



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛМАЗ»**

410033, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., зд. 1А стр.1

тел.: +7 (8452) 63-25-57, 63-35-58
факс: +7 (8452) 48-00-39
email: info@almaz-rpe.ru, www.almaz-rpe.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «НПП «Алмаз», к.э.н.,
председатель
научно-технического совета
АО «НПП «Алмаз»



М.Г. Апин
2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз» – на диссертацию Фунтова Александра Андреевича «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника».

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

В настоящее время в сверхвысокочастотной электронике одной из актуальных задач является освоение терагерцового диапазона. Центральной проблемой при этом остается создание и исследование интенсивных компактных и перестраиваемых источников терагерцового когерентного излучения и мощных широкополосных усилителей. При освоении терагерцового диапазона возникают технологические трудности изготовления таких приборов, связанные с пропорциональностью линейных размеров области взаимодействия, длины волны их рабочих диапазонов. Отметим, что даже вакуумные приборы в этом диапазоне не обладают большой выходной мощностью.

Одним из возможных способов повышения выходной мощности является использование резистивных усилителей, в которых электронный поток взаимодействует с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью, реализуемой метаматериалом. Представляет интерес использование комбинированных систем, состоящих из участков традиционных замедляющих систем (ЗС) и резистивного усилителя с метаматериалом, изучения физики происходящих процессов и создание теории таких приборов.

Таким образом, исследование эффектов взаимодействия электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью актуально не только само по себе, но и применительно к использованию метаматериалов в микроволновом диапазоне.

Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод о том, что тема диссертационной работы Фунтова А.А., посвященная анализу эффектов резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влиянию на группировку электронного потока в устройствах вакуумной СВЧ-электроники, является актуальной.

ОФОРМЛЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 136 страницах, включая 63 рисунка и 3 таблицы, а также список литературы, содержащий 139 наименований.

Во введении достаточно убедительно обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, указаны цель работы и решаемые для её достижения задачи, представлена научно-практическая значимость результатов исследования, научная новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту, описана структура и объем диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена краткому обзору как классических, так и современных работ, посвященных резистивному усилителю, а также использованию метаматериалов в вакуумной СВЧ-электронике. Перечислены недостатки, изучены вопросы применения среды с различной комплексной диэлектрической проницаемостью в классических ЭВП СВЧ О-типа.

Вторая глава диссертационной работы содержит вывод основных уравнений для модификации волнового метода Овчарова-Солнцева на случай взаимодействия электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью. С помощью полученной модификации исследуется нелинейная теория в переменных Лагранжа для резистивного клистрона (резонатор-среда-резонатор). Также исследована линейная теория гибрида резистивного усилителя с клистроном с распределенным взаимодействием, где среда помещена между распределенными резонаторами. Для обоих типов клистронов производится оценка выходных параметров и исследуется эффективность применения сред по сравнению с вакуумным промежутком в зависимости от свойств среды. Проведенные расчеты по предложенной теории показывают, что подбором параметров в модели клистрона с указанной средой (или метаматериалом) можно добиться увеличения коэффициента усиления и выходной мощности относительно модели двухрезонаторного клистрона.

В третьей главе диссертационной работы рассмотрена линейная теория гибрида резистивного усилителя с фото-ЛБВ (среда помещается между фотокатодом и отрезком ЗС). Созданная линейная теория гибрида фото-ЛБВ и резистивного усилителя показывает, что добавление в фото-ЛБВ секции с комплексной проводимостью между катодом и замедляющей

системой позволяет значительно (на несколько порядков) увеличить эквивалентное сопротивление, которое является основной характеристикой прибора, при той же длине системы. По результатам нелинейной теории подбором проводимости можно сократить полную длину лампы при том же эквивалентном сопротивлении.

Основная часть данной главы посвящена гибриду с ЛБВО (ЗС-среда-ЗС), для которого рассматривается линейная и приближенная нелинейная теории по двум методам, одним из которых является описанная в предыдущей главе модификация волнового метода (в адаптации под данную задачу) и метод крупных частиц. Сравняются три варианта: классическая ЛБВ без разрыва и локального поглотителя, указанный гибрид и ЛБВ с разрывом. Оценивается влияние свойств среды на выходные параметры описываемых моделей, но в отличие от предыдущей главы, где рассматривается бесконечноширокий пучок, в данной главе проведены оценки выходных параметров в случае конечного пучка, полностью заполняющего пролетный канал.

В четвертой главе рассматриваются планарные модели резистивного усилителя, неоднородные в поперечном сечении. Приведены результаты теоретических расчетов и самосогласованного численного моделирования в CST Particle Studio (во временной области). Показано, что подбором параметров системы, таких как свойства среды, топология и геометрических размеров системы можно реализовать режимы с большим усилением возмущений плотности тока в пучке и режимы широкополосного усиления.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Область исследования диссертации соответствует пунктам паспорта научной специальности 1.3.5. «Физическая электроника» по физико-математическим наукам;

п. 3. Вакуумная электроника, включая методы генерирования потоков заряженных частиц, электронные и ионные оптические системы, релятивистскую электронику.

п. 4. Плазменная электроника, включая физические процессы в плазменных приборах: СВЧ-генераторах, усилителях, плазменных (коллективных) ускорителях, плазменно-пучковых разрядах, плазменных источниках электронов и источниках ионов.

Оформление диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011 и ГОСТ Р 7.0.5-2008. Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований, достаточно точно отражает содержание диссертационной работы, полученные в ней теоретические и практические результаты и выводы.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

1. На основе модификации волнового метода Овчарова-Солнцева построена нелинейная теория взаимодействия электронного пучка с электромагнитными полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП). Были проанализированы физические процессы в гибридных приборах, сочетающих элементы классической вакуумной СВЧ электроники и сред с КДП: в резистивном клистроне (резонатор-среда-резонатор) и в двухсекционной ЛБВ с КДП секцией области разрыва (секция ЗС-среда-секция ЗС).
2. Построена линейная теория клистрона с распределенным взаимодействием с КДП вставкой в пространстве дрейфа для случаев 2 и 3 распределенных резонаторов.
3. Построена линейная и нелинейная теории фото-ЛБВ со вставкой КДП секции в область между фотокатодом и замедляющей системой (фотокатод-среда-ЛБВ). Оценено влияние свойств среды на эквивалентное сопротивление полученной гибридной системы.
4. Развита приближенные методы анализа планарного резистивного усилителя с метаматериалом в рамках линейной теории. Полученные аналитические оценки сопоставлены с результатами численного моделирования в рамках самосогласованной модели, реализованной в программном пакете CST Studio Suite. Сформулирована иерархия моделей резистивного усилителя с метаматериалом.
5. Полученные аналитические результаты могут быть использованы для предварительных оценок параметров новых гибридных приборов вакуумной электроники. «ЛБВ + резистивный усилитель с метаматериалом с комплексной диэлектрической проницаемостью». Данные гибриды в диапазоне 220 ГГц позволяют увеличить усиление и выходную мощность. Также результаты работы будут полезны при разработке лекционных курсов для студентов и аспирантов по физической электронике и электронике СВЧ.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обоснованность и достоверность основных научных положений, результатов и выводов диссертации подтверждаются корректной постановкой цели и задач исследования, выбором современных методов исследования. Данная работа написана на высоком научно-техническом уровне, методы, используемые автором, актуальны. Личный вклад автора не вызывает сомнений. Результаты работы апробированы на большом числе научных конференций и в рецензируемых научных изданиях. Фунтовым А.А. получены новые и важные теоретические результаты, связанные с процессами усиления СВЧ колебаний в

электрoвакуумных приборах с резистивной неустойчивостью в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДОВ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертационной работы могут использоваться на предприятиях радиоэлектронной промышленности РФ для которых является актуальной задача разработки ЭВП СВЧ мм-диапазона, в частности АО «НПП «Алмаз», АО «НПП «Исток» им. Шокина (г. Фрязино) и др.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

В диссертационной работе имеются некоторые недочеты.

1. В введении говорится об актуальности освоения терагерцового диапазона, а в диссертации исследования проводятся для приборов в диапазонах 2.45 и 7 ГГц и только для ЛБВ в диапазоне 220 ГГц.
2. Исследования проводятся в случае пучка, полностью заполняющего пролетный канал, на практике – заполнение обычно равно 0.5-0.6.
3. Некоторые мелкие описки: стр. 122 – вторая строка сверху, стр. 135 – ЛБВ написано строчными буквами (список литературы 133).

Тем не менее приведённые замечания не снижают общий высокий уровень и положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Фунтова А.А. является самостоятельным и законченным научным исследованием. Она прошла апробацию на большом числе научных конференций различного уровня. Основные результаты опубликованы в 14 научных работах, в том числе в 6 статьях в научных изданиях из перечня ВАК по научной специальности 1.3.5. и в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Web of Science и Scopus. Также имеются 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники» полностью соответствует требованиям и критериям пп. 9-11, 13-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., № 842, предъявляемым к

диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Фунтов А.А., заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.5. – «Физическая электроника».

Диссертационная работа Фунтова Александра Андреевича заслушивалась и обсуждалась на заседании научно-технического совета АО «НПП «Алмаз». Отзыв утвержден единогласно на заседании научно-технического совета АО «НПП «Алмаз» от 11.12.2025 г. (протокол № 08/25).

ОТЗЫВ СОСТАВИЛ:

Заместитель директора
НПЦ «Электронные системы»
по развитию и внедрению результатов
НИОКР, к.ф.-м.н.



05.02.2026



05.02.2026

В.И. Роговин

Ученый секретарь НТС, к.т.н.

Д.А. Архипов

Подписи В.И. РОГОВИНА и Д.А. АРХИПОВА ЗАВЕРЯЮ

Начальник отдела
управления персоналом



05.02.2026



ОТДЕЛ
УПРАВЛЕНИЯ
ПЕРСОНАЛОМ

Н.А. Коноплина

410033, Саратовская область, г. Саратов, ул. им. Панфилова И.В., д. 1а, стр. 1
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»
Телефон/факс: +7 (8452) 63-35-58 / +7 (8452) 48-00-39
Адрес электронной почты: info@almaz-rpc.ru
Официальный сайт: <https://almaz-rpc.ru/>