию и оптимизации новых вариантов электронно-оптических систем для гиросприборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов и решению ряда важных и актуальных задач физической электроники, позволяющих реализовать в указанной области длин волн генераторы и усилители с параметрами, востребованными в различных научных и технических приложениях.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

По результатам диссертационной работы опубликовано 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение. Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях, проходивших с участием ведущих специалистов в области СВЧ-электроники, по их результатам опубликовано 13 печатных работ в сборниках материалов конференций.

С учетом вышесказанного, считаю, что диссертационная работа Лещевой Ксении Александровны «Развитие методов формирования винтовых электронных пучков для новых разновидностей giroприборов» отвечает всем требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Лещева Ксения Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории вычислительной физики федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), доктор физико-математических наук (05.13.18.- математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент



Свешников Виктор Митрофанович

12 сентября 2022 г.

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д.6

Телефон: +7 (383) 332 41 58

E-mail: victor@lapasrv.sccc.ru



Подпись Свешникова В.М. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета
ИВМиМГ СО РАН



Вшивкова Л.В.