

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

**Запевалова Владимира Евгеньевича**

на диссертационную работу

**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 в диссертационный совет 24.2.392.01

при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г Саратов,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.5. - Физическая электроника

Диссертационная работа Александра Андреевича Фунтова посвящена решению важной научной проблемы физической электроники, как в настоящее время, так и в обозримом будущем, созданию и исследованию компактных и перестраиваемых источников микроволнового когерентного излучения и мощных широкополосных усилителей методами вакуумной электроники. В этой связи исследовались эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники.

При освоении все более высокочастотных диапазонов возникают трудности, связанные с уменьшением линейных размеров области взаимодействия приборов и соответствующим обострением технологических проблем. Отметим, что даже классические вакуумные приборы в субмиллиметровом диапазоне не обладают достаточно большой выходной мощностью, необходимой для целого ряда приложений.

В последнее время в связи с активным изучением метаматериалов исследователи всё чаще рассматривают их применение к вопросам усиления и генерации в СВЧ и КВЧ диапазонах. Также представляет значительный интерес комбинирование в электронных устройствах традиционных замедляющих систем (ЗС) и резонаторов с элементами из метаматериалов. Таким образом, данная работа обладает большой актуальностью и с точки зрения фундаментальной науки, поскольку предоставляет новые знания по физике электронных приборов на основе новых электродинамических систем и электронных пучков в этих структурах.

Диссертационная работа Фунтова А.А. состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 136 страниц текста, 63 иллюстрации, 3 таблицы, список литературы (139 источников). Диссертационная работа имеет логичную структуру и высокий уровень научной строгости, написана простым и понятным языком, приведенные результаты доступны для восприятия и понимания. Содержание **автореферата** соответствует содержанию диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, отражены цель и научные задачи, доказаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, ясно сформулированы научные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

**В первой главе** диссертационной работы выполнен краткий, но содержательный обзор как классических, так и современных работ, посвященных резистивному усилителю,

а также использованию метаматериалов в вакуумной СВЧ-электронике. Приведены примеры резистивного усилителя и пояснены физические принципы его работы. Описана достаточно простая модель, пригодная для описания метаматериалов.

**Во второй главе** диссертационной работы представлена нелинейная теория взаимодействия электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) с использованием модификации волнового метода Овчарова-Солнцева и её применение для резистивного клистрона (резонатор-среда-резонатор). Также рассмотрена модель гибрида резистивного усилителя с клистроном с распределенным взаимодействием (КРВ). Выполнено численное моделирование обычных двух-резонаторных клистронов с частотами 2 ГГц и 7 ГГц и их версий с добавлением секции из метаматериала с КДП и продемонстрировано заметное улучшение выходных параметров для версий с КДП. Далее описана теория КРВ с обычными распределенными резонаторами, но с пространством дрейфа в виде среды с КДП. Продемонстрирована возможность реализации улучшенных параметров для гибридной схемы.

**В третьей главе** диссертационной работы описаны исследования, посвященные гибридам резистивного усилителя с известными СВЧ вакуумными усилителями с длительным взаимодействием (с фото-ЛБВ и ЛБВО). Продемонстрировано существенное повышение параметров в указанных гибридных устройствах, что делает их привлекательными для дальнейшей разработки и приборной реализации.

**В четвертой главе** описаны результаты исследования планарных моделей резистивного усилителя неоднородных в поперечном сечении. Описан вывод дисперсионных уравнений для нескольких рассмотренных моделей. Первая модель включает предварительно промодулированный ленточный электронный пучок, бесконечно широкий по одной из осей летит между слоями метаматериала, плоскость симметрии проходит по середине пучка, параллельно ему; над и под метаматериалом через вакуумный промежуток располагаются металлические пластины, которые являются границами электродинамической системы. Вторая модель представлена средой с множеством пролетных каналов. Обе модели исследованы численными методами с помощью развитых компьютерных кодов. Построена иерархия моделей резистивного усилителя и выяснены детали физики взаимодействия в указанных системах.

**В заключении** диссертационной работы представлены основные выводы и результаты исследований, среди которых наиболее важные корректно отражены в положениях, выносимых на защиту:

1. Созданы модели для расчета основных характеристик электронных устройств, включающих элементы на основе метаматериалов с КДП.
2. Развита линейная и нелинейная теория резистивного усилителя с использованием модифицированного метода Овчарова-Солнцева. Продемонстрирована преобладающая роль волны с отрицательной энергией в резистивном усилителе.
3. Показано, что использование исследуемых сред позволяет заметно сократить длину прибора и (или) улучшить группировку пучка и, таким образом, коэффициент усиления.
4. В аналитических расчетах и численном моделировании продемонстрирована эффективность применения метаматериалов для улучшения характеристик электронных микроволновых приборов.

**Актуальность** поставленных задач заключается в том, что без их эффективного решения невозможно достижение требуемых параметров в рамках ранее используемых подходов.

**Научная новизна диссертационной работы** очевидна, поскольку она содержит важные научные результаты, полученные впервые: было проведено детальное теоретическое исследование разнообразных электронных СВЧ приборов, включающих

метаматериалы. На основе проведенного исследования была продемонстрирована эффективность применяемых методов использования метаматериалов для улучшения характеристик указанных приборов.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку обеспечение высоких характеристик в исследованных приборах, заметно превосходящих таковые у существующих классических аналогов, позволяет создавать все более совершенные устройства для освоения микроволнового диапазона.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования** подтверждается систематическим характером исследований, сопоставлением и хорошим согласием результатов теоретического анализа аналитическими методами и численного моделирования, на основе надежных и отработанных численных кодов, используемых в настоящее время.

Содержание диссертационной работы Фунтова Александра Андреевича «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники» соответствует паспорту научной специальности 1.3.5. - Физическая электроника (пункт 3, раздела «Направления исследований»). Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу с высоким научным уровнем. Результаты, полученные в диссертационной работе (методы улучшения характеристик электронных приборов СВЧ и КВЧ путем использования метаматериалов с комплексным КДП), несомненно, будут использованы при разработке подобных приборов. Разработанные модели для расчета систем с КДП позволят изучать и проектировать и другие электронные приборы СВЧ. Результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных статьях и представлялись на многих российских конференциях и семинарах в виде докладов. Особо отметим 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, что непосредственно может быть использовано в других работах. Исследования по теме диссертационной работы поддержаны грантом РФФИ.

#### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

Следует отметить, что в плане новизны, глубины анализа и раскрытия материала диссертация Фунтова А.А. находится на достаточно высоком уровне, что характерно для работ, выполняемых в СГУ им. Н.Г.Чернышевского. В работе предложен и исследован целый ряд оригинальных научно-технических решений, которые могут иметь перспективы дальнейшего развития. Тем не менее, по содержанию работы можно сделать ряд замечаний:

- 1) В диссертации не приведены основные тенденции в изменении рассмотренных электронных устройств с метаматериалами с повышением частоты, хотя, судя по Введению это намечалось.
- 2) В диссертации не приведены ссылки на современные работы аналогичной тематической направленности, если таковые есть, и методы их исследований, в том числе зарубежными программными комплексами.
- 3) В диссертации несколько раз упоминается возможность укорочения пространства взаимодействия при использовании метаматериалов. Однако это свойство не обсуждается с точки зрения реализации потенциальных преимуществ, таких как упрощение транспортировки электронного пучка, снижение массогабаритных характеристик магнитной системы и прибора в целом, и т.д.
- 4) Характерные параметры прибора, как исходные, так и полученные в результате расчета целесообразно было бы включить в единообразные таблицы, чтобы не искать их по тексту.
- 5) Не всегда понятно, откуда взяты исходные параметры для расчетных моделей, когда из других статей, а когда получены в результате проведенной оптимизации.

- б) Не всегда приведена расшифровка имеющихся обозначений (предпочтительно это привести на отдельной странице), имеются опечатки, например в Автореферате в формуле (1) и далее.

Сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость и общую хорошую оценку диссертационной работы Фунтова Александра Андреевича.

**Выводы и заключение:**

В заключение следует отметить, что диссертационная работа Фунтова А.А. «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники» представляет собой решение актуальной научной проблемы, имеющей важное практическое значение для создания высокоэффективной отечественной СВЧ техники. Выводы и заключения по результатам проведенных исследований обоснованы. Диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов полностью соответствует требованиям п. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Фунтов Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. - Физическая электроника.

Я, Запевалов Владимир Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Фунтова Александра Андреевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник  
отдела электронных приборов,  
доктор физико-математических  
наук (специальность 01.04.04 -  
Физическая электроника),  
доцент

Запевалов  
Владимир  
Евгеньевич

10.02.2026

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»»

603950, Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.  
тел.: (831) 436-62-02  
e-mail: zapev@ipfran.ru

Подпись Главного научного сотрудника Запевалова Владимира Евгеньевича  
ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ИПФ РАН



И.В. Корюкин