

На правах рукописи



ФУНТОВ Александр Андреевич

ЭФФЕКТЫ РЕЗИСТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СРЕДАХ С
КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ И ИХ
ВЛИЯНИЕ НА ГРУППИРОВКУ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ПРИБОРАХ
ВАКУУМНОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ

1.3.5. – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель:

Титов Владимир Николаевич
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Запевалов Владимир Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник отдела электронных приборов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Галдецкий Анатолий Васильевич, кандидат физико-математических наук, начальник отделения 10 Акционерного Общества «Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Ведущая организация:

Акционерное Общество «Научно-производственное предприятие Алмаз», г. Саратов

Защита состоится 13 марта 2026г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская 83, Х корпус СГУ, 511 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/effekty-rezistivnoy-neustoychivosti-v-sredakh-s>

Автореферат разослан «__» ноября 2025г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.392.01



Слепченков Михаил Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность исследуемой проблемы

В настоящее время в сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике одной из актуальных задач является освоение терагерцового (приблизительно от 0.3ТГц до 3ТГц) или, иначе говоря, субмиллиметрового (соответственно от 1мм до 0.1мм) диапазона. Излучение в терагерцовом диапазоне частот, как известно, представляется весьма перспективным в различных современных приложениях, таких как системы защиты, медико-биологические анализы, беспроводная связь и в других областях, привлекающих большое внимание в течение последнего десятилетия. Центральной проблемой при этом остается создание и исследование интенсивных компактных и перестраиваемых источников терагерцового когерентного излучения и мощных широкополосных усилителей (в первую очередь, речь идет о создании мощных широкополосных усилителей терагерцового диапазона типа ЛБВ). Несмотря на возникающие трудности уже есть устройства, работающие в этом диапазоне и в твердотельной, и в вакуумной СВЧ электронике.

При освоении терагерцового диапазона возникают трудности, связанные с пропорциональностью линейных размеров области взаимодействия прибора и длины волны¹. Отметим, что даже вакуумные приборы в этом диапазоне не обладают большой выходной мощностью.

Исследование замедляющих систем (ЗС) и резонаторов по-прежнему сохраняет свою актуальность (в том числе и в связи с продвижением в субмиллиметровый диапазон) для вакуумной СВЧ электроники. Если ранее получили широкое распространение цельнометаллические ЗС, то в последнее время в связи с активным изучением метаматериалов исследователи всё чаще рассматривают их применение к вопросам усиления и генерации СВЧ². Также представляет интерес комбинирование традиционных ЗС и метаматериалов.

Один из методов повышения выходной мощности и коэффициента усиления может заключаться в использовании резистивных усилителей, в частности, устройств с метаматериалами. Приведем определение из работы³: метаматериал — композиционный материал, свойства которого обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой.

В случае, когда характерный размер метаматериала много меньше длины волны, распространяющейся в пучке электронов, метаматериалы можно, как и диэлектрики, описывать с точки зрения среды с комплексной диэлектрической проницаемостью, которая впервые в СВЧ электронике использовалась в первых работах о резистивном усилителе^{4,5}.

¹ Григорьев А. Д. // Электроника и микроэлектроника СВЧ, т. 1, № 1, 2015, стр. 141-145.

² Guha R., Wang X., Tang X. и др. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021

³ Вендик И.Б., Вендик О. Г. // ЖТФ, 2013, т. 83, вып. 1.

⁴ Birdsall C. K., Brewer O. R., Haeff A. V. // Proceedings of the IRE. 1953. Vol. 41, no. 7. P. 865-875.

⁵ Birdsall C. K., Whinnery J. R. // J. Appl. Phys. 1953. Vol. 24, no. 3. P. 314-323.

В настоящее время метаматериалы все активнее изучаются применительно к вакуумной СВЧ электронике. Условно можно выделить два направления. Первое: использование метаматериалов при конструировании замедляющих систем для улучшения их характеристик. Например, статья⁶ посвящена разработке ЗС из «левого» метаматериала. Используется цельнометаллическая ЗС для уменьшения опасности пробоя на высоких мощностях. Такую ЗС можно использовать, например, для миниатюризации ЛОВ.

Второе: использовать метаматериал подобно диэлектрику в резистивном усилителе. В серии работ⁷ с этой целью использовался метаматериал с отрицательной действительной частью диэлектрической проницаемости. Авторы в процессе исследования рассмотрели несколько типов структур, и остановились на отрезках меандров, позволивших в численном моделировании показать увеличение погонного коэффициента усиления модуляции скорости электронов. Настоящая работа также придерживается этого направления с тем отличием от упомянутых работ, что фокус внимания сосредоточен на уточнении физики происходящих процессов и построения теорий приборов, в которых можно использовать метаматериал подобным образом.

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.

Отметим, что исследованием взаимодействия электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью занимались такие известные исследователи как С. К. Birdsall, О. R. Brewer, J. R. Whinnery, А. В. Гаев, В. М. Лопухин, Д. И. Трубецков, Н. S. Uhm, Л. В. Касаткин, N. Behdad, J. Booske и др. В том числе были созданы линейные одномерная и двумерная теории резистивного усилителя О-типа, а также нелинейная теория резистивной неустойчивости для нескольких частных случаев диэлектрической проницаемости, а именно были исследованы случаи чисто действительной и индуктивной проводимости сред, а также среды, описываемой моделью Друде. В двумерной линейной теории резистивного усилителя рассматривается слоистая структура, состоящая из пучка и диэлектрика или метаматериала, в которой важны толщины указанных слоев.

Вместе с тем остались малоизученными следующие вопросы.

1. Отсутствует нелинейная теория резистивной неустойчивости О-типа, способная учитывать различные случаи комплексной диэлектрической проницаемости среды.

⁶ He Y., Kong X., He J., Ling J., Pi M.. // AIP Advances 12, 035345 (2022).

⁷ Rowe T., Behdad N., Booske J.. // IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43, №7, стр. 2123-2131.

Rowe T., Behdad N., Booske J.. // IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44, №10, стр. 2476-2484.

Rowe T., Fobes P., Booske J.H., Behdad N.. // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, № 4, April 2017, стр. 654 – 664.

2. Не изучены вопросы о применении среды с различными случаями комплексной диэлектрической проницаемости в классических вакуумных СВЧ усилителях О-типа вместо пространства дрейфа, а также нет соответствующих достаточно полных теорий.

3. Слабо изучено влияние толщин слоёв и их взаимное расположение в планарной модели резистивного усилителя.

Вышеуказанное позволяет считать тему диссертации **актуальной** и соответствующей специальности физическая электроника – 1.3.5 (а именно п.3 и 4 паспорта специальности).

Объектом исследования являются системы из электронного потока и среды с комплексной диэлектрической проницаемостью.

Предметом исследования являются эффекты, возникающие при взаимодействии электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью.

Цель научно-квалификационной работы заключается в анализе эффектов резистивной неустойчивости в средах с комплексной диэлектрической проницаемостью и их влияние на группировку электронного потока в устройствах вакуумной СВЧ-электроники. Достижение поставленной цели обеспечено выполнением следующих задач:

1. Модификация волнового метода Овчарова-Солнцева на случай среды с произвольной комплексной диэлектрической проницаемостью для построения нелинейной теории;

2. Анализ эффектов резистивной неустойчивости (с помощью известной линейной и развитой на основе модели из п.1 нелинейной теорий О-типа) при взаимодействии электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью на примере комбинированных устройств, создаваемых путем введения секции с комплексной диэлектрической проницаемостью в приборы вакуумной СВЧ электроники;

3. Построение планарной модели резистивного усилителя с метаматериалом и сравнение с результатами численного моделирования.

Научная новизна.

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 приближенная методика 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.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту

1. Использование сред с комплексной диэлектрической проницаемостью в качестве пространства дрейфа между двумя резонаторами как пролетного клистрона, так и клистрона с распределенным взаимодействием, в режимах с плотностями тока, при которых сильны эффекты пространственного заряда, позволяет улучшить условия группировки электронов в пучке по сравнению с использованием вакуумного промежутка. При этом коэффициент усиления клистронов обоих типов увеличивается более чем на 10 дБ. При уменьшении расстояния между резонаторами в клистродах обоих типов почти вдвое по сравнению с вакуумным промежутком можно получить такой же коэффициент усиления, как и у тех же клистронов, но с вакуумным промежутком.

2. В режимах с плотностями тока, при которых сильны эффекты пространственного заряда, использование среды с комплексной диэлектрической проницаемостью между фотокатодом и отрезком замедляющей системы в составе гибридной системы «фото-ЛБВ+резистивный усилитель» позволяет увеличить эквивалентное сопротивление гибридной системы на несколько порядков по сравнению со случаем, когда используется вакуумный промежуток, за счет улучшения условий группировки электронов в пучке в пространстве дрейфа. При уменьшении расстояния между фотокатодом и отрезком замедляющей системы почти вдвое по сравнению с вакуумным промежутком можно получить эквивалентное сопротивление гибридной системы «фото-ЛБВ+резистивный усилитель», сравнимое по величине с эквивалентным сопротивлением фото-ЛБВ в отсутствие среды с комплексной диэлектрической проницаемостью.

3. Использование сред с комплексной диэлектрической проницаемостью (оцениваемой по модели Друде) в разрыве многосекционной ЛБВ в составе гибридной системы «ЛБВ+резистивный усилитель» в режиме работы с плотностями тока, при которых сильны эффекты пространственного заряда, позволяет снизить влияние параметра рассинхронизма на процессы усиления и улучшить условия группировки электронов в пучке. При этом в линейном режиме достигается увеличение коэффициента усиления (более чем на 10 дБ), а в нелинейном режиме - увеличение выходной мощности и КПД (в несколько раз) по сравнению с ЛБВ с разрывом и ЛБВ без разрыва в отсутствие среды с комплексной диэлектрической проницаемостью при одном и том же расстоянии от входа до выхода прибора.

4. В резистивных усилителях с планарными слоистыми структурами (как минимум из двух слоев – вакуумного канала для ленточного пучка и метаматериала) в режимах работы с плотностями тока, при которых сильны эффекты пространственного заряда, реализуется большое (более 20 дБ) усиление возмущений плотности тока в пучке. Существует такая комбинация значений параметров толщины метаматериала, плотности тока и коэффициента затухания в среде с диэлектрической проницаемостью (на примере модели Друде), при которой достигается широкополосное (почти октава) усиление возмущений плотности тока в пучке.

Методология и методы исследования. При анализе эффектов, возникающий при взаимодействии в исследуемых системах «электронный поток–поля» сред с комплексной диэлектрической проницаемостью» применяется традиционный для вакуумной СВЧ электроники метод дисперсионного уравнения. В линейной теории в качестве основной теоретической модели используется гидродинамическая модель одномерного бесконечно широкого ионно-скомпенсированного электронного потока.

При анализе нелинейных колебательных и волновых процессов при взаимодействии электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью применяется модификация классического для СВЧ электроники волнового метода Овчарова-Солнцева наряду с дисковой моделью электронного пучка и методом крупных частиц.

В численном эксперименте по планарной модели используется решение самосогласованной задачи по модификации метода FDTD – FIT, реализованное в пакете CST Studio Suite.

Научно-практическая значимость. Все полученные аналитические результаты могут быть использованы для предварительных оценок параметров новых гибридных приборов вакуумной СВЧ электроники, предваряя этап численного моделирования при проектировании устройств. Показано, что использование сред с КДП может способствовать группировке электронного потока, что позволяет увеличить коэффициент усиления или сократить длину пространства взаимодействия. Результаты работы будут полезны при разработке и чтении лекционных курсов по физической электронике и электронике СВЧ для студентов бакалавриата, магистратуры и специалитета.

Достоверность обусловлена использованием традиционных для электроники СВЧ методов исследования процессов взаимодействия электронного потока и электромагнитных волн, а именно метода дисперсионного уравнения, волнового метода Овчарова-Солнцева, стационарной нелинейной теории. Для предложенных нелинейных моделей получены предельные переходы к известным линейным моделям. Полученные результаты не противоречат современным физическим представлениям о силах пространственного заряда, взаимодействии пучка с полями структур и сред с различной проводимостью и диэлектрической проницаемостью.

Апробация работы и публикации. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах семинарах и конференциях: XVI Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» им. проф. А. П. Сухорукова (2017 г., Можайск), III Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы СВЧ электроники им. В. А. Солнцева 2017» (2017 г., Москва), Научно-техническая конференция, посвящённая 60-летию АО «НПП «Алмаз» (2017 г., Саратов), XVI Всероссийская школа-семинар «Волны в неоднородных средах» им. проф. А.П. Сухорукова (2018 г., Можайск), 13-ая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2018) (2018 г., Саратов), 12-ая Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2019) (2019 г., Саратов), XVII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020») (2020 г., Можайск), Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2020» (2020г., Саратов), XVI всероссийская научная конференция молодых ученых «нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 7-9 сентября 2021), Ежегодный молодежный научно-технический семинар АО «НПП «АЛ-МАЗ» (ЕМНТС 2024) (2024 г., Саратов) на объединённых научных семинарах кафедры электроники, колебаний и волн, и кафедр факультета нелинейных процессов. Кроме того, прочитана лекция на XVII Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ (2018г., Саратов).

Материалы работ автора, вошедшие в диссертацию, использовались при выполнении научно-исследовательских работ по гранту Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 18-02-00666.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, и рецензируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 5 статей в сборниках трудов научных конференций и семинаров, и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все результаты, включенные в диссертационную работу, получены лично соискателем. Ему принадлежит вывод всех аналитических выражений, разработка большинства алгоритмов и программ для ЭВМ, выполнение численных расчётов. Совместно с **Д. И. Трубецковым** (научным руководителем до 2020 г.) было выбрано основное направление исследований, связанное с использованием метаматериалов в резистивном усилителе и его гибриде с другими СВЧ вакуумными лампами. Совместно с научным руководителем В.Н. Титовым были реализованы современные подходы к решению поставленных задач и обсуждались структуры, соответствующие фундаментальным моделям.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 136 страниц, из которых 114 страниц основного текста, включая 63 иллюстраций и 3 таблицы. Список литературы состоит из 123 наименований на 14 страницах.

Краткое содержание диссертационной работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны её цели, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена краткому обзору как классических, так и современных работ, посвященных резистивному усилителю, а также использованию метаматериалов в вакуумной СВЧ-электронике.

Согласно работе⁴ резистивный усилитель состоит из цилиндрической стеклянной трубки, изнутри которой нанесен поглощающий слой. Вдоль оси трубки движется электронный поток, в котором возбуждается волна плотности заряда. По мере движения потока в поглощающем слое наводится заряд. Данная волна взаимодействует с результирующим полем слоя, так что в среднем за период поток отдаёт энергию волне плотности заряда.

Одними из важных объектов исследования настоящей работы являются электрические (ENG) метаматериалы, т.е. у которых действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости отрицательна.

Одной из самых простых и часто используемых моделей метаматериала является модель Друде. Изначально она была введена для описания электронного газа в металлах. Но, можно показать, что в ряде случаев она применима и для описания метаматериалов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена нелинейной теории взаимодействия электронного потока с полями сред с комплексной диэлектрической проницаемостью (в дальнейшем КДП) в переменных Лагранжа 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).

В п.2.1 приведен вывод основных уравнений для модификации волнового метода Овчарова-Солнцева для учета КДП пространства дрейфа. Использовалась следующая модель: ионнокомпенсированный одномерный электронный поток пронизывает входной резонатор, модулируется по скорости и влетает в среду с КДП и/или с произвольной комплексной проводимостью. Считаем, что на все электроны данного поперечного сечения пучка действует одинаковое усредненное по сечению электрическое поле, и что движение электронов однонаправленное. Кроме того, предполагается, что модуляция электронов по скорости мала, однако никаких ограничений на глубину модуляции потока электронов по току и плотности не накладывается.

Также указанный метод применим и для пучка конечных размеров с цилиндрической симметрией. Результаты учета ограниченных поперечных

размеров пучка и граничных условий на основе метода принудительной гармонизации приведены в п. 3.2.

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость среды учитывается по модели комплексной проводимости⁸

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon \left(1 - \frac{j\Xi}{n\omega\varepsilon} + \frac{\Lambda}{n\omega\varepsilon} \right), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды в пределе бесконечной частоты (Для простоты далее предполагается $\varepsilon=1$), Ξ и Λ – активная и мнимая компонента проводимости среды). Для частоты $n\omega$ n – номер гармоники. Также показан предельный переход при $\varepsilon_{\text{eff}}=1$ к уравнениям классического волнового метода.

Введены $\Omega = \omega/\omega_p$ – отношение рабочей частоты к плазменной, $\xi = \beta_p x$ – нормированная длина пространства дрейфа, $\sigma + jL = \frac{\Xi + j\Lambda}{\omega_p \varepsilon_0}$ – нормированные на $\omega_p \varepsilon_0$ активная и мнимая компоненты проводимости, следующее разложение возмущения угла пролета электронов

$$\theta = \frac{\theta_0}{2} + \text{Re} \theta_1 e^{j\omega t_0} = \frac{\theta_0}{2} + B \cos(\omega t_0 + \varphi), \quad (2)$$

где $\theta_1 = B e^{j\varphi}$, B имеет смысл параметра группировки. Введем $\mu = d\theta_0/(2d\xi)$ – изменение скорости пучка по координате как единого целого. С учетом (2) получены следующие основные уравнения для компонент возмущения угла пролета

$$\frac{d\mu}{d\xi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\Omega\sigma J_n^2(nB)}{(\varepsilon n\Omega + L)^2 + \sigma^2}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 B}{d\xi^2} - \frac{(C_1 - 2\mu)^2}{B^3} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Omega(\varepsilon n\Omega + L)}{(\varepsilon n\Omega + L)^2 + \sigma^2} \frac{1}{n} \frac{dJ_n^2(nB)}{dB}, \quad (4)$$

где C_1 – константа интегрирования. Заметим, что в (2) на самом деле 3 функции ξ : θ_0 , B и φ . Однако выражение, содержащие вторую производную φ по ξ , получается равным правой части (3), взятой с минусом. Взяв неопределенный интеграл по ξ от суммы (3) и указного выражения, получаем эту константу, т.к. в следствие взаимного сокращения правых частей сумма (3) и указного выражения равна 0.

Таким образом, необходимо решить систему из дифференциальных уравнений (3) и (4) чтобы найти первую гармонику тока из соотношения

$$I_1 = 2J_1(B) e^{-j \left(\frac{\pi}{2} + \int_0^\xi \mu(\varsigma) (1 + B^{-2}(\varsigma)) d\varsigma \right)}. \quad (5)$$

⁸ Касаткин Л.В. // Радиотехника и Электроника, 1961, т. 6, №2, с. 267-274.

Использовались следующие начальные условия, которые описывают случай только скоростной модуляции пучка

$$\frac{dB(0)}{d\xi} = \chi, B(0) = 0, \mu(0) = 0, C_1 = 0, \quad (6)$$

где χ – начальная модуляция скорости. Расчёты показывают, что зависимости первой гармоники тока от нормированной координаты вблизи первого максимума почти не меняются с ростом числа гармоник, учитываемых в решении уравнений, из чего следует, что для дальнейших расчетов можно ограничиться только первой гармоникой.

Развитая модификация волнового метода имеет следующие пределы применимости. Во-первых, начальная модуляция скорости должна быть малой, а начальная модуляция по плотности отсутствовать, что на практике, например, может соответствовать клистрону с узким зазором непосредственно перед средой. Во-вторых, учитывается влияние только основной гармоники, что справедливо только до первого максимума, в котором нормированный ток (из-за свойств функции Бесселя) равен 1.16.

В п.2.2 произведена оценка коэффициента усиления по напряжению в резистивном клистроне (резонатор-среда-резонатор, см. Рис. 1) по методике работы⁹. Из Рис. 2, для которого использовались параметры¹⁰ $U_0 = 1\text{кВ}$, $I_0 = 80\text{мА}$, частота 2ГГц, видно хорошее совпадение результатов линейной и нелинейной теории до первого максимума.

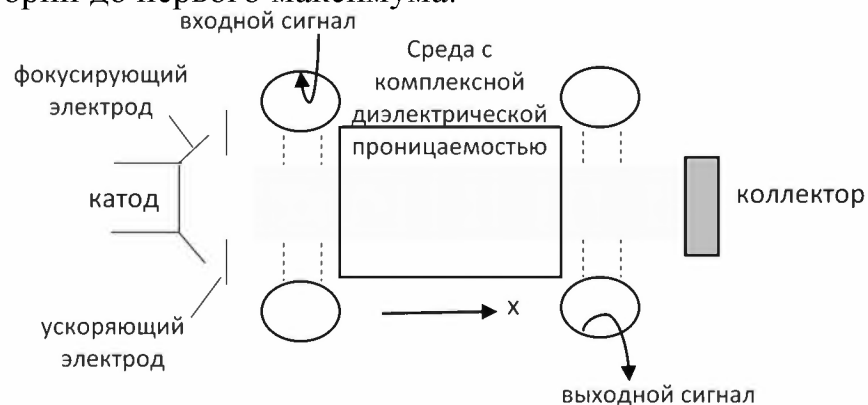


Рис. 1. Рассматриваемая модель двухрезонаторного клистрона с пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью.

Оценка выходных параметров (коэффициента усиления, выходной мощности и КПД) для развитой теории резистивного двухрезонаторного клистрона проводилась для клистрона со следующими параметрами классического двухрезонаторного клистрона¹⁰: ускоряющее напряжение 35кВ, ток 6.5А, длина зазора 0.35см, частота сигнала 7ГГц. В введенных

⁹ Hamilton D.R., Knipp J.K., Horner Kuper J.B. Klystrons and Microwave Triodes (in the Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory series) First Edition. New York, Toronto, London, McGraw-Hill Book Company Inc, 1948.

¹⁰ Кацман Ю.А. Приборы сверхвысоких частот. Теория, основы расчета и проектирования электронных приборов. Том II. Учебник для вузов. –М.: «Высшая школа», 1973.

обозначениях $C=3.54$, $\Omega=4.84$, $r=0.17$, по прежнему предполагается начальная модуляция по скорости $\chi=10^{-3}$.

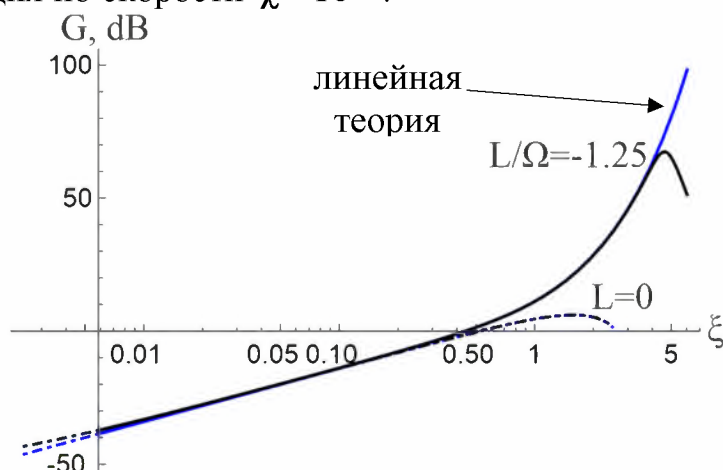


Рис. 2. Зависимости коэффициента усиления, полученного из линейной и нелинейной теорий, от нормированной координаты при учете только первой гармоники при $C=0.1$, $\Omega=20$, $\sigma=0$, $\chi=10^{-4}$ и различных L .

В случае секции с КДП вместо пространства дрейфа, положение и величина первого максимума тока заметно отличаются от обычного клистрона. Например, при $L/\Omega=-1.24$ первый максимум тока находится на длине пространства дрейфа соответствующей 127 мм. Из таблицы 1 видно, что в рассмотренной модели при выбранных параметрах даже не достигая первого максимума можно получить достаточно высокие выходные характеристики, большие чем для вакуумного дрейфа в первом максимуме на той же длине (50 мм). А если уменьшить длину секции с КДП, в модели можно получить характеристики сравнимые с обычным двухрезонаторным клистроном в случае выходного резонатора в первом максимуме тока.

Таблица 1. Результаты расчета первой гармоники тока и выходных параметров в двухрезонаторном клистроне при различной проводимости пространства дрейфа (не указанные параметры для расчета см. ¹⁰)

L/Ω	ϵ	длина дрейфа, мм	G , дБ	$P_{\text{вых}}$, кВт	η_e , %
0 (обычный клистрон)	1	50	32.93	4.16	1.83
-1.24	-0.24	50	48.9	26.18	11.5
-1.24	-0.24	22	32.5	4	1.18

Отметим, что условия резонанса (такое описание – дано в работе⁸) в терминах соотношения L/Ω не зависят от величины пространственного заряда.

В п. 2.3. описана теория КРВ с обычными распределенными резонаторами (РР), но с пространством дрейфа в виде среды с КДП, т.е. бесконечно широкий ионнокомпенсированный электронный поток модулируется входным РР, движется через секцию дрейфа с комплексной диэлектрической проницаемостью и наводит поля в выходном РР (см. Рис. 3).

Для расчета коэффициента усиления использовалась методика¹¹ с тем изменением, что предполагалось наличие проводимости у среды дрейфа (параметр ПЗ отличался от такового в РР на $\sqrt{\epsilon}$).

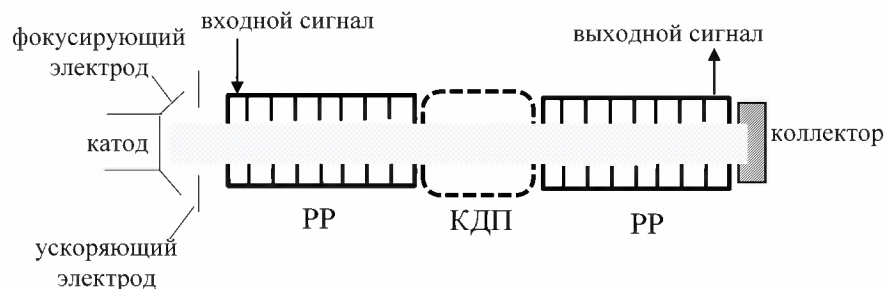


Рис. 3. Схема двух резонаторного КРВ с КДП.

Были рассмотрены случаи двух- и трехрезонаторного КРВ в случае отсутствия отражений от краев РР. Подбором параметров среды (как показано на Рис. 4) можно как увеличить коэффициент усиления, так и уменьшить его. Также отметим, что гибрид менее чувствителен к параметру рассинхронизма и влияние резистивной неустойчивости увеличивается с увеличением параметра ПЗ.

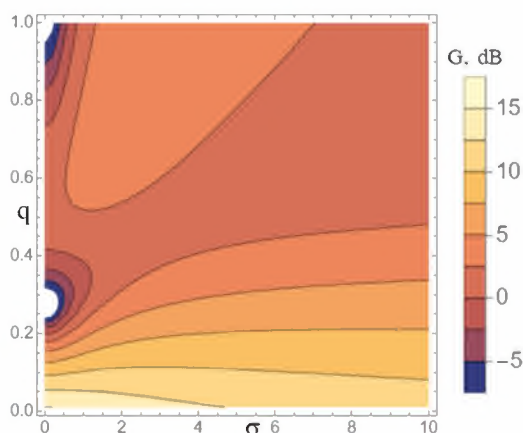


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от чисто активной проводимости σ и пространственного заряда.

В п. 2.4 сформулированные основные выводы к Главе 2.

Третья глава диссертационной работы посвящена гибридам резистивного усилителя с известными СВЧ вакуумными усилителями с длительным взаимодействием, а именно с фото-ЛБВ и ЛБВО.

В п. 3.1 описан гибрид фото-ЛБВ и резистивного усилителя (см. Рис. 5). Использовалась следующая модель: на катод падает амплитудно-модулированный световой сигнал с малой глубиной модуляции. Электронный поток полагается бесконечно широким и ионнокомпенсированным.

Секция с КДП описывается известными из теории резистивного усилителя уравнениями⁴, в отрезке ЗС используется методика¹² при $C \ll 1$. В отличие от остальной работы в п.3.1 искомое эквивалентное сопротивление —

¹¹ Андрушкевич В.С., Вырский В.А., Гамаюнов Ю. Г., Шевчик В.Н.. Усилительные клистроны с распределенным взаимодействием // Изд-во Саратовского университета, 1977.

¹² Цейтлин М.Б., Кац А.М. Лампа с бегущей волной. —М.: Советское радио, 1964, 308с.

величина, характеризующая связь переменной составляющей фототока с внешней нагрузкой и являющаяся основным параметром любого

фотодетектора¹³ $R_{\text{экв}} = \frac{|E|^2}{\beta_0^2 K |I(0)|^2}$, β_0 – постоянная распространения в линии

передачи без пучка, K – сопротивление связи. Из Рис. 6 видно, что резистивная неустойчивость при подборе параметров среды приводит к увеличению эквивалентного сопротивления на несколько порядков.

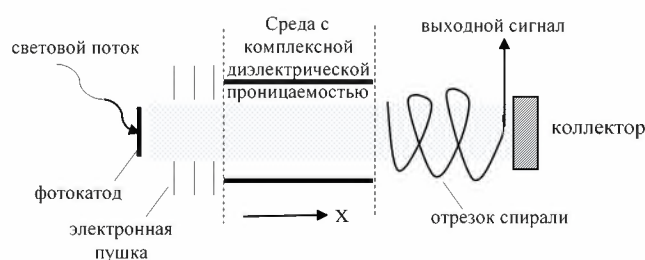


Рис. 5. Рассматриваемая модель гибрида фото-ЛБВ и резистивного усилителя.

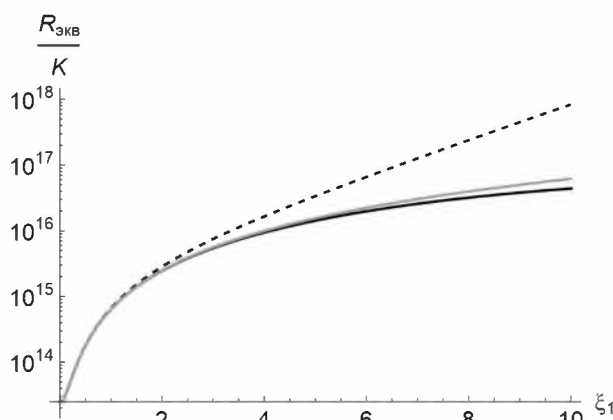


Рис. 6. Зависимость эквивалентного сопротивления $R_{\text{экв}}/K$ от длины резистивной секции ξ_1 при различных проводимостях: сплошная – вакуум, пунктир – индуктивная проводимость; серая – чисто активная проводимость.

В п. 3.2 представлены результаты расчетов гибрида ЛБВ и резистивного усилителя (ЗС-среда с КДП-ЗС). Использовалась следующая модель: ионнокомпенсированный одномерный электронный поток пронизывает входную секцию, затем влетает в среду с КДП, а далее попадает в выходную секцию. Предполагалось, что первый отрезок ЗС играл роль модулятора. Второй работал в обычном режиме. Кроме того, полагалось, что характеристики отрезков ЗС, если не указано иначе, одинаковы.

Поскольку для КДП-секции, в которой отсутствует ЗС, а, следовательно, и ВЧ поле в ней, вводить координату и параметр ПЗ привычным для ЛБВ образом не представляется удобным, использовалась следующая нормировка:

$$F(\xi) = \frac{E(x)e^{j\beta_e x}}{2\beta_e V_0} \quad \text{– безразмерная амплитуда поля в ЗС (E – размерная)}$$

¹³ Шевчик В. Н., Трубецков Д. И.. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. - М.: «Советское радио», 1970 г.

напряженность электрического поля), $\xi = \frac{2\pi CN}{C} = \beta_e x$ – нормированная длина

прибора, $b = \frac{v_0 - v_\phi}{v_\phi}$ – параметр рассинхронизма, v_ϕ – фазовая скорость

волны в ЗС без пучка, v_0 – средняя скорость пучка, $q = \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2$ – параметр ПЗ.

Считалось, что между отрезками ЗС и средой ток и его производная передаются без искажений. Предполагалось, что в первую секцию влетает немодулированный пучок и на неё подают входной сигнал. Во второй отрезке ЗС, кроме условия на ток, добавляется равенство нулю начального возмущения напряженности электрического поля.

При малом параметре усиления $C \ll 1$ и в отсутствии распределенных потерь в ЗС в них использовалась методика¹², а для КДП-секции⁴. Для расчета КДП использовалась модель Друде. Коэффициент усиления искался по формуле

$$G = 20 \lg \left| \frac{F}{F_0} \right|. \quad (7)$$

Вводились величины h_1 и h_2 – координаты начала и конца КДП-секции в долях от полной длины гибрида. Например, если $h_1 = 0.15$, $h_2 = 0.6$, то входная секция занимает первые 15% полной длины ($l_1 = 0.15\beta_e x$, где x – длина гибрида), КДП-секция $h_2 - h_1 = 0.45$, т.е. 45% полной длины, а выходная – оставшиеся 40% ($l_2 = 0.4\beta_e x$).

В качестве опорных брались параметры из статьи¹⁴, в которой приводятся данные натурального эксперимента для ЛБВ с частотой 220 ГГц, током 52.4 мА, ускоряющим потенциалом 20.5 кВ, сопротивлением связи 1.6 Ом (и соответственно $C = 0.01$), длиной ЗС (без учета длины поглотителя) – 53 мм и радиусом пролетного канала 0.12 мм. По данным приведенным в статье¹⁴ величину CN можно оценить как $CN = 1.44$.

На Рис. 7 показано, что при малом ПЗ коэффициент усиления классической ЛБВ вблизи $b = 0$ превосходит коэффициент усиления гибрида, а по мере увеличения параметра ПЗ, наоборот. Из этого можно сделать вывод, что в гибриде действуют две неустойчивости, свойственные ЛБВ и КДП, причем при малом ПЗ преобладает конвективная неустойчивость в отрезках ЗС.

Предлагаемый гибрид исследован и методом, развитым в главе 2. При этом диэлектрическая проницаемость на n -ной гармонике

$$\epsilon(n) = 1 - \frac{s_M}{n(n + j\Gamma)}, \quad (8)$$

¹⁴ Jiang et al.// IEEE Transactions on electron devices, vol. 68, no. 6, June 2021, p.3051-3055.

где $\Gamma = \gamma/\omega$ – коэффициент затухания и $s_M = \omega_{pM}^2/\omega^2$ – отношение квадратов отношения плазменной частоты метаматериала к рабочей. Предполагалось, что во входную секцию поступал невозмущенный пучок и что компоненты возмущения угла пролета электронов и их производные передаются между секциями без изменений. В выходную секцию входной сигнал не подается.

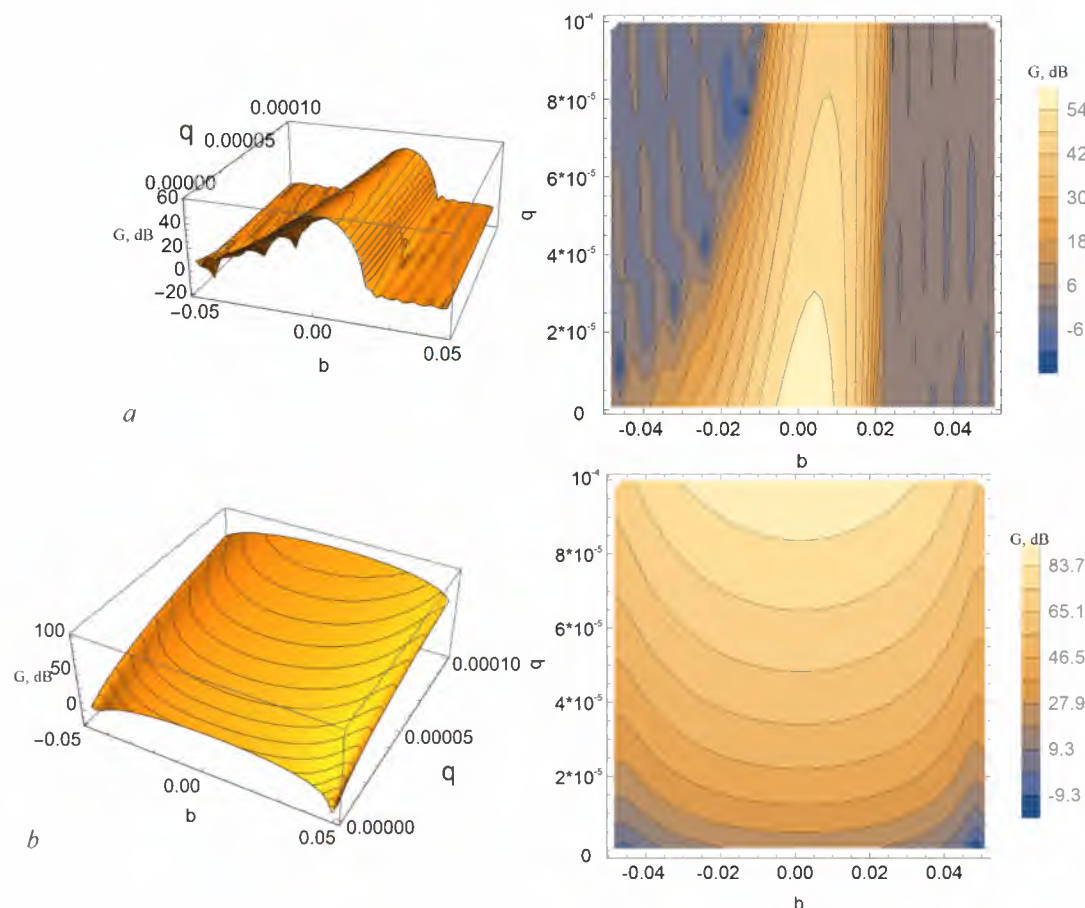


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления от параметра рассинхронизма и ПЗ для (а) ЛБВ и (б) гибрида.

Показано, что при выбранных параметрах результаты, полученные волновым методом при слабом сигнале, показывают хорошее соответствие с результатами линейной теории в довольно большой области параметров. На Рис. 8 показано, что у гибрида лучшая группировка и соответственно значение параметра В, соответствующее максимуму тока, достигается при меньшей входной мощности, причем коэффициент усиления гибрида значительно выше, чем у ЛБВ.

Была также рассмотрена модель указанного гибрида с помощью численного решения уравнений стационарной нелинейной теории методом крупных частиц. Для ЛБВ-секции использовались основные уравнения¹⁵. Для всех представленных результатов учитывалось 64 крупные частицы и 7

¹⁵ Branch G.M., Mihran, T.G. // IRE Trans. Electr. Dev., ED-2, 1955, p. 3-11.

гармоник. В качестве граничных условий полагалось, что θ и $\frac{\partial \theta}{\partial \zeta}$ непрерывны на концах секций, а на входе в последнюю секцию ВЧ поле в ЗС отсутствует.

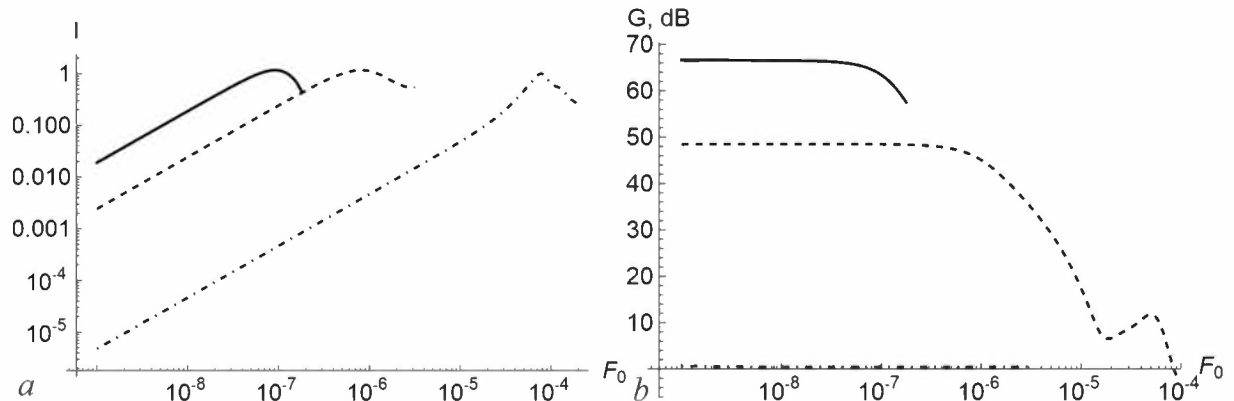


Рис. 8. Зависимости модулей (а) тока и (б) G от входного сигнала F_0 при $b = b_1 = 0$, $q = 5 \cdot 10^{-5}$, $s = 1.2$, $\Gamma = 5 \cdot 10^{-3}$. Сплошная линия – гибрид, пунктир – ЛБВ, штрих-пунктир – ЛБВ с разрывом.

Ранее в работе исследовался бесконечно широкий пучок. Для учета конечности заполнения будем коэффициент редукции учитывать по аппроксимации¹⁵.

В таблице 2 показано, при выбранных методах учета конечности заполнения пучка рассмотренном в случае полного заполнения гибрид показывает сравнимые выходные характеристики (коэффициент усиления, мощность и КПД) с классической ЛБВ, причем вблизи, а не в резонансе рабочей частоты с частотой метаматериала.

Таблица 2. Коэффициент усиления (в линейном режиме) для гибрида и ЛБВ. Обозначения соответствуют: ∞ – бесконечно широкому пучку, 1 – полному заполнению пролетного канала при $F_0 = 10^{-8}$, $q = 5 \cdot 10^{-5}$, $\Gamma = 5 \cdot 10^{-3}$, $s = 1.4$, $b = 0$.

	G, дБ	
	∞	1
Модификация волнового метода		
ЛБВ	48.5	53.6
Гибрид	66.5	48.8
Метод Крупных Частиц		
ЛБВ	48.5	48.7
Гибрид	66.5	66.4

В работе¹⁴, параметры из которой были использованы для расчетов, в линейном режиме у ЛБВ на частоте 220 ГГц коэффициент усиления 31.2 дБ, а в нелинейном режиме при входном сигнале 25 мВт выходная мощность 15 Вт причем максимально достижимая мощность 30 Вт достигалась на частоте 217 ГГц, а максимально достижимое КПД 2.79%. Ранее в расчетах для Рис. 7 и таблицы 2 локальный поглотитель в ЛБВ не учитывался. Оценка данных из статьи¹⁴ показывает, что полная длина лампы с учетом поглотителя в СН увеличится до 1.58, а сам поглотитель в нормировке настоящего раздела имеет координаты $h_1 = 0.328$, $h_2 = 0.42$. В таблице 3 приведены расчеты с

параметрами, которые без учета омических потерь позволяют для ЛБВ получить схожую с описываемой¹⁴ выходную мощность. Локальный поглотитель учитывается как разрыв (т.е. аналогично гибриду в случае $s=0$).

Таблица 3. Выходная мощность и электронный КПД для ЛБВ и гибрида, рассчитанные по методу крупных частиц, в случае полного заполнения пролетного канала при $F_0 = 3.53 \cdot 10^{-5}$ (25мВт), $b = 1.81 \cdot 10^{-2}$, $q = 8.5 \cdot 10^{-5}$, $\Gamma = 5 \cdot 10^{-3}$. Серым выделены данные¹⁴.

	P_{out} , Вт	η , %
ЛБВ из статьи ¹⁴	15	1.4
ЛБВ	15	1.39
Гибрид $s=1.35$	54.9	5.22
Гибрид с оптимальными параметрами	65.89	6.13

Выходная мощность и электронный КПД вычислялись с учетом введенной нормировки по формулам из работы¹⁶

$$P_{out} = I_0 V_0 \frac{|F|^2}{2C^3} \text{ и } \eta = \frac{|F|^2}{2C^3}. \quad (9)$$

В таблице 3 показано, что, во-первых, замена вакуумного дрейфа/разрыва на среду с КДП с сохранением длины и положения может улучшить выходные характеристики. Во-вторых, изменяя положение и длину КДП-секции, можно добиться существенного увеличения выходной мощности и КПД. Кроме того, что предлагаемый гибрид можно использовать в более широкой области по параметру синхронизма, сравнимые с ЛБВ выходные характеристики в гибриде можно получить при значительно меньшем входном сигнале, что может быть полезно, т.к. на сотнях ГГц мощность генераторов (в первую очередь полупроводниковых) сравнительно мала.

В п. 3.4 сформулированные основные выводы к Главе 3.

Четвертая глава посвящена планарным моделям резистивного усилителя неоднородных в поперечном сечении.

В п. 4.1 описан вывод трансцендентных дисперсионных уравнений по методике⁵ для нескольких рассмотренных моделей. Первая модель: ограниченный сильным продольным магнитным полем предварительно промодулированный (например, по плотности) ленточный пучок, бесконечно широкий по одной из осей, в сильном продольном магнитном поле 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 (см. Рис. 9а и б).

¹⁶ Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А.. Лекции по сверхвысокочастотной электронике // -М., «Советское радио», 1973г.

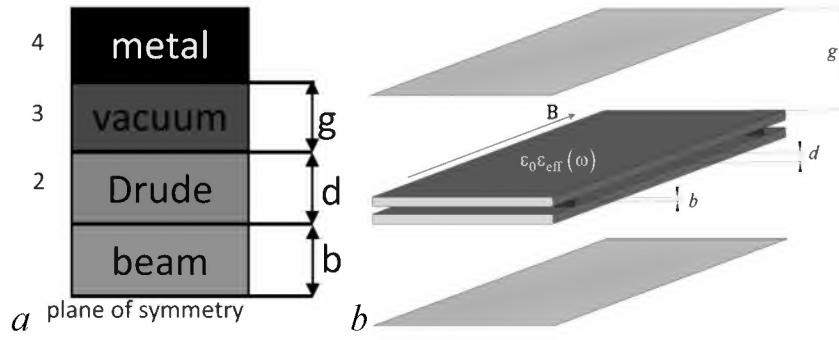


Рис. 9. Первая рассматриваемая модель: a – схема поперечного сечения структуры; b – рассматриваемая в численном моделировании трехмерная электродинамическая система, соответствующая теоретической. (а) Цифры соответствуют номерам слоя от плоскости симметрии (plane of symmetry), где пучок – первый слой. Надписи на слоях соответствуют учитываемой модели физических свойств соответствующего слоя.

Для первой модели

$$T \operatorname{tg}(Tb) = \Omega^2(\omega) \frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\omega)}{\tau(\omega)} \frac{\operatorname{cth} \Omega(\omega)g + \Omega(\omega) \frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\omega)}{\tau(\omega)} \operatorname{th} \tau(\omega)d}{\Omega(\omega) \frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\omega)}{\tau(\omega)} + \operatorname{cth} \Omega(\omega)g \operatorname{th} \tau(\omega)d}, \quad (10)$$

где T – искомая функция постоянной распространения волны в пучке β , вторая среда с толщиной d обладает частотной зависимостью относительной

КДП по модели Друде $\varepsilon_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_{\text{pM}}^2}{\omega^2 + j\gamma\omega}$, где γ – параметр

затухания/потерь в среде, ω_{pM} – плазменная частоты среды; третья среда толщиной g – вакуумный зазор, а четвертая – идеальный металл,

$$\tau(\omega) = \sqrt{\left(\frac{\beta}{\beta_p}\right)^2 - \Omega^2 \eta^2 \varepsilon_{\text{eff}}}, \quad \Omega(\omega) = \beta_e / \beta_p, \quad \eta = v_0 / c.$$

Для второй модели

$$T \operatorname{tg}(Tb) = \Omega^2(\omega) \frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\omega)}{\tau(\omega)} \operatorname{th} \tau(\omega)d. \quad (11)$$

Показан предельный переход к одномерной модели. Показано, что корни дисперсионного уравнения для планарной модели $\beta = \beta_e \pm \beta_p \left[1 + \frac{T^2}{\Omega^2}\right]^{-0.5}$ и для

одномерной $\beta = \beta_e \pm \beta_p / \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}$ отличаются только разными множителями при β_p , причем вид функций множителя от частоты входного сигнала качественно не меняется, и следовательно качественные выводы обеих моделей будут одинаковы.

Коэффициент усиления оценивался по формуле⁵

$$G(z) = 8.69\beta_p z \operatorname{Im} \left[1 + \frac{T^2}{\Omega^2} \right]^{-0.5} . \quad (12)$$

В п.4.2 представлены результаты линейной теории. Параметры среды выбраны близкими к параметрам, использованным в работе⁷: потенциал пучка 10кВ, плазменная частота среды 4.19ГГц, параметр затухания 4.5ГГц, ширина вакуумного зазора (g) 40мм, продольная (вдоль Oz) длина 390мм, плотность тока 0.3А/см². Рассматривались корни трансцендентного уравнения (10), соответствующее наибольшему инкременту.

На Рис. 10а показано, что настройкой отношения величины пролетного канала и толщины среды можно добиться как узкополосной, так и широкополосной зависимости коэффициента усиления от частоты. На Рис. 10б показано, что подбором параметров модели можно добиться слабого изменения коэффициента усиления почти на целой октаве по частоте. В данном случае это достигалось не только подбором геометрических размеров, но и увеличением втрое параметра затухания в среде, что можно воспринимать как уменьшение добротности, что в свою очередь приходится компенсировать увеличением на порядок плотности тока пучка.

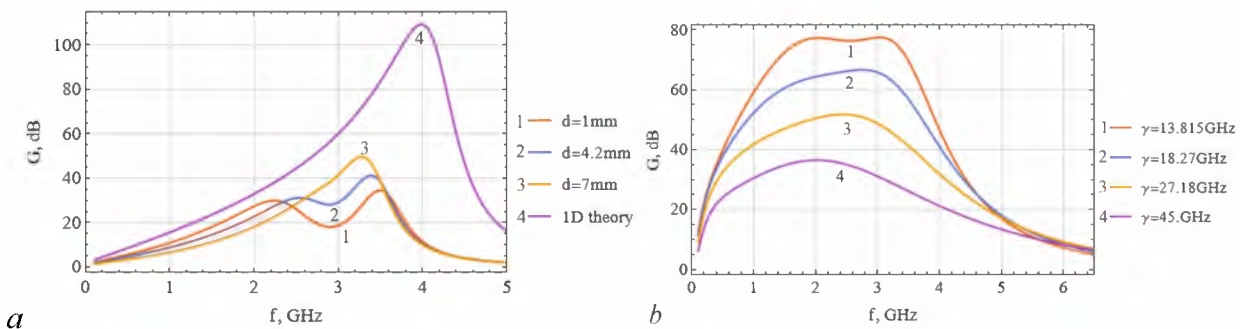


Рис. 10. Зависимости коэффициента усиления от рабочей частоты. *a* – при $b=1.5\text{mm}$, $j=0.3\text{A/cm}^2$; *b* – при потенциале пучка 5кВ, $j=3\text{A/cm}^2$, $d=1.875\text{mm}$.

В п. 4.3 описано численное моделирование при указанных выше параметрах. В соответствии с теоретической моделью, для моделирования однородных по оси x полей в планарной структуре использовалась модель (см. Рис. 11а) конечной ширины по оси x с граничными условиями типа «магнитная стенка» ($H_t=0$). Изменение ширины модельной системы по оси x не влияет на исследуемые режимы. Т.е. структура на Рис. 11а с точки зрения моделирования эквивалентна моделям на Рис. 9а и б.

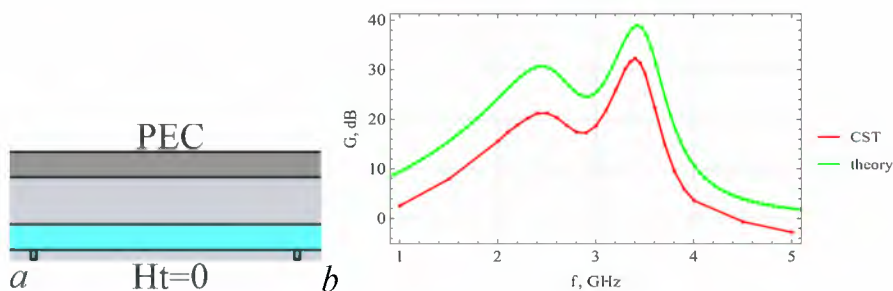


Рис. 11. *a* Первая модельная система численного моделирования; *b* зависимость коэффициента усиления от частоты модуляции по теории и численному эксперименту.

Самосогласованное численное моделирование проводилось в CST Particle Studio во временной области по методу FIT¹⁷. Для описания среды с частотной зависимостью ДП использовалась реализованная в пакете модель среды Друде.

На Рис. 11b представлена зависимость коэффициента усиления от частоты модуляции. Коэффициент усиления в численном эксперименте оценивался как $20\lg\left|\frac{i_{\text{max of collector}}}{i_{\text{max of cathode}}}\right|$ в линейном режиме работы. Видно, что результаты теории и численного эксперимента качественно совпадают.

Также была рассмотрена модель (см. правую часть Рис. 12a), эквивалентная наличию множества пролетных каналов в среде. Пучки (с такой же как в предыдущей модели геометрией) разделены слоями среды с дисперсией Друде толщиной 15мм. В моделировании рассматривается период структуры, «вырезанный» посередине блоков среды. Вследствие периодичности системы и взаимной нейтрализации вихревых токов от соседних пучков на вертикальных границах используются граничные условия – «магнитные стенки». Граничные условия по оси x такие же как ранее.

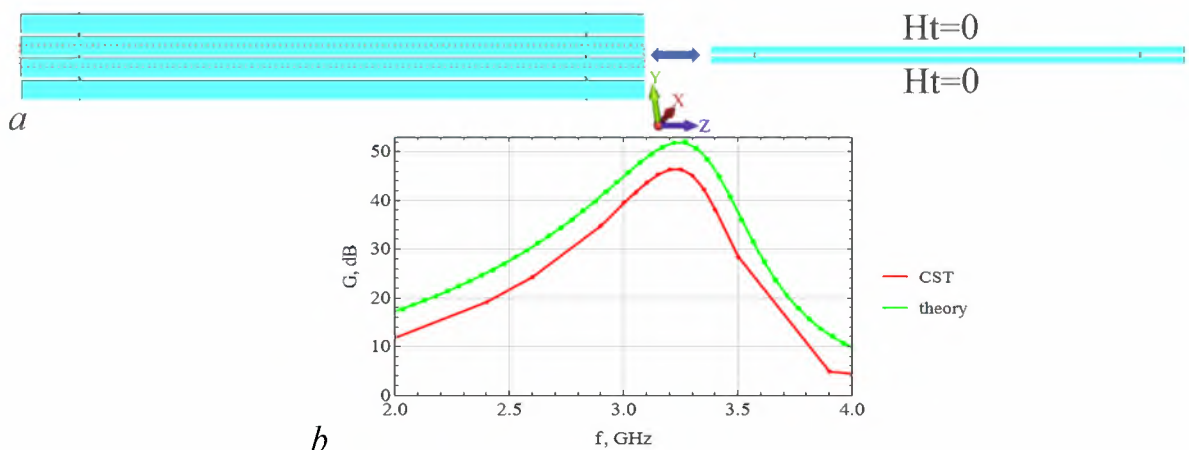


Рис. 12. *a* Вторая модельная система численного моделирования; *b* зависимость коэффициента усиления от частоты модуляции по теории и моделированию.

На Рис. 12b представлена зависимость коэффициента усиления от частоты модуляции для этой модели. Как и ожидалось по результатам линейной теории, увеличение толщины среды приводит к наличию только одного максимума.

Отметим, что в одномерной теории предполагаются однородные в поперечном сечении и строго продольные поля, в то время как в моделировании можно говорить о том, что они поверхностные и имеют ненулевые поперечные компоненты электрического поля. Тем не менее качественное описание особенностей поведения инкремента нарастания возмущений тока: плавный рост с увеличением частоты и достижение максимального значения в окрестности частоты на которой $\text{Re}\epsilon_{\text{eff}} = 0$ (см.

¹⁷ Marklein, René. "The finite integration technique as a general tool to compute acoustic, electromagnetic, elastodynamic, and coupled wave fields." Review of radio science (2002): 201-244.

Рис. 10b и Рис. 11b), а затем спад с ростом частоты – сохраняется как в одномерной теории, так и в планарной, причем результаты последней близки к результатам моделирования (см. Рис. 11b и Рис. 12b).

Таким образом можно сформулировать следующую иерархию моделей для резистивного усилителя. Одномерная модель позволяет оценить влияние параметров среды на группировку пучка и определить частотный диапазон усиливаемого сигнала. Планарная модель дополнительно позволяет сделать предварительный выбор геометрии (для заданного типа топологии), а также оценить влияние размеров элементов и их взаимного отношения. Численное моделирование позволяет раскрыть детали физики взаимодействия (пространственную картину распределения полей, группировки пучка).

В п. 4.4 сформулированные основные выводы к Главе 4.

В **Заключении** сформулированы основные выводы по работе.

Основные результаты работы

1. На основе представленного в главе 1 материала была развита линейная и нелинейная теория резистивного усилителя на основе волнового метода Овчарова-Солнцева. Во всех рассмотренных моделях учитывался пространственный заряд, поскольку именно медленная волна пространственного заряда – волна с отрицательной энергией – является нарастающей при резистивной неустойчивости.

2. В рамках модифицированного волнового метода Овчарова-Солнцева показано [1, 2, 5, 7-14], что использование сред с ненулевой проводимостью позволяет заметно сократить длину прибора и/или улучшить группировку пучка, и, следовательно, коэффициент усиления.

3. Установлено, что использование среды с комплексной диэлектрической проницаемостью при создании гибридов резистивного усилителя с известными приборами позволяет увеличить выходные характеристики. В случае гибрида с фото-ЛБВ показана возможность существенного увеличения эквивалентного сопротивления по сравнению с классической фото-ЛБВ с той же полной длиной [3]. В случае гибрида клистрона с распределенным взаимодействием и резистивного усилителя (среда между распределенными резонаторами) можно получить большее усиление сигнала при меньшей длине прибора в сравнении с обычным клистроном с распределенным взаимодействием [4].

4. Выявлено, что в планарных моделях резистивного усилителя можно не только получить достаточно высокие коэффициенты усиления, но и благодаря хорошему качественному совпадению с простыми теориями резистивного усилителя, последние применимы для первичных оценок при проектировании реальных приборов [6].

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Фунтов А.А.** К нелинейной теории взаимодействия электронных потоков с высокочастотными полями в средах с комплексной проводимостью // Известия РАН. Серия Физическая, 2019, том 83, № 1, с. 58–61.

2. **Фунтов А.А.** О нелинейной теории двухрезонаторного клистрона с пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 4. С. 414–424.
3. **Фунтов А.А.** О теории гибрида лампы бегущей волны с фотокатодом и усилителя с комплексной диэлектрической проницаемостью // Известия РАН. Серия Физическая, 2021, том 85, № 1, с. 98–105.
4. **Фунтов А. А.** О теории клистрона с распределенным взаимодействием и пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 5. С. 765–774.
5. **Фунтов А. А.** О теории гибрида ЛБВО и усилителя с комплексной диэлектрической проницаемостью // Известия вузов. ПНД. 2023. Т.31, №4, с. 452-468.
6. **Титов В. Н., Фунтов А. А.** О планарных моделях резистивного усилителя (теория и моделирование) // Известия вузов. ПНД. 2025. Т.33, № 6. 13 с (опубликована онлайн, DOI: 10.18500/0869-6632-003173).
7. **Трубецков Д. И., Чижмотря Н. В., Фунтов А. А.** Забытые приборы возвращаются. Часть 1. Усиление и шумы в системах «электронный поток – электромагнитные поля в диэлектриках и метаматериалах» // Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы научно-технической конференции, посвящённой 60-летию АО «НПП «Алмаз». - Саратов: Изд-во ООО «Научная книга» – 2017. – С. 7-10. - 196с.
8. **Титов А. В., Трубецков Д. И., Фунтов А.А.** Волновой метод Овчарова-Солнцева в теории нетрадиционных СВЧ приборов // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В. А. Солнцева 2017». Москва – 2017. – С. 5-6. – 92с.
9. **Фунтов А.А.** Лампы на поглощении и классические приборы с использованием метаматериалов // Материалы XVII Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, 5–10 февраля 2018, Саратов. - Саратов: ООО «Издательский центр «Наука» – 2018. – С.40-43. -115с.
10. **Фунтов А.А.** О нелинейной теории двухрезонаторного клистрона с пространством дрейфа в виде среды с комплексной диэлектрической проницаемостью // Материалы XII международной школы-конференции "хаотические автоколебания и образование структур" (ХАОС-2019) (Саратов, 01-06 октября 2019 г.). - Саратов: ООО "Издательский центр "Наука" – 2019. – С. 44-45. -122с.
11. **Фунтов А. А.** О гибриде лбв и усилителя с комплексной диэлектрической проницаемостью // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XVI Всерос. конф. молодых ученых. - Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2021. – С. 193-194. - 228с.
12. **Фунтов А.А.** Программа расчета выходных характеристик гибрида ЛБВО и усилителя с комплексной диэлектрической проницаемостью по линейной теории. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023662976 от 18.06.2023
13. **Фунтов А.А.** Программа расчета выходных характеристик гибрида ЛБВО и усилителя с комплексной диэлектрической проницаемостью по волновому методу Овчарова-Солнцева. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023662975 от 18.06.2023
14. **Фунтов А.А.** Программа расчета выходных характеристик пролетного клистрона с пространством дрейфа, обладающим комплексной диэлектрической проницаемостью по волновому методу Овчарова-Солнцева. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023662974 от 18.06.2023