

ОТЗЫВ

о диссертации Фунтова А.А.

"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

Освоение терагерцового диапазона частот является **актуальной задачей** СВЧ электроники и требует создания и исследования мощных перестраиваемых генераторов и широкополосных усилителей. Классические приборы вакуумной СВЧ электроники позволяют достичь относительно высокой мощности выходного сигнала в суб-терагерцовом диапазоне. Переход в терагерцовый диапазон путем простого масштабирования традиционных электродинамических систем зачастую является затруднительным. При сохранении выходной мощности, уменьшение поперечных размеров электродинамической системы требует значительного повышения плотности тока пучка. Так же возникает ряд технологических проблем при изготовлении миниатюрных замедляющих систем.

Наряду с периодическими замедляющими системами существует и другое классическое решение задачи об усилении высокочастотного сигнала при взаимодействии с электронным потоком – известное как "резистивный усилитель". В свое время данный подход не получил достаточного распространения из-за технологических проблем и конкуренции с периодическими замедляющими системами.

В последнее время наблюдается значительный прогресс в исследовании и создании устройств на основе метаматериалов. В рамках стационарной (одночастотной) теории метаматериал можно представить, как среду в которой диэлектрическая проницаемость принимает комплексное значение, подобно теоретической модели, использовавшейся в первых работах о резистивном усилителе.

Представляет интерес обобщение моделей и подходов, развитых для резистивного усилителя на случай сред с произвольной комплексной диэлектрической проницаемостью на рабочей частоте, а также при учете частотной зависимости диэлектрической проницаемости среды, что характерно для метаматериалов.

В то время как в периодических замедляющих системах повышение плотности тока пучка затрудняет группировку, из теории резистивного усилителя известно, что увеличение плотности тока может способствовать группировке.

Вышеуказанные соображения приводят к идее улучшения группировки электронного потока с большой плотностью тока в "гибридных" приборах, сочетающих элементы классической вакуумной СВЧ электроники и метаматериалов.

Также представляет интерес более подробное рассмотрение неоднородных в поперечном сечении электродинамических систем из метаматериалов, как устройств, улучшающих группировку электронного потока. Это стало возможным с развитием "полностью электромагнитных кодов", таких как CST Studio Suite.

Начальная **постановка задачи** и общий план диссертационной работы принадлежат члену-корреспонденту РАН, д.ф.-м.н. профессору Дмитрию Ивановичу Трубецкову. Первый вариант названия работы "Волновые процессы в электронных потоках в средах с поглощением, емкостной и индуктивной проводимостью" – подчеркивал общность физических процессов взаимодействия электронного потока с полями подобных сред. Это было отражено в новом названии работы, где эти три случая были обобщены в рамках стационарной теории как среды с комплексной диэлектрической проницаемостью (обозначаемых в работе как КДП). Вскоре к

термину среда с КДП добавилось “и с метаматериалами”. Для общего обозначения рассматриваемых волновых процессов в электронном потоке в работе стал широко использоваться термин “резистивная неустойчивость”.

Единство подходов сохранилось. Планировался обширный обзор классических работ и планомерное развитие представленных в них аналитических методов исследования. Существенная часть работы (использующая аналитические методы) была проведена соискателем под руководством Д.И. Трубецкого, но работа не была завершена.

Цель работы заключается в исследовании эффектов резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияния на группировку электронного потока в устройствах вакуумной СВЧ-электроники.

В работе рассмотрен ряд “гибридных” приборов, полученных путем введения секции из среды с КДП (метаматериала) в пространство дрейфа электронного потока в пролетном клистроне и клистроне с распределенным взаимодействием; в область между фотокатодом и замедляющей системой фото-ЛБВ; в области разрыва многосекционной ЛБВ.

Для достижения поставленных целей работы автором развиты линейная и нелинейная теории взаимодействия электронного пучка с электромагнитными полями сред с КДП в приложении к вышеописанным гибридным приборам.

Автором показана возможность значительного улучшения выходных характеристик предложенных гибридных приборов по сравнению с их классическими аналогами. Это достигается улучшением группировки электронного потока с большой плотностью тока в вводимой секции с КДП.

Рассмотрены планарные слоистые структуры с КДП, как перспективные устройства для улучшения группировки электронного потока. Наряду с аналитическими моделями использовано самосоогласованное численное моделирование в CST Studio Suite.

Автором показано, что планарные слоистые структуры с КДП могут использоваться как пространственно-развитые электродинамические системы для усиления группировки электронного потока. Рассмотрен случай периодической в поперечном сечении электродинамической структуры, которую можно рассматривать как модель системы с большим суммарным поперечным сечением электронного потока. При этом путем подбора геометрии системы, и свойств среды достижимы режимы как узкополосного, так и широкополосного усиления скоростной модуляции и группировки электронного потока.

Замечу, что в реализованном в настоящее время подходе, конкретный вид частотной зависимости диэлектрической проницаемости среды не играет решающей роли. В большей части работы используется классическая модель Друде, как простая и часто применяемая аппроксимация частотной зависимости для ряда метаматериалов, также справедливая для некоторых перспективных для СВЧ электроники сред (к примеру, n-doped GaAs), а также реализованная в ряде программных пакетов, включая самосоогласованную модель в CST Studio Suite.

Новые результаты, полученные автором при развитии классических аналитических методов, и подтвержденные численным моделированием, являются практически важными для создания новых “гибридных” приборов СВЧ электроники.

Уже к началу нашей совместной работы Александр Андреевич Фунтов показал себя как хорошо сложившийся специалист в Радиофизике и Физической электронике, владеющий классическими аналитическими методами и способный к самостоятельному поиску и развитию теоретических моделей. Его опыт численного решения задач и использования современных пакетов научного и инженерного моделирования тогда еще уступал его мастерству аналитических выкладок.

Но в ходе нашего сотрудничества он активно развивал свои навыки и быстро приобретал недостающий опыт. Он самостоятельно изучил и стал на высоком уровне работать в Wolfram Mathematica. Также он провел расчеты по нестационарной нелинейной теории, успешно провел расчеты в программном пакете CST Studio Suite и проанализировал полученные результаты.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях. По результатам диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Александр Андреевич Фунтов активно, тщательно и внимательно ведет лекционные и практические занятия со студентами, особенно успешно в физическом практикуме по курсу “Электронные и ионные приборы”, как по теоретической части, так и в проведении экспериментов.

Диссертация Фунтова А.А. является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой.

Представленная к защите диссертационная работа, позволяет считать, что Фунтов А.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Научный руководитель,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры Электроники, колебаний и волн

В.Н. Титов

Телефон: +7 (8452) 21 - 07 – 26

Электронная почта: TitovVN1974@gmail.com

410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

