

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. Декана физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова



Профессор

Федянин А. А.

«___» _____ 20__ г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
физического факультета

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Динамика поперечных волн электронного потока в неоднородных электрических и магнитных полях» выполнена на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета. В период подготовки диссертации соискатель Михеев Дмитрий Алексеевич являлся аспирантом кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

В 2012 году Д. А. Михеев окончил физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «физика».

В 2016 году Д. А. Михеев окончил очную аспирантуру физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности 01.04.03 – «Радиофизика» под научным руководством доктора физико-математических наук Ю.А. Пирогова, профессора кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2016 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

По итогам обсуждения представленной диссертации принято следующее **заключение:**

Диссертационная работа «Динамика поперечных волн электронного потока в неоднородных электрических и магнитных полях» является законченным научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и соответствует специальности 01.04.03 – радиопизика.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование динамики поперечных волн электронного потока в неоднородных электрических и магнитных полях с аксиальной и плоской симметрией.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка трёхмерной (3D) дискретной модели ленточного электронного пучка для исследования устойчивости и динамики распространения пучка в неоднородных электрических и магнитных полях.

2. Анализ модового состава и структуры мод высокочастотного электрического поля цилиндрического резонатора с ламельным зазором, изучение динамики взаимодействия электронного пучка с высокочастотным поперечным полем резонатора.

3. Исследование динамики ленточных электронных пучков с циклотронным вращением в расширяющихся аксиально- и плоско-симметричных магнитных полях с целью повышения мощности и эффективности СВЧ устройств с поперечной модуляцией электронного потока.

4. Изучение возможности пространственной группировки электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях без начальной модуляции продольной скорости электронов.

Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Разработана оригинальная трёхмерная (3D) дискретная математическая модель ленточного электронного пучка для исследования устойчивости и динамики распространения пучка в неоднородных электрических и магнитных полях. Модель является перспективной для моделирования и разработки широкого класса микроволновых устройств с ленточными электронными пучками в миллиметровом и терагерцовом диапазонах.

2. Изучен модовый состав и структура мод высокочастотного электрического поля цилиндрического резонатора с ламельным зазором, а также процессы взаимодействия электронного пучка с высокочастотным поперечным полем резонатора. Оригинальная конструкция цилиндрического резонатора с поперечным электрическим полем может

быть использована для транспортировки и модуляции как ленточных, так и цилиндрических потоков. Модель резонатора также может быть использована для группировки электронных потоков. Показано, что оптимизация формы и местоположения петли связи в цилиндрическом резонаторе с ламельным зазором обеспечивает возбуждение основной моды высокочастотного электрического поля с однородным электрическим полем в канале взаимодействия с электронным пучком. Доказано, что применение I-образного согласующего узла с треугольной вставкой позволяет достичь максимально возможного коэффициента передачи энергии сигнала в электронный поток.

3. Установлена и исследована возможность прямого преобразования энергии быстрой циклотронной волны ленточного электронного потока в энергию постоянного электрического тока в неоднородных расширяющихся магнитных полях.

4. Рассмотрены вопросы устойчивости и деформации поперечного сечения ленточных электронных пучков с циклотронным вращением в расширяющихся аксиально- и плоско-симметричных магнитных полях. Показано, что повышение устойчивости ленточных электронных пучков с циклотронным вращением в расширяющихся аксиально- и плоско-симметричных магнитных полях дает дополнительные перспективы для разработки мощных СВЧ устройств с поперечной модуляцией электронного потока. Выявлено, что в расширяющихся аксиально- и плоско-симметричных магнитных полях распространение ленточных электронных потоков становится более стабильным благодаря уменьшению поля пространственного заряда \vec{E} и фокусирующего магнитного поля \vec{B} , т.е. уменьшению фактора $\vec{E} \times \vec{B}$, вызывающего деформацию поперечного сечения ленточного пучка.

5. Показана возможность пространственной 3D группировки электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях в отсутствие начальной модуляции продольной скорости электронов. Выявлено, что в случае аксиально-симметричных магнитных полей пространственная 3D группировка электронного потока возникает в условиях несоосности между магнитным полем и осью циклотронного вращения электронов. В плоско-симметричных магнитных полях в случае, когда ось вращения потока лежит в плоскости симметрии магнитного поля, в потоке возбуждаются только четные гармоники плотности тока.

6. Установлено, что выявленный эффект пространственной 3D группировки электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях необходимо учитывать при разработке мощных СВЧ устройств с поперечной модуляцией электронного потока.

Достоверность полученных результатов подтверждается проверочными численными и модельными экспериментами, а также соответствием полученных результатов априорной информации, теоретическим расчетам и данным, полученным в работах других авторов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная трёхмерная (3D) дискретная математическая модель ленточного электронного пучка для исследования устойчивости и динамики распространения пучка в неоднородных электрических и магнитных полях.

2. Впервые изучен модовый состав и структура мод высокочастотного электрического поля цилиндрического резонатора с ламельным зазором, изучены процессы взаимодействия электронного пучка с высокочастотным поперечным полем резонатора.

3. Исследована возможность прямого преобразования энергии быстрой циклотронной волны ленточного электронного потока в энергию постоянного электрического тока в неоднородных расширяющихся магнитных полях.

4. Впервые изучены вопросы устойчивости и деформации поперечного сечения ленточных электронных пучков с циклотронным вращением в расширяющихся аксиально- и плоско-симметричных магнитных полях.

5. Впервые показана возможность пространственной 3D группировки электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях в отсутствие начальной модуляции продольной скорости электронов.

Практическая значимость результатов работы обусловлена возможностью их использования при создании новых типов мощных СВЧ устройств с поперечной модуляцией электронного потока (микроволновые устройства с ленточными электронными пучками в миллиметровом и терагерцовом диапазонах, а также новых типов цилиндрических резонаторов с поперечным электрическим полем).

Личный вклад автора: все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном и определяющем участии. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим.

Апробация результатов: основные результаты докладывались лично автором на следующих российских и международных конференциях:

IV и V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2015, 2016), 10-й Международной конференции по вакуумным источникам энергии (Санкт-Петербург, 2014), 2-м Международном форуме «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической энергетике» (Москва, 2014), V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО» (Москва, 2014), IX Всероссийской научной молодежной школе «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2014), 13-й Международной конференции по вакуумной электронике (Монтерей, США, 2012), Научных сессиях НИЯУ МИФИ (Москва, 2012, 2013, 2014, 2015), Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 2012; Красновидово, 2013, 2014, 2015, 2016), семинаре кафедры фотоники и физики микроволн Физического факультета МГУ.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках выполнения работ по научному проекту № 16-32-00826 мол_а.

Основные результаты представлены в 27 публикациях, из них 6 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ведущих периодических изданий ВАК:

1. Д. А. Михеев, В. Л. Саввин О группировке электронного пучка в неоднородных магнитных полях // «Журнал радиоэлектроники», 2016, №5, с.1-8.
2. Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, А. В. Коннов, Г. М. Казарян, Ю. А. Пирогов. Дискретная математическая модель ленточного электронного пучка в спадающем магнитном поле // Известия РАН. Серия физическая, 2016, том 80, №2, С.229-232
3. В. Л. Саввин, А. В. Коннов, Д. А. Михеев, Г. М. Казарян, И. И. Шуваев. О транспортировке ленточного электронного пучка в аксиально-симметричном магнитном поле // «Журнал радиоэлектроники», 2015, №9, с.1-9.
4. Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, А. В. Коннов, Г. М. Казарян, Ю. А. Пирогов. Энергообмен высокочастотного поля с электронным пучком в условиях циклотронного резонанса // Известия РАН. Серия физическая, 2014, том 78, №2, С.247-250.
5. В. Л. Саввин, А. В. Коннов, Д. А. Михеев, Г. М. Казарян. О динамике ленточного электронного пучка в плоско-симметричном реверсе магнитного поля // Известия РАН. Серия физическая, 2013, том 77, №12, С.1785-1788.

6. А. В. Коннов, Г. М. Казарян, Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, Т. И. Чернобай.
Формирование и структура электронного пучка в электронно-оптической системе
циклотронного преобразователя энергии // «Журнал радиоэлектроники», 2012, №5, с.1-15.

В написанных в соавторстве работах основные результаты, представленные в
диссертации, получены лично Д.А. Михеевым.

Диссертация «Динамика поперечных волн электронного потока в неоднородных
электрических и магнитных полях» Михеева Д.А. рекомендуется к защите на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 –
«Радиофизика».

Заключение принято на заседании кафедры фотоники и физики микроволн
физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова».

Присутствовало на заседании 23 чел. Результаты голосования: «за» - 23 чел.,
«против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол №12 от «20» апреля 2016 г.

И.о. зав. кафедрой
фотоники и физики микроволн,
к.ф.-м.н., доцент

А.Ф. Королев

Ученый секретарь кафедры
фотоники и физики микроволн,
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

Т.И. Арсеньян