

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Галдецкого Анатолия Васильевича на диссертацию Фунтова Александра Андреевича на тему «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника»

Физика взаимодействия электронных пучков с полями электродинамических систем исследовалась десятки лет, в том числе волновым методом Овчарова-Солнцева, тем не менее, рассмотренные в диссертации вопросы использования в электровакуумных приборах СВЧ новых материалов, в том числе искусственных периодических структур с необычными радиофизическими свойствами, являются безусловно **актуальными** при поиске способов увеличения эффективности взаимодействия, сокращения массогабаритных характеристик, увеличения усиления, а также при разработке терагерцовых приборов. При этом построение аналитических моделей позволяет улучшить понимание физических механизмов и качественных зависимостей до проведения численного анализа. С этой точки зрения работа А.А. Фунтова, в которой проводится аналитическое исследование механизмов взаимодействия со средами с комплексной диэлектрической проницаемостью, оказывается весьма интересной и востребованной.

В работе продемонстрировано, что даже в простой одномерной модели взаимодействия пучка с метаматериалом (без выделенной внешней электродинамической системы) можно обнаружить ряд интересных

эффектов, привлекательных для применений. Это дает возможность выделить качественные зависимости в модели и использовать их при выборе параметров при численном моделировании и оптимизации схемы прибора.

Результаты анализа, развитого в работе, найдут применение при проектировании и оптимизации современных ЭВП для ускорительной техники, систем связи, радиолокации и радиопротиводействия. Таким образом **научное и практическое значение** работы не вызывает сомнений.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации подтверждается правильным выбором моделей и использованием аппарата, опробованного ранее при анализе традиционных СВЧ приборов типа О. Причем обращает на себя внимание тот факт, что достигнутые результаты явились следствием первоначальной теоретической проработки и четко сформулированных идей и предложений.

В целом работа оставляет хорошее впечатление и показывает возможности дальнейшего продолжения этого направления в части создания моделей, более приближенных к реальным условиям экспериментов и к конструкциям реальных приборов. Работа является особенно **своевременной** в связи с появлением современных теплопроводных композитных резистивных материалов на основе алмаза и карбида кремния.

Данная работа не обошлась без **недостатков**. Следует отметить несколько затянутый обзор ранее выполненных работ во Введении и Главе 1.

Кроме того, использование в большей части работы одномерных моделей справедливо при анализе принципиальных эффектов при взаимодействии пучков со средами. Более точные результаты должны базироваться на, как минимум, двумерных моделях, учитывающих необходимость отдаления пучка от среды, эффекты расслоения и т.п.

Также заметим, что хотя использование резистивной среды способно обеспечить нарастание колебаний в высокочастотной (терагерцовой) области без наличия мелкоструктурных электродинамических систем, но эффективные устройства ввода-вывода все же потребуют миниатюризации (или будут сверхразмерными резонаторами, т.е. узкополосными элементами). Таким образом, схема с резистивным усилителем может улучшить частотные и полосовые свойства механизма усиления в терагерцовом диапазоне, но не снимает технологических проблем при изготовлении подобных устройств. По-видимому, с этим связано отсутствие практических конструкций приборов коротковолновых диапазонов на эффекте резистивного усиления в течение более пятидесяти лет после выдвижения исходной идеи. По-видимому, не менее перспективным может быть применение рассмотренных идей в конструкциях сверхмощных высоковольтных СВЧ приборов, в которых возможности сокращения массогабаритных характеристик и стоимости весьма востребованы.

Вызывает возражения замечание автора (стр. 23) о сравнении замедляющих систем и метаматериалов. Высказана мысль о том, замедляющие системы принципиально одномерны, а метаматериалы – двух- и трехмерны. На самом деле двумерные замедляющие системы активно исследовались и были использованы в 70х-80х годах прошлого века в применении к приборам М-типа. Это нашло отражение в публикациях и в классической книге Р.А. Сирина «Замедляющие системы». На мой взгляд, замедляющие системы – это подкласс метаматериалов, имеющих прикладное назначение и обладающих дополнительными свойствами (хороший теплоотвод, отсутствие зарядки пучком). То есть они – тоже метаматериалы. Другое дело, что, исторически, замедляющие системы рассматривались как устройства, где электрическое поле не усреднялось (и требовались устройства ввода и

вывода энергии, дополнительное согласование границ), а метаматериалы – как среды с усредненными свойствами.

Также дискуссионен тезис (там же) об обязательной анизотропии метаматериала как следствии его трехмерности. При наличии кубической симметрии (аналогично кристаллической решетке) метаматериал будет изотропен.

Следует также обратить внимание на опечатку (вводящую в заблуждение): «периодические среды ведут себя как одномерные, когда длина волны во много раз больше периода среды». По видимому имелось в виду «однородные» вместо «одномерные».

В работе имеется некоторое количество редакторских и типографских ошибок, например на стр. 5: «характерный размер метаматериала много меньше длины волны, распространяющейся в пучке электронов» нужно «характерный размер элементов структуры метаматериала много меньше длины волны, распространяющейся в пучке электронов».

Однако указанные погрешности относятся скорее к оформлению, являются не принципиальными и не умаляют ценности данной работы и полученных результатов.

Научная новизна результатов и их **апробация** в выступлениях автора на научных собраниях не вызывает сомнений.

Таким образом, результаты, изложенные в диссертации, можно рассматривать как решение важной задачи, имеющей существенное значение для современной СВЧ электроники, лежащей в основе разработки современных связных и радиолокационных систем СВЧ. Диссертация А. А. Фунтова «Эффекты резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в приборах вакуумной СВЧ электроники» вполне удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Фунтов Александр Андреевич, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Официальный оппонент

Начальник теоретического отделения

АО «НПП «Исток» им. Шокина»,

к.ф.м.н. (01.04.03 - Радиоп физика, включая квантовую)

16.03.2026

/А. В. Галдецкий/

Почтовый адрес: 141190, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная 2а

Телефон: +7-495-465-8620

e-mail: galdetskiy@istokmw.ru

Подпись Анатолия Васильевича Галдецкого заверяю.

Секретарь диссертационного Совета

АО «НПП «Исток» им. Шокина»



16.03.2026

/И. В. Куликова/