На правах рукописи

ПЕТРИК Алексей Георгиевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СЖАТОМ СОСТОЯНИИ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

01.04.04 – Физическая электроника

А в т о р е ф е р а т диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Саратов – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А."

Научный руководитель	
по специальности 05.13.18:	доктор физико-математических наук, профессор,
	Храмов Александр Евгеньевич
Научный руководитель	
по специальности 01.04.04:	доктор физико-математических наук, доцент,
	Куркин Семен Андреевич
Официальные оппоненты:	Комаров Дмитрий Александрович
	доктор технических наук,
	АО НПП "Торий", г. Москва,
	заместитель генерального директора
	по научной работе
	Шеин Александр Георгиевич
	доктор физико-математических наук,
	профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский
	государственный технический университет»,
	профессор кафедры "Физика"
Ведущая организация:	Саратовский филиал ФГБУН
	"Институт радиотехники и электроники
	им. В.А. Котельникова РАН"

Защита состоится "29" ноября 2018 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.08 при ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." и на сайте www.sstu.ru.

Автореферат разослан "___" ____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

С.В. Астахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Исследования, направленные на изучение динамики релятивистских электронных потоков (РЭП), представляют большой интерес, который обусловлен их важностью с фундаментальной и практической точек зрения. В частности, РЭП широко используются в источниках электромагнитного излучения – виркаторах.

В основе механизма генерации виркаторов лежат процессы формирования и динамики нестационарного виртуального катода (ВК), который представляет собой плотный электронный сгусток, отражающий часть электронного потока. Перспективной модификацией виркатора является виркатор с сжатым состоянием пучка (ССП), которое, фактически, является распределенным в пространстве ВК и образуется при взаимном замедлении эмитируемого с катода и отраженного от ВК пучков. ССП характеризуется малой скоростью и большой плотностью электронов, значительно превышающей плотность электронов в классическом ВК. С точки зрения СВЧ электроники, интерес к исследованию ССП связан с тем, что данный плотный сгусток электронов способен накапливать большую потенциальную энергию и является активной средой для генерации СВЧ и суб-ТГц излучения.

Процессу формирования ССП в виркаторах посвящены работы А.М. Игнатова, В.П. Тараканова, А.Е. Дубинова, В.Д. Селемира, А.А. Короновского, С.А. Куркина, А.Е. Храмова, С.Я. Беломытцева, С.Д. Коровина, С.Д. Полевина, И.В. Пегель, А.Н. Диденко, С.К. Birdsall, J. Benford, D.J. Sullivan, V.L. Granatstein и др. Однако, ряд вопросов исследован недостаточно.

Так, не проведен анализ влияния геометрических параметров системы на динамику и характеристики ССП. Не исследована возможность развития пучково-плазменной неустойчивости (ППН) в двухпучковой системе при взаимодействии дополнительного РЭП с ССП. Не было изучено влияние электродинамических структур на динамику ССП, в частности, диэлектрических вставок в пространстве взаимодействия РЭП. Все вышесказанное определило актуальность настоящей работы и следующие из неё цель и задачи.

Целью диссертационной работы является развитие методов математического моделирования, создание моделей, алгоритмов, комплекса программ и разработка методов анализа физических процессов, приводящих к возникновению ССП в РЭП в системах виркаторного типа, исследование развития ППН в двухпучковой системе при взаимодействии дополнительного РЭП с ССП, изучение влияния диэлектрических вставок в волноводе на динамику ССП.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие научные **задачи**:

- 1. Разработка 1.5D самосогласованной квазистатической математической модели виркатора с электронным пучком в режиме ССП.
- 2. Разработка 3D модели двухсекционного релятивистского виркатора с пучком в режиме ССП. Создание комплекса программных модулей для обработки результатов 3D электромагнитного моделирования.
- 3. Анализ влияния геометрических параметров системы на механизмы развития ССП и генерацию СВЧ излучения. Анализ влияния пушечной части, формирующей РЭП, на механизмы развития ССП в РЭП.
- 4. Математическое моделирование возможности развития ППН при взаимодействии высокоэнергетического РЭП с пучком в режиме ССП.
- 5. Разработка и 3D математическое моделирование нового типа виркатора с диэлектрической вставкой с реализацией эффекта ССП в РЭП в пространстве взаимодействия без скачка радиуса.

Предметом исследования является неустойчивость, приводящая к формированию ССП и развивающаяся в РЭП в приборах с ВК, состоящих из двух цилиндрических камер дрейфа с различными радиусами или из камеры дрейфа с диэлектрической вставкой.

Научная новизна работы соответствует пунктам 1-5 паспорта специальности 05.13.18; пунктам 3 и 5 паспорта специальности 01.04.04 и заключается в следующем:

- 1. Разработана 1.5D самосогласованная математическая модель двухсекционного виркатора, основанная на методе крупных частиц, и реализующий ее программный комплекс для анализа динамики электронного пучка в режиме ССП. Впервые продемонстрировано, что результаты моделирования в 1.5D модели качественно схожи с результатами моделирования в рамках 2D и 3D моделей, однако, моделирование с использованием 1.5D модели в среднем в 10-15 раз быстрее (пп. 1, 3-5 паспорта специальности 05.13.18 и пп. 3 паспорта специальности 01.04.04).
- 2. Разработана 3D модель двухсекционного виркатора, и проведено 3D численное электромагнитное моделирование динамики РЭП в режиме ССП (пп. 2, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).

- 3. Разработана 3D модель двухсекционного виркатора с двумя РЭП, и проведено численное электромагнитное моделирование динамики двух РЭП в данной системе (пп. 2, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).
- 4. Предложена новая конструкция виркатора с РЭП в режиме ССП, названная «вирпертроном», в которой формирование ВК обеспечено наличием в камере дрейфа диэлектрической вставки. Для вирпертрона разработана модель и проведено 3D численное электромагнитное моделирование физических процессов в РЭП в режиме ССП (пп. 2, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).
- 5. Разработаны алгоритмы и комплекс программных модулей для обработки результатов 3D электромагнитного моделирования, а именно: модуль расчета статистических характеристик пучка, модуль расчета усредненной эффективной плазменной частоты, модуль построения распределений частиц каждого пучка в системе в двумя пучками (пп. 4 паспорта специальности 05.13.18).
- 6. Впервые в рамках 3D численного электромагнитного моделирования показано, что за счет уменьшения радиуса первой камеры дрейфа и толщины трубчатого РЭП возможно увеличить в 2 раза значение эффективной плазменной частоты пучка в области ССП и, как следствие, частоту генерации СВЧ излучения (пп. 5 паспорта специальности 01.04.04).
- 7. Впервые показано, что в двухсекционной системе со скачком радиуса плазменная частота в области ССП в среднем в 2 раза выше, чем в системе без скачка радиуса, в которой ССП не формируется. Кроме того, уменьшая ток пучка, можно добиться дополнительного роста эффективной плазменной частоты в области ССП в 1.5 раза (пп. 5 паспорта специальности 01.04.04).
- 8. Впервые показана возможность развития ППН при взаимодействии РЭП с однокомпонентной горячей электронной плазмой в виде ССП. Было продемонстрировано, что в рассматриваемой двухсекционной виркаторной системе с двумя трубчатыми пучками развивается ППН, что приводит к высокочастотным колебаниям пространственного заряда в дополнительном РЭП. Обнаруженный эффект может быть использован для существенного увеличения частоты генерации, а также для создания усилителя виркаторного типа (пп. 5 паспорта специальности 01.04.04).
- 9. Математическое моделирование вирпертрона продемонстрировало его

работоспособность и заложенные в его концепцию новые функциональные возможности: управление частотами и амплитудами спектральных компонент СВЧ излучения с помощью регулирования значений диэлектрической проницаемости вставки (пп. 5 паспорта специальности 01.04.04).

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

- 1. Показано, что результаты математического моделирования динамики ССП в рамках 1.5D модели качественно схожи с результатами моделирования в рамках 3D модели, однако, моделирование с помощью 1.5D кода в среднем в 10-15 раз быстрее.
- 2. В системе 3D моделирования CST Particle Studio (CST PS) разработаны модели для исследования процессов развития и динамики ССП в РЭП, состоящие из двух цилиндрических камер дрейфа с различными радиусами или из пространства взаимодействия с диэлектрической вставкой. Разработаны алгоритмы и комплекс программных модулей для обработки результатов моделирования.
- 3. Взаимодействие РЭП и однокомпонентной горячей электронной плазмы в виде ССП приводит к развитию эффекта пучково-плазменной неустойчивости. В рамках 3D математического моделирования обнаружено, что ППН в двухсекционной виркаторной системе с двумя трубчатыми пучками приводит к высокочастотным колебаниям пространственного заряда в дополнительном РЭП.
- 4. Предложена новая модификация виркатора с РЭП в режиме ССП, названная вирпертроном, отличающаяся тем, что формирование ВК обеспечено наличием в камере дрейфа диэлектрической вставки. Математическое моделирование показало, что величина диэлектрической проницаемости вставки обеспечивает управление частотными и шумовыми характеристиками генерации.
- 5. В рамках 3D математического моделирования двухсекционной системы показано, что при эквивалентном значении тока инжектируемого РЭП с реализацией ССП плазменная частота в области ССП в среднем в 2 раза больше, чем в системе без ССП. Уменьшая радиус первой камеры и толщину пучка можно добиться дополнительного 2-кратного увеличения эффективной плазменной частоты в области ССП.
- 6. В рамках 3D математического моделирования двухсекционной системы обнаружено, что в зависимости от расстояния «катод-анод» L_{KA}

и, как следствие, тока пучка – реализуется два режима формирования ССП: при $L_{KA} < L_c$ первый ВК формируется вблизи анодной сетки, а второй ВК у границы между камерами дрейфа, при $L_{KA} > L_c$ первый ВК формируется на границе между секциями, а второй ВК – вблизи анодной сетки.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

– Научная значимость обусловлена разработанными в рамках данной диссертационной работы математическими моделями, которые позволяют исследовать неустойчивость, приводящую к формированию ССП в РЭП. Показана возможность развития эффекта ППН в двухпучковой системе при взаимодействии РЭП и однокомпонентной горячей электронной плазмы в виде ССП. Предложен новый прибор виркаторного типа с РЭП в режиме ССП – «вирпертрон», в котором формирование ВК обеспечивается наличием в волноводе диэлектрической вставки.

– Практическая значимость определяется разработанными при выполнении данной работы программами и полученными результатами моделирования пучка в режиме ССП. Развитие ППН приводит к высокочастотным колебаниям пространственного заряда, что позволяет разработать методы значительного увеличения частоты генерации и усиления мощных электромагнитных сигналов в виркаторах. Обнаруженные эффекты в вирпертроне могут быть полезны для широкого спектра приборов, где требуется двухчастотное высокомощное СВЧ излучение, в сферах связи и радиолокации.

При выполнении диссертационной работы были разработаны компьютерные программы, которые защищены свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ Российской Федерации. Результаты, полученные в ходе написания диссертации, были использованы при выполнении ряда научных задач по следующим НИР: Госзадание (№ 3.6723.2017/БЧ, № 3.859.2017/ПЧ), Российский научный фонд (№ 14-12-00222), Российский фонд фундаментальных исследований (№ 15-32-20299, № 15-52-04018, № 17-52-04097), гранты Президента РФ (№ МК-5426.2015.2, № МК-1163.2017.2).

Личный вклад. Все основные результаты, выводы, положения, выносимые на защиту, на которых основана диссертация, получены лично автором. В совместных работах автору принадлежит ведущая роль в разработке общей концепции работы, её структуры, методик исследований, создании математических моделей изученных явлений и программ на их основе. Задачи формирования ВК за счет наличия в камере дрейфа диэлектрической вставки и возможности развития эффекта ППН при взаимодействии РЭП и однокомпонентной горячей электронной плазмы в виде ССП были поставлены и решались совместно с профессором А.Е. Дубиновым (ВНИИЭФ, Саров).

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, которые строго обоснованы в научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований. Достоверность результатов также подтверждается их соответствием современным физическим представлениям, верификацией при разнообразном тестировании, непротиворечивостью достоверным известным результатам, сопоставлением различных подходов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации использовались при выполнении ряда НИР (в рамках грантов РФФИ, РНФ, Президента РФ, Минобрнауки), а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях: "Нелинейные дни в Саратове для молодых" (Саратов 2014); "XVI Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот" (Саратов 2015); "Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов. Всероссийская школаконференция молодых ученых, аспирантов и студентов" (Саратов 2015); "XV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова" (Москва 2015); "25-я и 26-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь 2015 и 2016); "11-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций, PT-2015»" (Севастополь 2015); "III Всероссийская научая молодежная конференция «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники»" (Уфа 2015); "17th IEEE International Vacuum Electronic Conference" (IVEC 2016, Monterey, California, USA); "XVI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова" (Москва 2016); "Международная научно-практическая конференция ICIT-2016 «Информационно-коммуникационные технологии в науке, образовании и производстве»" (Саратов 2016); "6th Euro-Asian Pulsed Power Conference with the 21st International Conference on High-Power Particle Beams and the 15th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation" (Estoril, Portugal, 2016); "11 Международная школа «Хаотические автоколебания и образования структур»" (Саратов 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ. Из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящие в базы цитирования Web of Science и Scopus; 3 публикации в трудах конференций, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus; 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ; 3 свидетельства о регистрации программного обеспечения; 12 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 117 наименований. Работа изложена на 133 страницах и содержит 38 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, описано текущее состояние проблемы, обоснованы актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и методы исследования, приведены основные результаты работы, её фундаментальная и практическая ценность, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и основных публикациях.

Объектом исследований в диссертации является модель виркатора (рис. 1а), в которой трубчатый электронный поток 2 инжектируется с катода 1 под отрицательным потенциалом и ускоряется за счет анода 3, имеющего нулевой потенциал, как у камер 4 и 5. Инжектируемый пучок проходит камеру 4 и переходит в камеру 5 с большим радиусом, в которой со временем накапливается пространственный заряд, что приводит к возникновению на границе между камерами потенциального барьера и началу формирования виртуального катода (ВК на рис. 1а). Частицы, преодолевшие потенциальный барьер ВК, попадают на коллектор 6. Система находится во внешнем фокусирующем сильном продольном однородном магнитном поле В. Инжектируемый и отраженный от ВК пучки взаимозамедляют друг друга и демонстрируют сложную динамику в камере 4 между ВК и анодной сеткой 3. ВК становится распределенным в пространстве и распространяется в сторону катода, пока не достигнет анода 3. Такой распределенный ВК с пиком плотности возле анода 3 соответствует режиму сжатого состояния пучка (рис. 16). Механизм генерации в виркаторе с ССП заключается в том, что частицы в области локального максимума плотности пространственного заряда на левой границе ССП демонстрируют колебательную динамику большой частоты, что приводит к генерации высокочастотного электромагнитного излучения, которое усиливается, проходя через ССП и выводится из пространства взаимодействия через выходной волновод 7.

Первая глава диссертации посвящена описанию и разработке аналитической и численной 1.5D самосогласованной математической модели виркатора с электронным потоком в режиме сжатого состояния, а также



Рис. 1: Схема двухсекционного виркатора с пучком в режиме ССП: 1 – катод, 2 – трубчатый пучок, 3 – анодная сетка, 4, 5 – камеры дрейфа, 6 – коллектор, 7 – вывод мощности в виде коаксиального волновода, BK – виртуальный катод, B – продольное однородное фокусирующее магнитное поле.

анализу динамики пучка и важным особенностям численной реализации данной модели. Предложенная модель предназначена для проведения оценочных предварительных расчетов, необходимых чтобы сузить диапазон входных параметров 3D модели, развитой в главе 2, и сократить объем вычислений.

Исходные допущения модели: потенциал рассчитывается в двухмерном пространстве; движение частиц одномерно; частицы имеют начальную скорость v_0 и с интервалами времени Δt инжектируются в пространство взаимодействия. Камеры виркатора имеют длины L_1 , L_2 и радиусы R_1 , R_2 . Общая длина исследуемой модели $L = L_1 + L_2$, радиус большей камеры дрейфа $R_2 = 0.145L$, меньшей $R_1 = 0.68R_2$, длина первой камеры $L_1 = 0.7L$ и второй $L_2 = 0.3L$. При моделировании используется "метод крупных частиц".

В уравнениях модели используются следующие безразмерные величины: координата z, время t, скорость ϑ , потенциал φ , напряженность \vec{E} поля пространственного заряда и плотность заряда ρ . Размерные величины обозначены штрихом и связаны с безразмерными следующим образом:

$$z' = Lz, \quad r' = Lr, \quad t' = tL/\vartheta_0, \quad \vartheta' = \vartheta_0\vartheta, \\ \varphi' = \varphi\vartheta_0^2/\eta_0, \quad E' = E\vartheta_0^2/L\eta_0, \quad \rho' = \rho_0\rho,$$
(1)

где $\eta_0 = e/m_e$ – удельный заряд электрона, ϑ_0 , ρ_0 – невозмущенные скорость и плотность заряда пучка на входе в систему, соответственно, L – длина пространства взаимодействия.

Рассмотрим основные уравнения 1.5D модели виркатора с ССП. В безразмерных величинах (1) релятивистские уравнения движения заряженных частиц записываются следующим образом:

$$\frac{d^2 z_j}{dt^2} = E_z \left[1 - \beta_0^2 \left(\frac{d z_j}{dt} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}, j = 1, \dots N_0,$$
(2)

где N_0 – число всех крупных частиц в системе. Поля пространственного заряда определялись решением уравнением Пуассона, которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = \alpha^2\rho, \quad \alpha = L\left(\frac{|\rho_0|}{V_0\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}},\tag{3}$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, а V_0 – ускоряющее напряжение пучка, α – безразмерный параметр пропорциональный току пучка и длине пространства взаимодействия ($\alpha \sim L\sqrt{I}$).

Уравнение Пуассона (3) решается при граничных условиях:

$$\varphi \Big|_{z=L_1}^{r>R_1} = 0, \quad \varphi \Big|_{z>L_1}^{r=R_2} = 0, \quad \varphi \Big|_{z=L}^{r} = 0,$$

$$\varphi \Big|_{z=0}^{r} = 0, \quad \varphi \Big|_{z\leq L_1}^{r=R_1} = 0, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0,$$
(4)

которые определяются тем, что пространство дрейфа пучка состоит из 2 идеально проводящих цилиндрических камер с различными радиусамм под нулевым потенциалом, и аксиальной симметрией исследуемой модели. Продольная компонента напряженности электрического поля пространственного заряда $E_z = -\partial \varphi / \partial z$.

Для вычисления в узлах сетки плотности пространственного заряда $\rho_{i,r}$, входящей в уравнение Пуассона в конечно-разностном виде, необходимо воспользоваться снижающим сеточный шум методом взвешивания крупных частиц (метод "частица в ячейке"). Пространство исследуемой системы покрывается вычислительной сеткой с шагом по продольной координате $\Delta z = 1/(N_z - 1)$ и по радиальной координате $\Delta r = 1/(N_r - 1)$, N_z и N_r – число узлов заданной сетки по продольной и радиальной координате соответственно, причем $i = 0, \ldots N_z$ и $j = 0, \ldots N_r$. В узлах данной сетки будем вычислять значения функций потенциала $\varphi_{i,j}$ и плотности заряда $\rho_{i,r}$, которые заданы в дискретном пространстве и времени. Плотность пространственного заряда в узле сетки (i, r), т.е. в точке с координатой $i\Delta z, r$ вычисляется по формуле:

$$\rho(i\Delta z, r) = \frac{1}{n_c} \sum_{n=1}^{N_0} \Omega(z_n - i\Delta z), \quad \Omega(\sigma) = \begin{cases} 1 - |\sigma| / \Delta z, \ |\sigma| \le \Delta z, \\ 0, \ |\sigma| > \Delta z \end{cases}$$
(5)

где n_c – параметр вычислительной схемы, равный числу частиц на ячейку сетки в момент инжекции, (z_n, r) – координата *n*-ой частицы, $\Omega(\sigma)$ – кусочно-линейная функция, определяющая вклад частицы в узел сетки. Каждая частица распределяется только между ближайшими узлами вычислительной сетки. Пространственный заряд вычисляется как суммарный вклад всех ближайших частиц в узел сетки.

После того, как была выполнена процедура взвешивания во всех узлах вычислительной сетки, производится расчет распределения потенциала с помощью уравнения Пуассона (3), записанного в конечно-разностном виде (пятиточечная разностная схема) с граничными условиями (4):

$$\frac{1}{j\Delta r}\frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j-1}}{2\Delta r} + \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{\Delta r^2} + \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{\Delta z^2}$$
(6)
= $\alpha^2 \rho_{i,r}, \quad i = 1, \dots N_z - 1, \quad j = 1, \dots N_r - 1.$

Система линейных алгебраических уравнений (6) решается методом последовательных приближений.

Процесс эволюции ССП продемонстрирован с помощью построенных в последовательные моменты времени распределений частиц пучка в плоскости (z, ϑ_z) и зависимости плотности заряда в пучке от продольной координаты (рис. 2). Первоначально ВК формируется в области скачка радиуса между первой и второй камерами дрейфа. Благодаря отражению частиц от ВК, на протяжении длины первой камеры дрейфа формируется двухпотоковое состояние, характеризующееся сложной динамикой, при которой эмитируемый с катода и отраженный от ВК пучки взаимозамедляют друг друга, увеличивая провисание потенциала в первой камере виркатора. На рис. 2 видно как пучки постепенно смыкаются вдоль оси скоростей. Как следствие, растет плотность пространственного заряда в области первой трубы дрейфа. Волна переключения от двухпотокового состояния к ССП распространяется от ВК к эмиттеру. Со временем ВК доходит до области инжекции, и в системе устанавливается ССП (рис. 2г). При этом в пространстве взаимодействия в области ССП формируется область с повышенной плотностью пространственного заряда. Генерация электромагнитного излучения происходит за счет колебательного движения заряженных частиц в области локального максимума плотности пространственного заряда на левой границе ССП.

Результаты моделирования показали, использование 1.5D модели позволяет увеличить скорость моделирования по сравнению с 2D и 3D моделями в 10-15 раз и хорошо подходит для получения предварительных результатов, которые могут быть использованы для задания входных параметров



Рис. 2: Мгновенные распределения частиц пучка в координатах (z, ϑ_z) и зависимости плотности заряда в пучке от продольной координаты (z, q), демонстрирующие эволюцию формирования ССП: (a) $t = 4000\Delta t$, (b) $t = 8000\Delta t$, (e) $t = 12000\Delta t$, (г) $t = 16000\Delta t$, где $\Delta t = \Delta z/10$.

системы в 3D коде, в частности, рабочего тока, геометрии прибора и радиуса пучка. Схема разработанного программного комплекса показана на рис. 3.

Во второй главе диссертации представлены результаты трехмерного численного моделирования РЭП в сжатом состоянии. Рассмотрено два варианта моделей: модель двухсекционного виркатора с упрощенной пушечной частью и аналогичная модель, в которой моделировался источник электронов и анодная сетка.

Схема исследумой системы аналогична представленной на рис. 1. Моделирование проводилось с использованием лицензионного программного



Рис. 3: Схема разработанного программного комплекса.

обеспечения CST Particle Studio (CST PS), предназначенного для моделирования динамики заряженных частиц в электромагнитных полях. Для выполнения всех поставленных задач были разработаны комплексы программных модулей для обработки данных трехмерного моделирования. Моделирование процессов в CST PS базируется на методе "крупных частиц". Расчет собственных электромагнитных полей пучка и электродинамических систем основан на решении уравнений Максвелла в трех измерениях:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} = 0, \\ \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \\ \vec{B} = \mu \vec{H}, \\ \vec{D} = \varepsilon \vec{E},$$
(7)

где электрический ток \vec{J} , диэлектрическая ε и магнитная μ проницаемости среды считаются известными функциями пространства и времени.

В среде CST PS (PIC-модуль) для численного решения уравнений Максвелла используется метод конечных разностей во временной области FDTD (Finite Difference Time Domain), основанный на дискретизации уравнений Максвелла. Релятивистское уравнение движения заряженной частицы имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{q}{m_0 c} \left(\vec{E} + \vec{\vartheta} \times \vec{B} \right), \\ \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \vec{\vartheta}, \\ \vec{u} = \frac{\vec{p}}{m_0 c} = \frac{m(\vartheta)\vec{\vartheta}}{m_0 c} \tag{8}$$

Сетки полей E и H смещены друг относительно друга на половину шага дискретизации времени и по каждой из пространственных переменных. Конечно-разностные уравнения Максвелла позволяют определить поля Eи H на данном временном шаге на основании известных значений полей на предыдущем. Данный итерационный процесс положен в основу расчета методом FDTD.



Рис. 4: (а) – вид сбоку исследуемой в CST PS модели с релятивистским пучком, здесь 1 – первая камера дрейфа с меньшим радиусом, 2 – вторая камера с большим радиусом, 3 – кольцевой эмиттер (плоскость инжекции электронного потока), 4 – выходной коаксиальный волноводный порт; (б) – разбиение пространственной сетки в плоскости (z, y).

Для исследования влияния геометрии виркатора и геометрии пучка на характеристики ССП и частоту генерируемых СВЧ колебаний была использована модель с упрощенной пушечной частью (рис. 4), в которой предполагается, что сформированный трубчатый электронный поток с заданными током и энергией инжектируется в эквипотенциальное пространство дрейфа. Ток пучка был выбран равным 15 кА, начальная энергия эмитируемых частиц 500 кэВ, система находится в продольном фокусирующем магнитном поле с индукцией 5 Тл.

Для оценки частоты генерации СВЧ излучения в виркаторе рассчитывалась эффективная плазменная частота (частота колебаний частиц, определяемая локальной плотностью пространственного заряда) в области ССП:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\langle \rho \rangle_{T,V} e}{m_{\text{pen}} \varepsilon_0}} \tag{9}$$

где e – заряд и $m_{\text{рел}}$ – релятивистская масса электрона; $< \rho >_{T,V}$ – плотность заряда, усредненная по объему пучка в пределах ССП и по времени после окончания переходного процесса в интервале от $t_1 = 20$ нс до $t_2 = 30$ нс (рассчитывается с помощью специального программного модуля).

Рассмотрим зависимость f_p от радиуса первой камеры R_1 (рис. 5а). С уменьшением R_1 от 20 до 8.5 мм и, как следствие, уменьшением расстояния между пучком и поверхностью камеры наблюдается рост значения плазменной частоты до величины ~ 20 ГГц при $R_1 = 8.5$ мм. Физически это объясняется тем, что с приближением пучка к проводящей поверхности усиливается влияние эффекта компенсации сил пространственного заряда (эффект редукции). Это позволяет существенно увеличить (более чем в 4 раза) плотность пространственного заряда в области ССП. Данный рост происходит до определенного критического значения, пока $R_1 > 8.5$ мм. При $R_1 \leq 8.5$ мм несмотря на сильное внешнее фокусирующее магнитное поле РЭП начинает оседать на стенках первой камеры дрейфа, что приводит к уменьшению величины накопленного пространственного заряда, а, следовательно, и f_p в области ССП. При $R_1 > 17$ мм происходит разрушение ССП.



Рис. 5: (a) — зависимость эффективной плазменной частоты f_p от радиуса первой секции дрейфа R_1 . Ток и начальная энергия пучка фиксированы и равны I = 7 кА и U = 500 кэВ, соответственно. Значения остальных параметров системы: $R_2 = 22$ мм, $L_1 = 130$ мм, $L_2 = 70$ мм, $R_b 1 = 6$ мм, $R_b 2 = 8$ мм. (б) — зависимость эффективной плазменной частоты f_p от толщины пучка Δr ($R_b 2 = 8$ мм и $R_1 = 9$ мм фиксированы).

Рассмотрим влияние толщины пучка $\Delta r = r_2 - r_1$ на величину f_p в области ССП (рис. 5б). Видно, что f_p при толщине пучка $\Delta r \ge 1$ мм уменьшается с ростом Δr практически линейно. При $\Delta r < 1$ мм f_p начинает быстро уменьшаться, что связано с дефокусировкой пучка за счет увеличения сил пространственного заряда при уменьшении толщины пучка. Следует также отметить, что при $\Delta r < 1$ мм ССП не формируется.

Показано, что за счет уменьшения R_1 и Δr значение f_p в области ССП можно увеличить примерно в 2 раза до величины ~ 20 ГГц.

При исследовании режимов формирования ССП использовалась аналогичная 3D модель двухсекционного виркатора в которой моделировались источник электронов и ускоряющая анодная сетка. В зависимости от расстояния «катод-анод» L_{KA} , которое определяет ток пучка, реализуется два режима формирования ССП: при $L_{KA} < L_c$ сначала формируется ВК вблизи анодной сетки, а затем – ВК у границы между камерами дрейфа; при $L_{KA} > L_c$ сначала формируется ВК на границе между секциями, а после – ВК вблизи анодной сетки, соответственно. Далее виртуальные катоды двигаются навстречу друг другу, формируя ССП.

На рис. 6 проиллюстрированы зависимости f_p от продольной координаты z для случая формирования ССП и для односекционного пространства дрейфа без ССП (кривые 1 и 2 на рис. 6). После сравнения двухсекционной системы с системой без скачка радиуса, когда ССП в системе не устанавливается, можно сделать вывод, что при эквивалентном значении

тока пучка в системе с ССП наблюдается практически двукратное увеличение f_p в области ССП.



Рис. 6: Зависимость усредненного по радиусу значения плазменной частоты к продольной координате для двухсекционного пространства взаимодействия с ССП (1) и односекционного виркатора без реализации ССП (2).

В третьей главе проведено математическое моделирование ППН при взаимодействии высокоэнергетического РЭП с электронной активной средой в виде ССП. Разработана схема нового типа виркатора с диэлектрической вставкой с реализацией эффекта ССП в РЭП в пространстве взаимодействия без скачка радиуса, проведено 3D электромагнитное моделирование данной схемы.



Рис. 7: Схема исследуемой системы (a) и реализация в виде 3D модели в CST PS в режиме пучково-плазменной неустойчивости (b). Система состоит из двух идеальных цилиндрических проводников конечной длины, которые обозначены как 1 и 2, имеют радиусы $R_1 = 15$ мм, $R_2 = 22$ мм и длину $L_1 = 88$ мм, $L_2 = 70$ мм соответственно. Толщина у пучков одинакова и равна $\Delta = 2$ мм. На рисунке изображены: 3 – внутренний трубчатый РЭП с током I_{b1} , который обеспечивает формирование ССП; 4 – дополнительный внешний трубчатый РЭП с током I_{b2} .

При исследовании ППН рассмотрено взаимодействие двух моноэнергетических РЭП с различными значениями начальной энергии частиц и внутренними радиусами $R_{b1} < R_{b2}$. Исследуемый виркатор проиллюстрирован на рис. 7. Внутренний вспомогательный пучок с радиусом R_{b1} имеет меньшую энергию, в нем формируется ССП – однокомпонентная плазма, которая играет роль активной среды. Внешний пробный высокоэнергетический пучок с радиусом R_{b2} дрейфует вдоль ССП и возбуждает волны пространственного заряда, которые имеют вихревую структура за счет вращения в магнитном поле (рис. 7б). Пушечная часть прибора не моделируется, а предполагается, что уже полностью сформированные кольцевые РЭП с заданными токами инжектируются в пространство дрейфа.

Эволюция ППН является довольно быстрым процессом: спустя несколько наносекунд после начала эмиссии можно наблюдать ярко выраженные колебания пространственного заряда в области ССП, а затем спустя 14 нс происходит срыв, и группировка электронов в сгустки разрушается; волны пространственного заряда зашумляются.



Рис. 8: (a) — эволюция функции распределения частиц по продольному импульсу, включающая как внешний, так и внутренний пучок в сжатом состоянии. (б) — зависимости инкремента развития неустойчивости (\bigcirc) и длины волны пространственного заряда (\triangle) от значения I_{b2} , которые были получены на линейной стадии развития ППН.

Временная эволюция функции распределения электронов по продольному импульсу показана на рис. 8а. С течением времени происходит сглаживание провала между двумя пиками (отмечены стрелками на рис. 8а), один из которых соответствует ССП, а другой – дополнительному РЭП. Такое поведение функции распределения является типичным для процесса релаксации электронного пучка при развитии ППН в электронно-ионной плазме.

На рис. 86 показана зависимость инкремента развития неустойчивости, фактически, коэффициента усиления прибора в линейном режиме, и длины возбужденной волны пространственного заряда от величины тока внешнего пучка I_{b2} . Увеличение I_{b2} приводит к уменьшению длины волны, пространственный инкремент развития ППН при этом возрастает.

Таким образом, развитие ППН приводит к высокочастотным колебаниям заряда в дополнительном РЭП (рис. 7б). Данный факт дает основание для создания методов увеличения частоты генерации и усиления мощных электромагнитных сигналов на основе исследованного эффекта.

В работе также была исследована предложенная совместно с профессором А.Е. Дубиновым новая схема виркатора, названного вирпертроном (от "vircator + permittivity"), с РЭП в режиме сжатого состояния, в котором формирование ССП обеспечивается наличием в камере дрейфа диэлектрической вставки.

Действительно, если пространство взаимодейстdия заполнить диэлектриком с проницаемостью ε и пролетным каналом для пучка, то предельный ток увеличится в ε раз благодаря уменьшению сил пространственного заряда в ε раз, что следует из уравнения Пуассона. Таким образом, если в пространство дрейфа без скачка радиуса добавить диэлектрическую вставку, то в области на границе между вставкой и вакуумом возможно формирование BK.



Рис. 9: (a) Схематическое изображение вирпертрона, размеры представлены в тексте. (б) Трехмерная модель вирпертрона в CST PS.

Для проверки работоспособности предложенной схемы вирпертрона было осуществлено 3D моделирование в среде CST PS (рис. 96). Часть пространства заполнена диэлектриком, в котором присутствует тонкий пролетный канал для электронов. К вирпертрону приложено однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией 3 Тл. В канал инжектируется цилиндрический трубчатый моноскоростной электронный пучок с постоянным током I = 2.5 кА и энергией электронов U = 200 кэВ. Моделирование проводилось при следующих геометрических параметрах системы: L_1 = 60 мм; $L_2 = 20$ мм; $R_1 = 5$ мм; $R_2 = 9$ мм; $R_3 = 15$ мм; $R_{1b} = 6$ мм; R_{2b} = 8 мм.

Динамика вирпертрона отличается от процессов, происходящих в традиционных магнитоизолированных виркаторах-редитронах. Известно, что в последних регистрируется одна характерная частота СВЧ-генерации f_{VC} , которая соответствует колебаниям ВК и определяется плазменной частотой пучка. В вирпертроне наблюдается двухчастотный режим СВЧгенерации: более низкая частота f_{VC} соответствует колебаниям ВК, а высокая f_{Ch} – черенковскому излучению. Последнее обусловлено тем, что средняя скорость электронов ССП превышает фазовую скорость электромагнитной волны в волноводе с диэлектрической вставкой.

На рис. 10 показаны режимы динамики пучка (а), зависимости генерируемых в вирпертроне частот от величины диэлектрической проницаемости вставки в первой камере ε (б), распределения частиц в пучке (в) и типичные спектры осцилляций E_z компоненты электрического поля (г). Когда величина параметра $\varepsilon \approx 1$ и $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$, система демонстрирует "классический" механизм формирования ВК, колебания которого приводят к генерации одночастотного сигнала (рис. 10, режим I). Условие, необходимое для генерации черенковского излучения, в данном случае не выполняется.

При наличии диэлектрической вставки, динамика пучка начинает существенно зависить от отношения тока пучка к критическому току. Когда $\varepsilon_{cr} < \varepsilon < \varepsilon_{ssb}$ (ε_{ssb} – величина диэлектрической проницаемости, при которой ток пучка становится равным критическому току первой области дрейфа), критический ток в первой области дрейфа меньше тока пучка, и в ней формируется ВК. Далее вторичный ВК формируется в пролетном пучке, преодолевшем первый ВК, и развивается ССП (рис. 10а, режим II). В данном режиме ССП плохо развит: распределение частиц демонстрирует практически полное отсутствие отраженных электронов в области ССП. Кроме того, в режиме II в спектре появляется вторая частотная составляющая f_{Ch} , которая соответствует черенковскому излучению.

Рассмотрим третий режим, при котором в системе развивается "классическое" ССП при $\varepsilon > \varepsilon_{ssb}$ (рис. 10а, режим III). Между второй и первой областями дрейфа формируется ВК, а затем от него в сторону, противоположную направлению инжекции электронного потока, начинает распространяться ССП. Спектр имеет характерный двухчастотный вид с максимальной амплитудой на частоте f_{Ch} , менее ярко выраженной частотой f_{VC} , и низким шумовым фоном, обусловленным динамикой пучка. Электроны в ССП обладают низкой средней скоростью и демонстрируют широкое распределение по скоростям. Это приводит к более зашумленному характеру спектра в черенковском режиме, вследствие того, что черенковский резонанс возникает на разных частотах у электронов с различными скоростями.

Одно из ключевых отличий между вирпертроном и виркатором заключается в том, что значения обеих частот f_{VC} и f_{Ch} можно настраивать, регулируя величину диэлектрической проницаемости вставки ε (рис. 10б). С увеличением ε значения частот монотонно уменьшаются. Частота колебаний ВК понижается вследствие того, что самосогласованное электрическое поле пучка ослабляется диэлектрической вставкой. Частота черенковского излучения уменьшается в результате изменения средней энергии пучка и преобразования дисперсионных характеристик волновода с изме-



Рис. 10: (a) — качественная зависимость критического тока I_{cr1} при котором образуется ВК в первой камере от значения диэлектрической проницаемости ε (пунктирная кривая), критического тока образования ВК во второй камере I_{cr2} (сплошная линия) и ток пучка I_0 (сплошная линия). I, II и III – области с различной динамикой системы: I – классический механизм образования ВК, когда он образуется только в первой камере; II – режим с плохо развитым ССП; III – режим с развитым ССП. (δ) — зависимости генерируемых частот f_{VC} и f_{Ch} от ε . (ε) — типичные распределения частиц РЭП и (ε) фурье-спектры колебаний E_z -поля в режимах I ($\varepsilon = 1$), II ($\varepsilon = 2$) и III ($\varepsilon = 4$).

нением ε .

Обнаруженные эффекты могут быть полезны для широкого спектра приложений, где требуется двухчастотное высокомощное коротковолновое излучение, а именно в сферах связи и радиолокации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные при выполнении данной диссертационной работы:

- 1. Разработана 1.5D самосогласованная квазистатическая математическая модель виркатора с электронным пучком в режиме ССП.
- 2. Разработана 3D модель двухсекционного виркатора с пучком в режиме ССП в среде моделирования СST PS. Разработан комплекс программных модулей для обработки результатов 3D электромагнитного моделирования.
- 3. Проведен анализ влияния геометрических параметров системы на механизмы развития ССП и генерацию СВЧ излучения в двухсекционном виркаторе. Исследовано влияние пушечной части, формирующей РЭП, на механизмы развития ССП в РЭП в рамках 3D электромагнитного моделирования.
- 4. Проведено математическое моделирование ППН при взаимодействии высокоэнергетического РЭП с пучком в режиме ССП.
- Предложен и исследован в рамках 3D математического моделирования новый типа виркатора с диэлектрической вставкой с реализацией эффекта ССП в РЭП в пространстве взаимодействия без скачка радиуса.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, входящие в базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Dubinov A.E., Petrik A.G., Kurkin S.A., Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Beam-plasma instability in charged plasma in the absence of ions. Physics of Plasmas. 23, (2016) 042105.

2. Dubinov A.E., Petrik A.G., Kurkin S.A., Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Virpertron: A novel approach for a virtual cathode oscillator design. Physics of Plasmas. 24, (2017) 073102.

3. Петрик А.Г., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Трехмерное моделирование формирования сжатого состояния электронного пучка в составной трубе дрейфа и анализ его характеристик. Письма в ЖТФ. 42, 15 (2016) 43-50.

Публикации в трудах конференций, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus

4. Dubinov A.E., Petrik A.G., Kurkin S.A., Frolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Investigation of Beam-Plasma Instability in Charged Plasma in

the Absence of Ions. 17th IEEE International Vacuum Electronic Conference. 2016, P. 335-336.

5. Petrik A.G., Kurkin S.A., Hramov A.E. Study of the Squeezed State of Electron Beam in Compound Drift Tube for the Purpose of Effective Plasma Frequency Increase. 17th IEEE International Vacuum Electronic Conference. 2016, P. 349-350.

6. Petrik A.G., Kurkin S.A., Frolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Dubinov A.E. Study of virpertron – Vircator with dielectric inserts. 18th IEEE International Vacuum Electronic Conference. 2017.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

7. Петрик А.Г. О механизме формирования сжатого состояния релятивистского электронного пучка в составной трубе дрейфа. Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 22, 6 (2014) 35-41.

8. Петрик А.Г. Численное моделирование возможности увеличения эффективной плазменной частоты при формировании сжатого состояния пучка. Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 23, 5 (2015) 80-91.

9. Егоров Е.Н., Петрик А.Г., Храмов А.Е. Исследование влияния внешнего сигнала на динамику низковольтной системы на основе винтовых электронных потоков с виртуальным катодом. Ученые записки физического факультета. 5, (2016) 165505.

10. Дубинов А.Е., Петрик А.Г., Куркин С.А., Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Пучково-плазменная неустойчивость в заряженной электронной плазме в отсутствие ионов. Ученые записки физического факультета. 5, (2016) 165506.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

11. Петрик А.Г., Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа для получения и анализа распределений заряженных частиц по скоростям на основе данных моделирования пучково-плазменной системы в среде CST Particle Studio. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619620, 2016.

12. Петрик А.Г., Храмов А.Е., Куркин С.А., Короновский А.А. Программа для обработки данных PIC-моделирования сжатого состояния в пучковой системе. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614533, 2016.

13. Петрик А.Г., Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программный модуль для анализа пучка в режиме сжатого состояния. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619709, 2017.

 Подписано в печать 25.09.2018
 Формат 60×84 1/16

 Бум. офсет.
 Усл. печ. л. 1,0
 Уч.-изд. л. 1,0

 Тираж 100 экз.
 Заказ 42
 Бесплатно

 Саратовский государственный технический университет
 410054, Саратов, Политехническая ул., 77
 Болитехническая ул., 77

 Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77
 Тел.: 24-95-70; 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru