

На правах рукописи



БАДАРИН Артем Александрович

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ В ПОЛЯХ
РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ И ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

01.04.03 – Радиофизика

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

Иннополис – 2020

Работа выполнена в Центре технологий компонентов робототехники и мехатроники автономной некоммерческой организации высшего образования “Университет Иннополис”

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
доцент,

Куркин Семен Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор,

Храмов Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Комаров Дмитрий Александрович**

доктор технических наук,

Акционерное общество Научно-производственное
предприятие «Торий», г. Москва,

заместитель генерального директора –
директор по научной работе

Малкин Андрей Михайлович

кандидат физико-математических наук,

Институт прикладной физики

Российской академии наук, г. Нижний Новгород,
старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное
предприятие Алмаз», г. Саратов.

Защита состоится 18 декабря 2020 г. в 17 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при ФГБОУ ВО “Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского” по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус, Большая физическая аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич ФГБОУ ВО “Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского” (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-01/kandidatskaya-dissertaciya-badarina-artema>

Автореферат разослан “__” октября 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Слепченков
Михаил Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Исследование и разработка приборов и устройств, содержащих интенсивные электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями в вакуумном или газонаполненном пространстве электродинамических систем, остается одной из наиболее важных и актуальных задач физики плазмы, радиофизики и высокомошной электроники. Данные устройства находят применение в различных областях, в том числе в задачах ускорения электронных и ионных пучков, физики плазмы, технологических процессах, задачах дальней радиолокации и дистанционного зондирования атмосферы и т.д.¹. Среди таких приборов важное место занимают генераторы сверхмощного электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов на базе виртуального катода (ВК): виркатор, редитрон, виртод и другие.

Такое положение виркаторов обусловлено их уникальными свойствами — высокая выходная мощность, простота конструкции, низкие требования к качеству пучка, возможность работы без внешнего магнитного поля. В то же время данные устройства не лишены недостатков. В первую очередь, это невысокая стабильность частоты генерации и низкий КПД, который, как правило, не превышает 1%. Заметим, что обе проблемы взаимосвязаны и обусловлены, прежде всего, слабой положительной обратной связью в системе и отсутствием внутренних механизмов стабилизации частоты генерации.

Одним из подходов, призванных частично преодолеть существующие недостатки виркаторов, является использование резонаторов, которые обеспечивают дополнительную обратную связь: индуцированное ВК электромагнитное поле воздействует на него, заставляя колебаться на резонансной частоте возбуждаемой моды. Высокая мощность электронного пучка и генерируемого излучения накладывает ограничения на геометрию используемых электродинамических структур. Для обеспечения эффективного взаимодействия между электронным потоком с ВК и электромагнитным полем конфигурация возбуждаемой моды должна соответствовать собственному полю ВК. В связи с этим вызывает интерес использование эллиптического резонатора, который характеризуется высокой степенью локализации электромагнитного поля вблизи оси симметрии. Эллиптический резонатор в настоящее время нашёл широкое применение в ускорителях заряженных частиц².

До сих пор не были изучены процессы взаимодействия ВК с полями эллиптического резонатора, поэтому проведение исследований в этом направлении является актуальной задачей.

Другим перспективным подходом, направленным на преодоление имею-

¹Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High power microwaves. – CRC press, 2015.

²Costanza G. Design and Analysis of the Medium- β Elliptical Cavities for the European Spallation Source Accelerator : дис. – Lund University, 2017.

щихся недостатков виркаторов, является разработка многолучевых схем. Основная идея использования нескольких ВК, образующихся в пространстве дрейфа виркатора при инжекции нескольких электронных потоков со сверхкритическими токами, заключается в синхронизации колебаний ВК и появлении дополнительной положительной обратной связи между виртуальными катодами за счет их взаимодействия через общее электромагнитное поле. Многолучевая виркаторная схема ранее исследовалась в работе Kumar L. и др.³, где было продемонстрировано увеличение мощности излучения по сравнению с классической схемой. Однако вопросы, связанные с частотным составом генерации в подобных многолучевых системах, до сих пор не были рассмотрены.

Также перспективной идеей является использование фотонных кристаллов (ФК) в устройствах на базе ВК⁴. ФК уже продемонстрировали свою эффективность в виркаторных схемах. Например, было показано, что ФК, расположенный в дрейфовой трубе виркатора, позволяет значительно повысить КПД системы, по сравнению с традиционным цилиндрическим волноводом, благодаря ряду факторов: высокому импедансу взаимодействия ФК с проходящим электронным пучком, обратной электромагнитной связи ФК с виртуальным катодом и более эффективному выводу электромагнитной энергии⁵. Однако до сих пор остается ряд нерешенных принципиальных вопросов, связанных с процессами генерации электромагнитного излучения в высокомошных устройствах с ФК. В частности, важным является вопрос о возбуждении и селекции различных собственных электромагнитных мод ФК, а также об их взаимодействии с электронными потоками при наличии ВК.

В диссертационной работе представлены результаты анализа процессов взаимодействия релятивистского электронного потока со сверхкритическим током с электромагнитными полями резонансных электродинамических систем в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Вышесказанное определило актуальность настоящей работы и следующие из неё цели и задачи.

Целью диссертационной работы является выявление особенностей колебательных явлений в релятивистских электронных потоках с ВК при их взаимодействии с электромагнитными полями резонансных систем и фотонных кристаллов, а также анализ механизмов усиления положительной обратной связи в генераторах на базе ВК.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие

³Sumathy M. et al. Analysis of a multibeam vircator configuration for efficiency enhancement //IEEE transactions on plasma science. – 2008. – Т. 37. – №. 2. – С. 293-297.

⁴Baryshevsky V. G., Gurinovich A. A. Hybrid systems with virtual cathode for high power microwaves generation //arXiv preprint arXiv:0903.0300. – 2009.

⁵Frolov N. S. et al. High-efficiency virtual cathode oscillator with photonic crystal //Applied Physics Letters. – 2018. – Т. 113. – №. 2. – С. 023503.

задачи:

- Анализ эволюции частотного состава электромагнитного излучения, генерируемого релятивистским электронным потоком с ВК в свободном пространстве и цилиндрической трубе дрейфа, для выявления наиболее эффективных режимов работы с внешним резонатором.
- Разработка и расчет основных параметров новой модели виркатора с электродинамической структурой в виде эллиптического резонатора, таких как геометрические размеры системы, энергия и ток инжектируемого электронного потока, генерируемая выходная мощность и КПД.
- Разработка и расчет параметров электронных потоков (величины токов, количества электронных пучков и их взаимного расположения) новой многолучевой модели релятивистского виркатора. Анализ процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков, находящихся в режиме формирования ВК в общем пространстве дрейфа.
- Анализ физических процессов, ответственных за возбуждение высших мод ФК и их конкуренцию. Изучение возможности увеличения частоты генерации за счет работы на высших модах ФК.
- Выявление специфики процессов взаимодействия электронного потока с виртуальным катодом в оригинальной модели двухсекционного виркатора с ФК.

Научная новизна работы соответствует пунктам 1-4 паспорта специальности 01.04.03; пунктам 3 и 5 паспорта специальности 01.04.04. Все результаты, включенные в диссертационную работу, являются новыми и получены впервые, в частности:

1. Предложена и исследована новая схема виркатора, в которой эллиптический резонатор используется в качестве пространства взаимодействия. Впервые показано, что данный тип электродинамической структуры позволяет увеличить эффективность энергообмена между электромагнитным полем и электронным потоком с ВК за счет лучшей локализации поля в области взаимодействия, а плавный переход резонатора в цилиндрический волновод способствует улучшению вывода электромагнитной энергии из системы.

2. Предложена новая схема многолучевого релятивистского виркатора, и разработана её трехмерная самосогласованная электромагнитная модель, в которой несколько электронных потоков со сверхкритическими токами нагружены на общую электродинамическую структуру в виде отрезка цилиндрического волновода.

3. Впервые исследованы процессы взаимодействия между пучками в многолучевом релятивистском виркаторе с токами, превышающими критический

ток для данной системы. Обнаружен эффект, заключающийся в подстройке частоты колебаний ВК в электронных потоках с меньшими токами к частоте колебаний ВК в электронном потоке с большим током, за счет связи через общее электромагнитное поле.

4. Впервые получена карта динамических режимов, реализующихся при взаимодействии трех электронных потоков со сверхкритическими токами в многолучевом релятивистском виркаторе, в зависимости от параметров расстроек токов каждого из пучков относительно базового. Выделены четыре основных режима, отличающихся количеством интенсивных частотных компонент в Фурье-спектре генерируемого излучения.

5. Впервые проведен детальный анализ электродинамических характеристик ФК, находящегося в цилиндрическом волноводе. Получены дисперсионные характеристики рассматриваемого ФК для ряда первых рабочих мод, и исследована их эволюция при изменении геометрических параметров ФК: расстояний между штырями в продольном и поперечном направлениях относительно распространения релятивистского электронного потока, радиуса волновода.

6. Впервые показано, что максимальный КПД (порядка 12 %) для предложенной схемы двухсекционного виркатора с ФК достигается при инжектируемом токе, лежащем в диапазоне между критическими токами для каждой из секций виркатора, а преодоление им величины критического тока для секции с ФК приводит к резкому падению КПД вследствие развития сжатого состояния. Возрастание КПД связано с тем, что данная конструкция прибора позволяет организовать распределённую обратную связь как с помощью электромагнитного поля внутри ФК, так и за счет предварительной модуляции пучка, в котором формируется ВК во второй секции системы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Использование электродинамической структуры в виде эллиптического резонатора в схеме аксиального релятивистского виркатора, работающего в К-диапазоне, приводит к увеличению амплитуды пространственных колебаний ВК и возрастанию КПД генерации до 2.5 раз, по сравнению с цилиндрическим резонатором, за счет лучшей локализации электромагнитного поля в области энергообмена, при этом наиболее эффективное взаимодействие пучка наблюдается с модами эллиптического резонатора, отношение частоты которых к плазменной частоте инжектируемого электронного потока лежит в диапазоне от 1.9 до 2.2, либо от 2.6 до 2.9.

2. Увеличение числа релятивистских электронных потоков в аксиальном виркаторе до четырёх сопровождается ростом КПД до 5 раз по сравнению с аналогичной однопучковой схемой, причем его максимум достигается при токах дополнительных пучков меньше базового на 20%, за счет возникающей положительной обратной связи между ВК в каждом из пучков, при

этом электронный поток с большим током задаёт основную частоту колебаний генерируемого излучения, осуществляя предварительную модуляцию дополнительных пучков на этапе формирования в них ВК.

3. Использование в первой секции двухсекционного виркатора электродинамической системы в виде ФК с продольным и поперечным периодами равными 5 и 4.75 мм, соответственно, приводит к стабилизации частоты генерации на основной моде и увеличению электронного КПД до 12.8% при инжекции пучка с током 380 А и энергией 140 кэВ за счет реализации распределённой обратной связи между пучком и электромагнитным полем в ФК, при этом электронный КПД зависит от энергии и тока инжектируемого электронного потока так, что его оптимальное значение лежит между критическими токами для каждой из секций, причем преодоление критического тока для секции с ФК сопровождается резким падением КПД.

Научное и практическое значение результатов работы. Результаты работы носят научно-прикладной характер, открывая новые возможности для конструкторской деятельности в области радиофизики и физической электроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов, актуальных для систем дальней радиолокации, дистанционного зондирования атмосферы, спутниковой связи, ускорения электронных и ионных пучков. В частности, показана возможность увеличения КПД схем генераторов на ВК за счет использования нескольких электронных потоков, связанных через общее электромагнитное поле. Предложены новые виркаторные схемы на базе эллиптического резонатора и ФК, позволяющие уменьшить недостатки, свойственные данному классу устройств (сравнительно низкие КПД и частота генерации).

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении научных задач по следующим НИР: государственные задания №№ 3.59.2014/К и 3.859.2017/ПЧ, Грант Президента РФ № МК-1163.2017.2, грант Российского научного фонда № 14-12-00222, гранты Российского фонда фундаментальных исследований № 14-02-31204, № 15-32-20299, № 15-52-04018, № 17-52-04097.

Личный вклад. Все представленные в диссертации результаты, получены лично автором: выбор методик решения задач, написание программ для ЭВМ, реализующих используемые в работе численные методы, графическую обработку и анализ результатов расчетов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями.

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, строго обоснованы в научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований в области изучения взаимодействия электронных

потоков с электромагнитными полями резонансных систем и фотонных кристаллов. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям о процессах, происходящих в интенсивных пучково-плазменных системах, верификацией созданных программ при разнообразном тестировании, непротиворечивостью достоверным известным результатам. Ряд полученных научных результатов (значения частоты генерации, токов электронных потоков и характеристики электродинамических систем), согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными, опубликованными в авторитетных отечественных и зарубежных высокорейтинговых научных изданиях.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации использовались при выполнении ряда НИР (в рамках грантов РФФИ, РФФИ, Президента РФ, Госзадания), а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X, XI международная школа-семинар “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, 2013, 2016); научная школа “Нелинейные волны-2016” (Нижний Новгород, 2016); 24, 26, 27, 28я международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, 2014, 2016, 2017, 2018); XVI зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2015); всероссийская школа-семинар “Волны-2015”, “Волны-2016”, “Волны-2017”, “Волны-2018” (МГУ, 2015, 2016, 2017, 2018); 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2015) and 21 International Conference on High-Power Particle Beams (Beams 2015), Belek, Antalya, Turkey, 2015); X, XI, XIII Всероссийская конференция молодых учёных “Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика” (Саратов, 2015, 2016, 2018); 40, 41, 43, 44 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THZ 2015, Hong Kong, China, 2015; IRMMW-THZ 2016, Copenhagen, Denmark, 2016; IRMMW-THZ 2018, Nagoya, Japan; IRMMW-THZ 2019 Paris, France); 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (Belek, Antalya, Turkey, 2015); 17th, 18th, 19th, 20th IEEE International Vacuum Electronic Conference (IVEC 2016, Monterey, California, USA; IVEC 2017, London, United Kingdom; IVEC 2018 Monterey, California, USA; IVEC 2019, Busan, Korea).

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы опубликованы в 47 научных работах, включая 12 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus и включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, глава в коллективной монографии, 27 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, из них 12, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Список основных работ автора, отражающих существо

диссертационной работы, приведен в конце автореферата. Материалы диссертации полностью представлены в опубликованных работах.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 150 страниц текста, включая 45 иллюстраций и список литературы из 164 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, описано текущее состояние исследуемых проблем, обоснована актуальность и научная новизна решаемых задач, сформулирована цель и методы исследования, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и основных публикациях.

В первой главе представлены результаты исследования поведения критического тока релятивистского электронного потока во внешнем магнитном поле. Детально исследована динамика частоты колебаний электромагнитного поля в электронном потоке с ВК. Предложена новая перспективная модель релятивистской виркаторной системы, использующей в качестве пространства взаимодействия эллиптический резонатор, и проведено её исследование.

Было проведено детальное исследование динамики частоты колебаний электромагнитного поля в электронном потоке с ВК в свободном пространстве. Была исследована модельная система, минимизирующая влияние электродинамической структуры на собственные колебания пучка, для изучения в рамках численного моделирования собственной динамики интенсивного электронного потока в режиме формирования ВК.

Модельная система представляет собой два заземлённых электрода конечного размера, между которыми распространяется цилиндрический электронный поток, при этом инжекция пучка осуществляется через один из электродов. Для обеспечения пролёта электронного потока через свободное пространство вдоль распространения пучка прикладывается внешнее магнитное поле, частично компенсирующее действие сил пространственного заряда. Для численного моделирования предложенной системы использовался метод крупных частиц, хорошо зарекомендовавший себя при решении различных задач вакуумной и плазменной электроники. Область моделирования представляет собой параллелепипед, внутри которого вакуум, при этом на гранях, перпендикулярных распространению пучка, реализованы граничные условия, соответствующие идеальному проводнику, а на остальных гранях — поглощающие граничные условия.

Обнаружено, что для динамики релятивистского электронного потока (РЭП) с ВК свойственно скачкообразное переключение основной частоты генерации. На рис. 1 представлена демонстрирующая данный эффект зависимость отношения частоты ω наиболее интенсивной спектральной составляющей к плазменной частоте ω_p пучка от величины инжектируемого тока

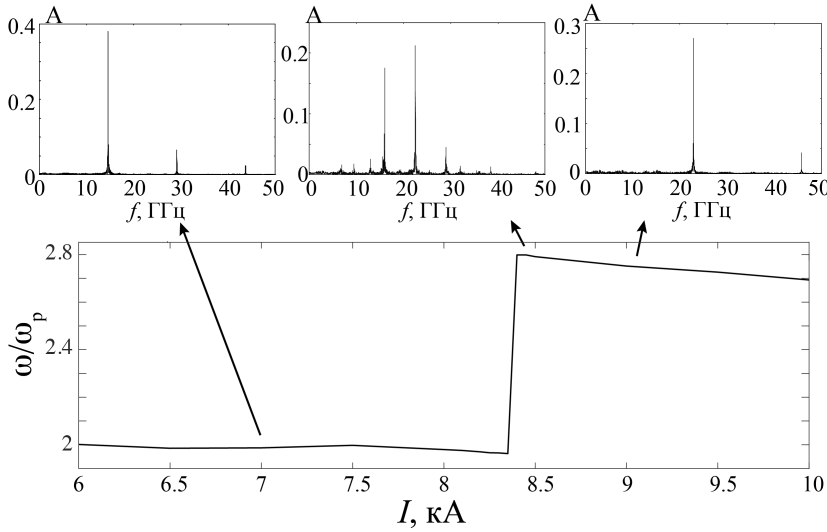


Рис. 1: Зависимость отношения частоты доминирующей спектральной составляющей к плазменной частоте пучка от величины инжектируемого тока и соответствующие спектры колебаний продольной компоненты напряжённости электрического поля в области ВК. Внешнее магнитное поле $B = 0.75$ Тл, энергия электронного потока $W = 1$ МэВ.

I . Действительно, отношение ω/ω_p практически не изменяется и находится вблизи единицы при увеличении инжектируемого тока до некоторого характерного значения I_{th} , то есть изменение частоты доминирующей спектральной компоненты в данном диапазоне пропорционально квадратному корню из тока пучка. Затем происходит её переключение на вторую гармонику плазменной частоты и плавное падение отношения ω/ω_p , что свидетельствует об изменении механизма генерации. Заметим, что скачкообразное переключение частоты генерации ранее наблюдалось в экспериментах с виркаторами⁶.

Обнаружено, что переключение частоты генерации в рассматриваемой модели виркаторной системы сопровождается качественным изменением динамики электронного потока с ВК, что, в первую очередь, обусловлено изменением соотношения дефокусирующих сил пространственного заряда и фокусирующих сил, создаваемых внешним магнитным полем.

Для анализа динамики электронного потока была получена зависимость среднего положения ВК от величины тока пучка, представленная на рис. 2. Видно, что ВК приближается к плоскости инжекции с увеличением тока пучка, при этом можно выделить два характерных участка: при увеличении инжектируемого тока от $I = 6$ кА до $I \approx 8.4$ кА происходит быстрое приближение ВК к плоскости инжекции, которое затем замедляется и изменяет свой характер. Следует отметить, что значение тока, при котором происходит изменение скорости движения ВК к плоскости инжекции соответствует току переключения основной частоты колебаний ВК (см. рис. 1).

Было также исследовано изменение радиуса пучка, происходящее в пространстве до области формирования ВК. Для этого была построена зависимость отношения радиуса пучка в плоскости ВК к радиусу в плоскости инжекции от величины тока электронного потока, которая показана на рис. 2 (пунктирная линия). Хорошо видно, что отношение радиусов перестаёт изме-

⁶Jiang W. Time-frequency analysis of virtual-cathode oscillator // IEEE transactions on plasma science. – 2010. – Т. 38. – №. 6. – С. 1325-1328.

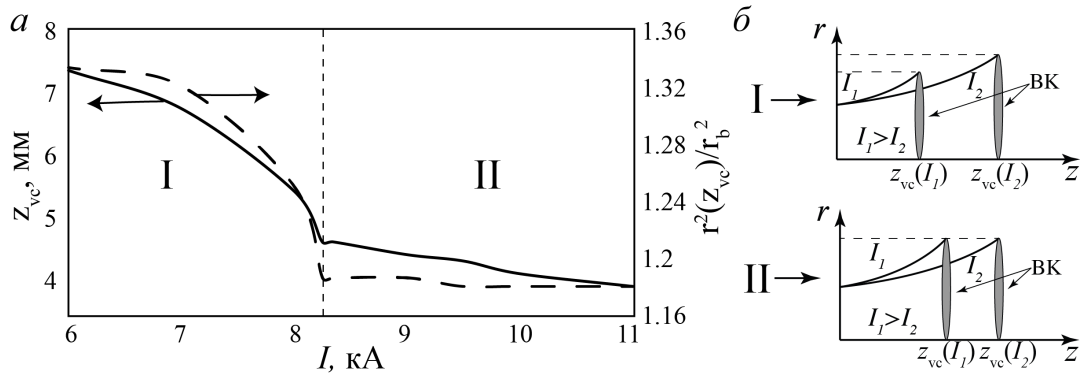


Рис. 2: (а) Зависимости среднего положения ВК (сплошная линия) и изменения радиуса пучка при пролёте от плоскости инжекции до ВК (пунктирная линия) от величины тока инжектируемого пучка. Внешнее магнитное поле $B = 0.75$ Тл, энергия электронного потока $W = 1$ МэВ. (б) Схематичное представление динамики пучка в плоскости (r, z) для двух характерных режимов I и II.

няться с увеличением тока пучка, когда он также становится выше характерного значения I_{th} . Такое переключение динамики электронного потока обусловлено, в первую очередь, изменением соотношения дефокусирующих сил пространственного заряда (расталкивающих и тормозящих пучков) к фокусирующим силам внешнего магнитного поля. При инжекции пучка в эквипотенциальное пространство дрейфа поле пространственного заряда приводит как к расширению пучка и уменьшению его плотности, так и торможению пучка, сопровождающемуся увеличением плотности. Увеличение инжектируемого тока пучка, с одной стороны, приводит к увеличению скорости расширения электронного потока, понижающего плотность пространственного заряда, с другой — к росту тормозящих сил, сопровождаемых уменьшением времени формирования ВК и приближением ВК к плоскости инжекции. Таким образом, в области II, в отличие от области I, расширение пучка скомпенсировано приближением ВК к плоскости инжекции (см. рис. 2 (пунктирная линия)). Поэтому в области II $r_{z_{vc}}$ практически постоянен.

Таким образом, было обнаружено, что для релятивистского электронного потока с ВК в области рассматриваемых параметров свойственна генерация электромагнитного излучения в двух характерных режимах, а именно: на частоте $\omega \approx 2\omega_p$ и $\omega \approx 2.8\omega_p$. Полученные результаты хорошо соотносятся с теоретической работой Jiang W.⁷ и были использованы при разработке модели виркатора с эллиптическим резонатором, в частности, для выбора геометрических размеров.

Предложена схема, состоящая из электродинамической структуры в виде эллиптического резонатора, в которую инжектируется моноскоростной сплошной/трубчатый цилиндрический релятивистский электронный поток со сверхкритическим током I , что приводит к образованию в системе ВК

⁷Jiang W., Kristiansen M. Theory of the virtual cathode oscillator //Physics of Plasmas. – 2001. – Т. 8. – №. 8. – С. 3781-3787.

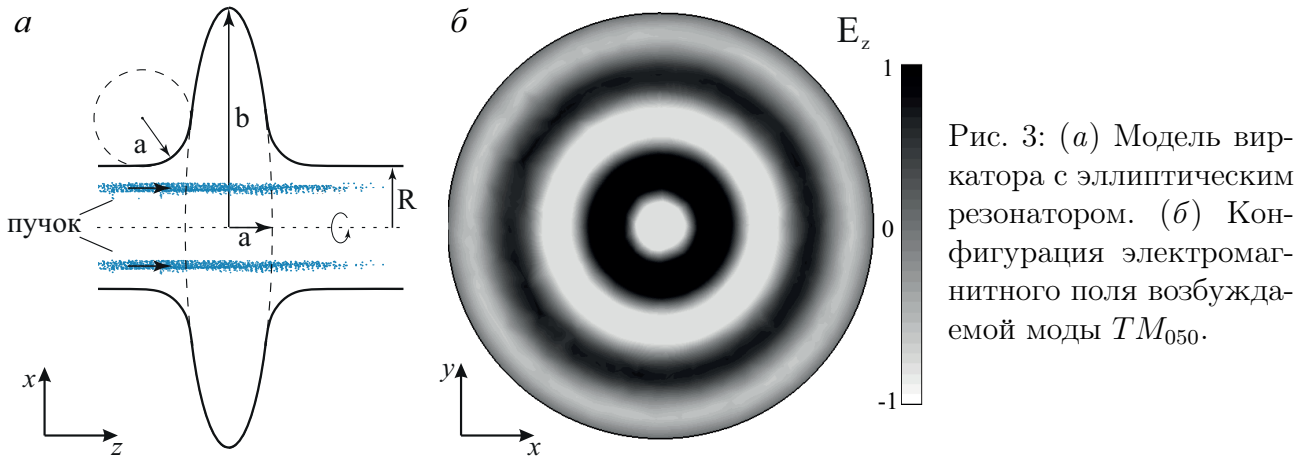


Рис. 3: (а) Модель виркатора с эллиптическим резонатором. (б) Конфигурация электромагнитного поля возбуждаемой моды TM_{050} .

(рис. 3а). Эллиптический резонатор имеет форму фигуры вращения эллипса вокруг одной из его полуосей. Пространство дрейфа плавно переходит в резонатор по окружности с радиусом a , где a – малая полуось эллипса, образующего резонатор. В свою очередь, резонатор плавно переходит в выходной волноводных тракт.

Использование эллиптической электродинамической структуры приводит к повышению эффективности энергообмена между электронным потоком с ВК и электромагнитным полем за счет взаимодействия с собственными модами резонатора, при этом плавный переход резонатора в выходной волноводный тракт улучшает вывод энергии из области взаимодействия. Типичная конфигурация возбуждаемого электромагнитного поля в исследуемой электродинамической структуре изображена на рис. 3б.

Представлены результаты исследования влияния тока электронного потока и геометрических параметров эллиптического резонатора (радиусов полуосей) на режимы работы предложенной схемы. Найдены оптимальные значения данных параметров с точки зрения максимизации КПД генерации. Обнаружено, что наиболее эффективное взаимодействие пучка наблюдается с модами эллиптического резонатора, частоты ω_{mode} которых лежат в диапазонах частот, соответствующих одному из характерных режимов генерации для пучка с ВК в свободном пространстве, а именно: при $\omega_{mode} \approx 2.1\omega_p$ или $\omega_{mode} \approx 2.7\omega_p$ (см. рис. 4 а, б). Также следует отметить, что одно из главных преимуществ виркаторов, простота конструкции, сохраняется, несмотря на использование элементов сложной формы, т.к. требования к точности изготовления эллиптического резонатора остаются невысокими.

Была проанализирована динамика релятивистского электронного потока в предложенной схеме с эллиптическим резонатором. Обнаружено значительное увеличение пространственной амплитуды колебаний ВК, по сравнению с классической схемой аксиального виркатора, что обусловлено сильным взаимодействием ВК с одной из собственных мод эллиптического резонатора. Установлено, что для достижения максимальной выходной мощности ВК должен быть сформирован непосредственно в центре резонатора.

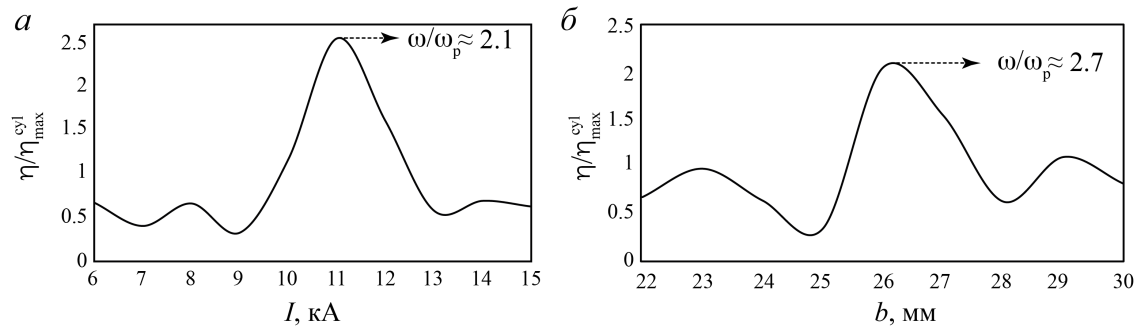


Рис. 4: КПД генерации виркатора с эллиптическим резонатором, нормированный на максимальный КПД, достигаемый в аналогичной схеме с цилиндрическим резонатором ($\eta_{max}^{cyl} \approx 2.4\%$), в зависимости от управляющих параметров: (а) от величины инжектируемого тока при $a = 15$ мм, $b = 26$ мм; (б) от радиуса большой полуоси b образующего эллипса при $I = 12$ кА, $a = 10$ мм; энергия пучка $W = 1$ МэВ.

Таким образом, полученные результаты показывают, что эллиптический резонатор обеспечивает высокую эффективность взаимодействия релятивистского электронного потока с электромагнитными полями за счет лучшей локализации возбуждаемых полей в такой электродинамической структуре. Это приводит к значительному увеличению КПД системы примерно в 2.5 раза ($\eta \approx 6\%$), по сравнению с аналогичной схемой с цилиндрическим резонатором.

Во второй главе диссертационной работы представлены результаты исследования многолучевых (многопучковых) схем генераторов на ВК. Получены зависимости критического тока для каждого из пучков от величины токов других электронных потоков и расстояния между ними. Представлены результаты анализа процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков, находящихся в режиме формирования ВК. Получена карта основных динамических режимов, реализующихся в системе при взаимодействии трех электронных потоков со сверхкритическими токами, в зависимости от параметров расстроек токов каждого из пучков относительно базового.

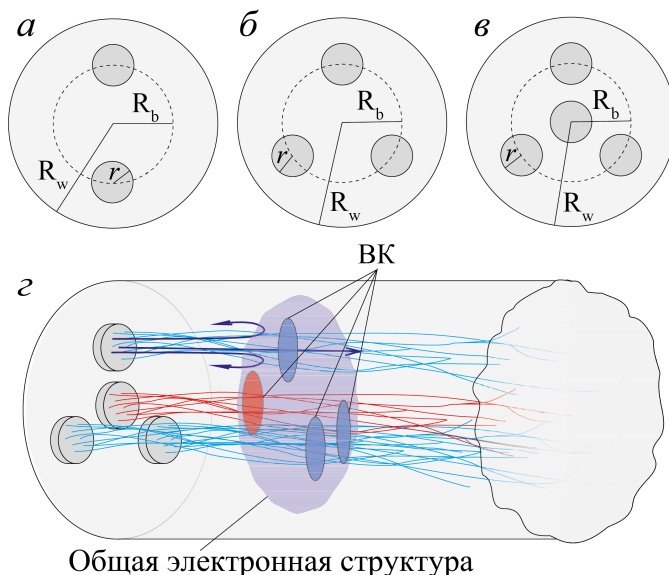


Рис. 5: Качественное изображение модели многопучковой релятивистской виркаторной системы ((а), (б), (в) — поперечные сечения двух-, трёх- и четырехлучевого виркатора, соответственно. (z) — объёмное представление модели). На рисунке (z) изображён отрезок цилиндрической камеры дрейфа радиусом $R = 12$ мм, в которую инжектируются 4 сплошных цилиндрических электронных потока с радиусами $r = 2$ мм каждый.

Проведено исследование трёх вариантов модели релятивистского многолучевого виркатора: с 2, 3 или 4 электронными потоками, которые схематично представлены на рис. 5. Исследуемая схема представляет собой пространство дрейфа в виде отрезка цилиндрического волновода (см. рисунок 5), в который инжектируется $N=2/3/4$ сплошных релятивистских электронных потоков с токами I_n (где n – номер потока) и энергией $W_e = 400$ кэВ каждый. Области инжекции электронных потоков (эмиттеры) расположены симметрично относительно оси системы, при этом их центры равноудалены от оси на расстояние R_b . Были выбраны следующие геометрические параметры модели: длина волновода $L = 45$ мм, радиус волновода $R_w = 12$ мм, радиус электронного потока $r = 2$ мм. Система находится во внешнем фокусирующем продольном однородном магнитном поле с индукцией B . При исследовании влияния магнитного поля B менялось от 0 до 1 Тл.

Электронные потоки не являются полностью замагниченными и, находясь в едином пространстве дрейфа, формируют общую электронную структуру. Связь между электронными потоками осуществляется через электромагнитное поле.

Исследовано влияние токов электронных потоков на их динамику, выходную мощность и эффективность генерации электромагнитного излучения. Заметим, что один из пучков выбирался в качестве базового, относительно которого отсчитывались расстройки дополнительных пучков: $\delta = I_{add}/I_b - 1$, где I_b и I_{add} — токи базового и дополнительного потоков, соответственно.

Обнаружено, что инжекция в виркаторную систему двух электронных потоков с расстройкой токов в диапазоне $-0.4 \leq \delta \leq 0$ сопровождается повышением КПД, при этом максимум достигается при $\delta \approx -0.2$ (см. рис. 6а). При расстройке $\delta \leq -0.4$ КПД двухлучевой схемы становится меньше, чем у аналогичной однопотоковой схемы виркатора в рассматриваемом диапазоне токов. Повышение КПД в двухлучевой схеме связано, в первую очередь, со взаимодействием формирующихся в каждом из электронных потоков ВК. Для анализа их взаимодействия была проведена оценка коэффициента корреляции между колебаниями продольных составляющих напряжённости электрического поля E_z в областях ВК для каждого из пучков. Обнаружено, что максимум по КПД достигается при скоррелированной динамике пучков с коэффициентом корреляции, близким к 1, а минимум, напротив, при низкой корреляции (см. 6б).

Исследовано влияние значений расстройки токов пучков на динамику трёхлучевой виркаторной системы. Величина расстройки варьировалась от -0.6 до 0 для двух значений тока базового пучка: $I_0 = 5$ кА и 10 кА. Обнаружено сильное влияние значений расстройки электронных потоков на динамику системы с общей тенденцией к её усложнению при увеличении разницы между значениями расстроек двух дополнительных пучков. Кроме того,

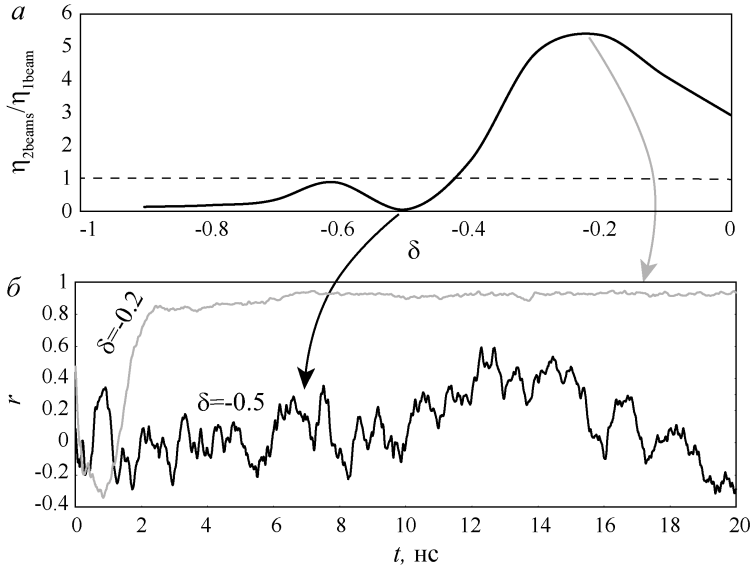


Рис. 6: (а) Зависимость отношения КПД двухлучевого виркатора к КПД аналогичной виркаторной схемы с одним электронным потоком от величины расстройки тока дополнительного пучка δ . (б) Временная зависимость линейного коэффициента корреляции Пирса r , рассчитанная в окне 0.3 нс, между колебаниями продольной составляющей напряжённости электрического поля в двух пучках. Для серой кривой $\delta = -0.2$, для черной – $\delta = -0.5$. Ток базового пучка 5 кА.

наблюдаются области с одночастотной генерацией, обусловленные тем, что электронный поток с большим током задаёт основную частоту колебаний генерируемого излучения, осуществляя предварительную модуляцию дополнительных пучков на этапе формирования в них ВК.

В силу того, что при анализе динамики системы следует учитывать как величины расстроек токов дополнительных пучков от базового, так и расстройку между дополнительными пучками, был введён параметр $\delta = \delta_2 - \delta_1$, который характеризует разность между значениями расстроек дополнительных пучков, а также двумерный “вектор расстройки”, длина которого характеризует общую расстройку дополнительных пучков от базового и определяется как $|\Delta| = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$.

На плоскости параметров $(\delta, |\Delta|)$ были выделены характерные режимы динамики системы (рис. 7). Наблюдающиеся режимы отличаются количеством интенсивных составляющих в Фурье-спектре выходного сигнала. Таким об-

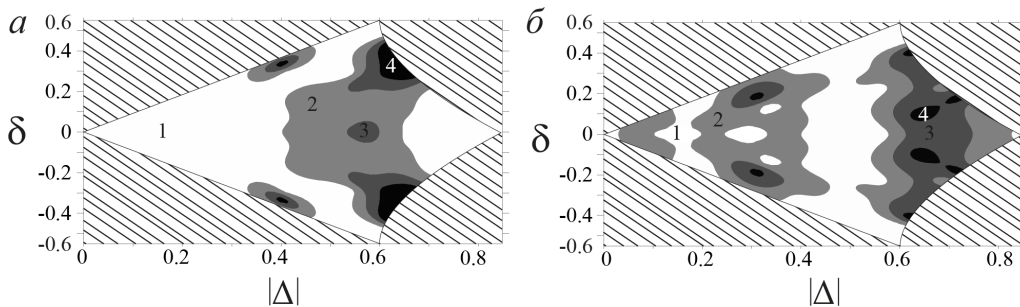


Рис. 7: Карты характерных режимов динамики виркаторной системы с тремя электронными пучками на плоскостях параметров $(|\Delta|, \delta = \delta_2 - \delta_1)$, где δ_1 и δ_2 – значения расстройки дополнительных пучков относительно базового пучка, $|\Delta|$ – модуль вектора расстройки. Выделены следующие режимы, отличающиеся количеством интенсивных составляющих в Фурье-спектре генерируемого сигнала: 1 – одночастотный, 2 – двухчастотный, 3 – трехчастотный, 4 – режим, для которого в спектре выходного сигнала наблюдается более трех интенсивных составляющих. Карты (а) и (б) получены для токов базового пучка $I_0 = 5$ кА и $I_0 = 10$ кА, соответственно.

разом, в системе реализуются: одночастотный (“Режим I”), двухчастотный (“Режим II”), трехчастотный (“Режим III”), а также “Режим IV”, для которого в спектре выходного сигнала наблюдается более трех интенсивных составляющих.

Обнаружено, что установление всех режимов в трехлучевой виркаторной системе и наблюдающиеся переключения между ними (рис. 7) обусловлены следующими вариантами взаимодействия потоков с ВК:

- базовый пучок задаёт основную частоту колебаний ВК в дополнительных пучках — “Режим I”;
- эффективное (когерентное) взаимодействие только между ВК дополнительных пучков — “Режим II”;
- отсутствие когерентного взаимодействия между всеми ВК — “Режимы III и IV”.

Показано, что переход “I \rightarrow II” связан с тем, что при увеличении общей расстройки дополнительных пучков от базового (параметр $|\Delta|$) и сохранении малой расстройки между дополнительными пучками (параметр δ) возможно когерентное взаимодействие между последними. В этом случае можно говорить о сосуществовании в системе не трёх, а, фактически, двух ВК, генерирующих на разных частотах. Переход “II \rightarrow III” может быть реализован как при увеличении общей расстройки дополнительных пучков от базового, так и при увеличении расстройки между дополнительными пучками. В то же время “Режим IV” наблюдается только при одновременном увеличении обеих расстроек и характеризуется сложным спектральным составом.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты исследования физических процессов, ответственных за возбуждение высших мод ФК, а также их конкуренцию. Проведен анализ электродинамических характеристик ФК, находящегося в цилиндрическом волноводе. Получены дисперсионные характеристики рассматриваемого ФК для ряда первых рабочих мод и исследована их эволюция при изменении геометрических параметров ФК. Исследовано взаимодействие ВК с полем ФК в модели двухсекционного виркатора.

Исследуемая схема состоит из цилиндрической камеры дрейфа радиусом $R_w = 6$ мм, в которую инжектируется два моноскоростных электронных потока с энергией W и током I каждый (рис. 8). ФК расположен вблизи плоскости инжекции и состоит из периодически чередующихся металлических штырей в продольном и поперечном направлениях относительно распространения пучка; диаметр штыря составляет $d_{pin} = 0.4$ мм, расстояние между ними в продольном направлении — $z_p = 2$ мм, в поперечном направлении — $y_p = 1.9$ мм. Секция вывода мощности расположена за структурой ФК. Внешнее ведущее

магнитное поле с индукцией $B = 2$ Тл прикладывается к системе и проводит электронный поток через ФК, а затем уводит его к стенкам выходного волноводного рупора.

Исследовано влияние конфигурации электронных потоков на характеристики генерации электромагнитного излучения в схеме с ФК в режиме одновременного обеспечения условий синхронизма для нескольких электромагнитных мод, имеющих разную пространственную конфигурацию полей. В частности, такой режим наблюдается при энергии электронных потоков $W = 12.67$ кэВ, что хорошо видно из дисперсионных зависимостей для мод EH_{11} и EH_{12} ФК (см. рис. 9). Отметим, что энергия пучка $W = 12.67$ кэВ соответствует оптимальному возбуждению основной моды EH_{11} .

Обнаружено переключение частоты генерации, обусловленное конкуренцией между модами ФК EH_{11} и EH_{12} , которая наблюдается при отдалении электронных потоков от центра системы вдоль оси y (увеличении y_c) из-за изменения эффективности энергообмена между пучками и собственными модами ФК. Отметим, что конфигурация системы с двумя электронными пучками, симметрично расположенными относительно центрального проводника ФК, была выбрана, исходя из вида распределения продольной компоненты электрического поля E_z для основной моды EH_{11} .

Спектральный анализ электромагнитного излучения в рассматриваемой системе с ФК и двумя электронными потоками показывает, что возможно как раздельное, так и одновременное возбуждение обеих мод (см. рис. 9в). На рис. 9 римскими цифрами выделены три характерные области, соответствующие различным режимам генерации: I – одночастотная генерация на частоте 12.5 ГГц, II – двухчастотная генерации на частотах 12.5 ГГц и 13.35 ГГц, III – одночастотная генерация на частоте 13.35 ГГц. Таким образом, при увеличении удалённости электронных потоков от оси системы наблюдается переключе-

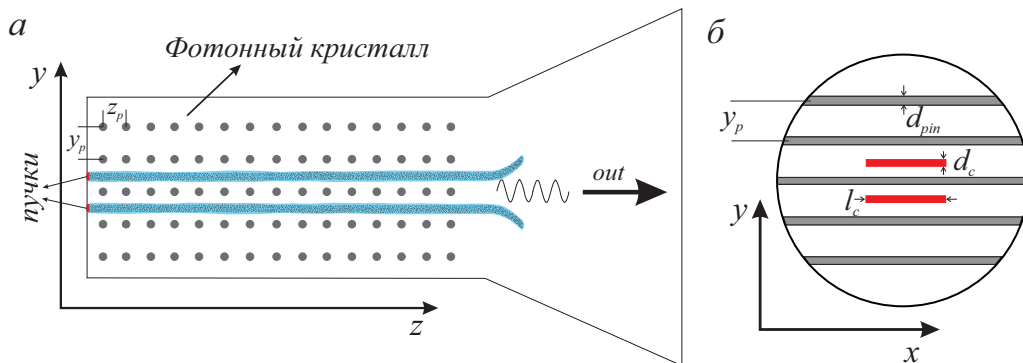


Рис. 8: Схема генератора на базе ФК. (а) Схематическое представление в плоскости YZ . $y_p = 1.9$ мм, $z_p = 2$ мм - расстояния между штырями ФК в поперечном и продольном направлениях относительно направления распространения электронного пучка, соответственно. (б) Схематическое представление конфигурации генератора с двумя электронными потоками; l_c – ширина пучка, d_c – толщина пучка, $d_{pin} = 0.4$ мм – диаметр токопроводящих штырей.

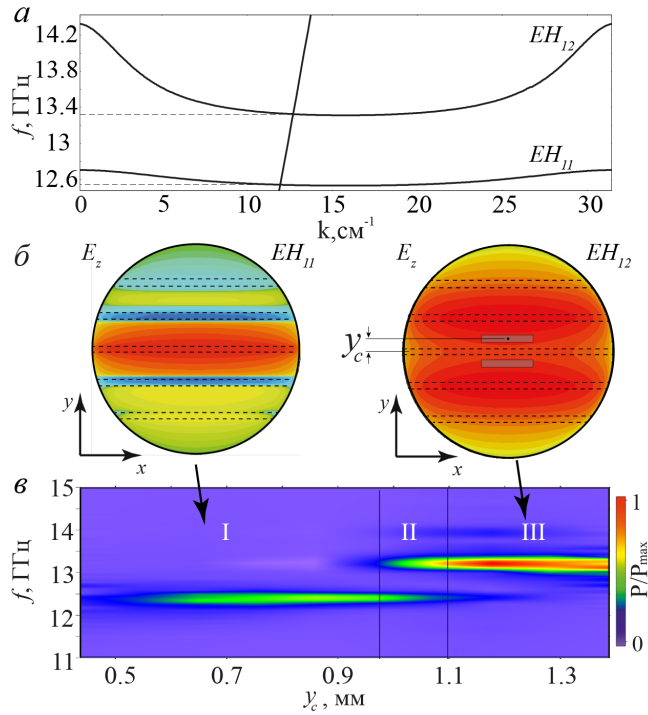


Рис. 9: (а) Дисперсионные характеристики собственных мод ФК и соответствующие им распределения электрического поля (б). Сплошная прямая линия – характеристика невозмущенного электронного потока с энергией 12.67 кэВ. Пунктирные линии на распределениях (б) показывают расположение штырей ФК; y_c – положение центра электронного потока вдоль оси y , при этом второй поток инжектируется симметрично первому. (в) Зависимость спектрального состава электромагнитного излучения от положения электронных потоков y_c . P_{max} – максимальная мощность в рассматриваемом диапазоне параметров.

чение частоты генерации, при этом одночастотные режимы генерации I и III реализуются в случае высокой эффективности взаимодействия электронного потока с одной из рассматриваемых мод; в случае сильной связи пучка с каждой из мод происходит их одновременное возбуждение.

Изменение эффективности взаимодействия электронного потока с модами обусловлено, в первую очередь, различиями в пространственных распределениях электромагнитного поля каждой из мод. Действительно, рассматриваемые моды (EH_{11} и EH_{12}) имеют сдвинутые вдоль оси y максимумы продольной составляющей напряженности электрического поля E_z (см. рис. 9). Таким образом, при увеличении расстояния электронных потоков от оси системы одновременно происходит их удаление от максимума продольной составляющей напряженности электрического поля основной моды и приближение к максимумам моды более высокого порядка, приводящее к уменьшению сопротивления связи пучков с одной модой и увеличению — с другой. Таким образом, изменяя положения пучков, можно контролировать эффективность энергообмена между электронными потоками и электромагнитными модами. Данный принцип взят за основу подхода к селекции мод в генераторе с ФК, который позволяет существенно увеличить частоту генерации в системе за счет возбуждения высших мод. В частности, оптимизация параметров системы для конфигурации с четырьмя электронными потоками показала, что возможно достичь электронного КПД до 28% при частоте генерации 37.6 ГГц. В данном случае возбуждается мода EH_{31} .

Была предложена модель виркатора с двухсекционной камерой дрейфа в виде цилиндрического волновода, в первой секции которого располагается

ся ФК. Первая секция имеет радиус $R_{w1} = 15$ мм, вторая – $R_{w2} = 30$ мм. В отличие от рассмотренной выше схемы, в ФК отсутствует центральный проводник. Это сделано для того, чтобы снизить оседание пучка на ФК. В систему инжектируется моноскоростной цилиндрический электронный поток с радиусом R_b . К системе прикладывается внешнее ведущее магнитное поле с индукцией B , которое проводит пучок через ФК и затем уводит его на стенки второй секции. Заметим, что при инжекции пучка со сверхкритическим током во второй секции формируется ВК, отражающий часть пучка обратно в первую секцию с ФК.

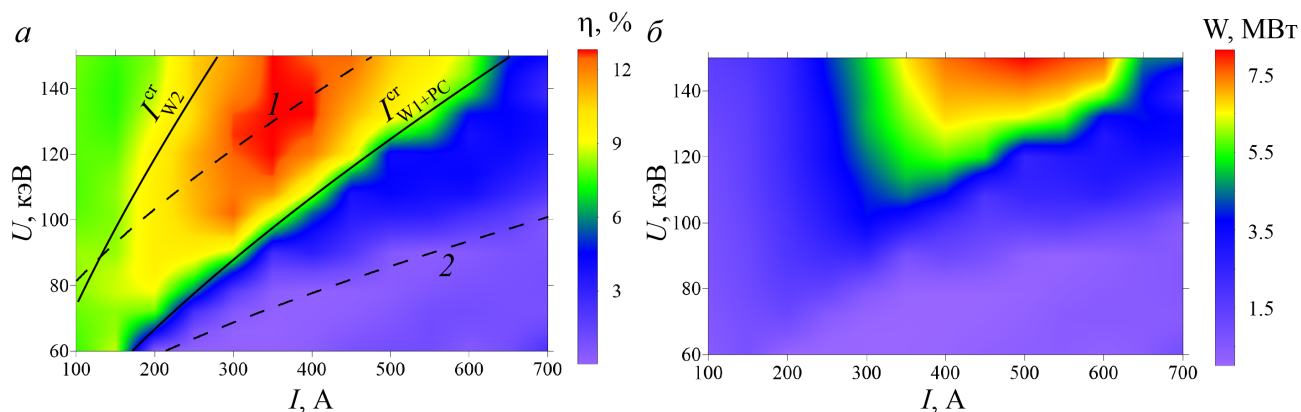


Рис. 10: (а) Электронный КПД системы и (б) мощность взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля от энергии пучка U и величины инжектируемого тока I . Сплошными кривыми на рис. а показаны критические токи I_{W1+PC}^{cr} и I_{W2}^{cr} для первой и второй секций виркатора, соответственно; пунктирные кривые 1 и 2 определяют значение U и I , при которых отношение длины быстрой волны пространственного заряда к продольному периоду ФК ($\frac{\lambda}{d_z}$, где $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega + \omega_p}$, v – скорость пучка, ω и ω_p – частота генерации и плазменная частота) равно 4 и 3, соответственно.

Основная идея использования ФК в данной схеме заключается в том, что инжектируемый электронный поток, проходя через ФК, модулируется возбуждаемым электромагнитным полем (базовой модой ФК), и затем формирует ВК во второй секции. Это приводит к тому, что ВК начинает осциллировать на частоте возбуждаемой моды и отражать часть пучка обратно в секцию с ФК. В совокупности это приводит к появлению положительной обратной связи между электромагнитным полем и ВК.

Показано, что оптимум по электронному КПД в рассматриваемой схеме двухсекционного виркатора с ФК достигается при токе, лежащем между значениями критического тока для каждой из секций (см. рис. 10а). Более того, максимальное значение достигается при отношении длины быстрой волны пространственного заряда к продольному периоду ФК, равном 4, а преодоление критического тока для секции с ФК приводит к резкому падению КПД вследствие развития в системе сжатого состояния⁸, свойственного данной схеме. Возрастание КПД связано с тем, что предложенная схема позволяет орга-

⁸Ignatov A. M., Tarakanov V. P. Squeezed state of high-current electron beam //Physics of plasmas. – 1994. – Т. 1. – №. 3. – С. 741-744.

низовать распределённую обратную связь как с помощью электромагнитного поля внутри ФК, так и за счет предварительной модуляции пучка, проходящего через ФК и формирующего ВК во второй секции. Образующийся ВК двигается к плоскости инжекции, проходя через ФК, и увеличивает амплитуду своих колебаний за счет действия распределённой обратной связи.

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

1. Показано, что превышение магнитным полем характерного значения B_{eq} (где B_{eq} — магнитное поле, при котором равновесный радиус пучка равен радиусу трубы дрейфа) приводит к резкому падению величины критического тока.

2. Обнаружено, что при изменении величины инжектируемого тока происходит скачкообразное переключение частоты генерации модели виркатора, которое сопровождается изменением динамики электронного потока. Проведено качественное сопоставление результатов трёхмерного численного моделирования и одномерной аналитической теории. Показано, что зависимости изменения импульса частиц от угла их пролёта имеют схожий характер, при этом увеличение инжектируемого тока приводит к приближению результатов моделирования к теоритическим зависимостям.

3. Предложена новая перспективная модель релятивистской виркаторной системы с пространством взаимодействия в виде эллиптического резонатора. Обнаружено значительное увеличение пространственной амплитуды колебаний ВК, по сравнению с классической схемой аксиального виркатора. Этот эффект обусловлен интенсивным взаимодействием ВКс одной из собственных мод электродинамической структуры. Анализ результатов показал, что эллиптический резонатор обеспечивает высокую эффективность взаимодействия релятивистского электронного пучка с электромагнитными полями за счет лучшей локализации возбуждаемых полей в такой электродинамической структуре. Это приводит к значительному увеличению КПД генерации системы, по сравнению с цилиндрическим резонатором, в ≈ 2.5 раза.

4. Проведено исследование нелинейной динамики многопучковой виркаторной системы. Исследована эволюция критического тока в зависимости от тока дополнительных пучков, их количества и расположения. Показано, что увеличение тока дополнительного пучка приводит к уменьшению критического тока для базового пучка, что обусловлено увеличением кулоновских сил пространственного заряда. Показано, что уменьшение расстояния между пучками приводит к уменьшению критического тока, что связано с возрастанием кулоновских сил между электронными потоками. Обнаружено, что увеличение количества инжектируемых электронных потоков приводит к уменьшению критического тока в каждом из них, независимо от их расположения.

5. Проанализирована возможность эффективного взаимодействия несколь-

ких ВК в едином пространстве взаимодействия. Обнаружено, что между пучками появляется положительная обратная связь, приводящая к взаимной раскачке амплитуды колебаний всех ВК и увеличению КПД системы. Показано, что в двухпучковой системе возможно повысить КПД в пять раз, по сравнению с аналогичной однопучковой схемой, при этом максимум по КПД характеризуется скоррелированной динамикой между пучками с коэффициентом корреляции близким к 1, а минимум, напротив, низкой корреляцией.

6. Обнаружен эффект, заключающийся в подстройке частоты колебаний ВК в менее интенсивных электронных потоках к частоте ВК в более интенсивном электронном потоке через общее электромагнитное поле.

7. Получена карта динамических режимов, реализующихся при взаимодействии трех электронных потоков со сверхкритическими токами, в зависимости от параметров расстроек токов каждого из пучков относительно базового. Выделены четыре основных режима, отличающихся количеством интенсивных частотных компонент в Фурье-спектре генерируемого электромагнитного излучения.

8. Предложен подход, позволяющий существенно увеличить частоту генерации за счет работы на высших модах ФК. Возбуждение конкретной собственной моды ФК в многолучевой схеме осуществляется за счет настройки конфигурации источников излучения в соответствии с пространственным распределением электромагнитного поля конкретной моды. Оптимизация параметров системы для конфигурации с четырьмя электронными потоками показала, что возможно повысить электронный КПД до 28% при частоте генерации 37.6 ГГц.

9. Предложена модель двухсекционного виркатора, в первой секции которого располагается ФК. Получена зависимость мощности электромагнитного излучения и КПД системы на плоскости “энергия электронного потока U — величина инжектируемого тока I ”. Обнаружено, что в рассматриваемом диапазоне параметров максимальный электронный КПД составляет 12.8%. Показано, что оптимум по электронному КПД достигается при инжектируемом токе, лежащем в диапазоне между критическими токами для каждой из секций, а преодоление им критического тока для секции с ФК приводит к резкому падению КПД вследствие развития сжатого состояния, при этом максимальное значение достигается при отношении длины быстрой волны пространственного заряда к продольному периоду ФК равному 4. Возрастание эффективности связано с тем, что данная модель позволяет организовать распределённую обратную связь как с помощью электромагнитного поля внутри ФК, так и за счет предварительной модуляции пучка, формирующего ВК во второй секции.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, входящие в базы ци-

тирования Web of Science и/или Scopus

1) Badarin, A. A., Kurkin, S. A., Frolov, N. S., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Higher-order modes excitation in generator with photonic crystal //Results in Physics. – 2019. – Vol. 15. – P. 102758.

2) Badarin, A. A. Analysis of computational error behavior at the numerical simulation of curved electrodynamic systems // Cybernetics and Physics. – 2019. – Vol. 8. – Pp. 205–208.

3) Бадарин А. А., Куркин, С. А., Фролов, Н. С., Рак, А. О., Храмов, А. Е. Исследование и оптимизация характеристик генерации сверхмощного виртода // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 3. – С. 436 - 440

4) Badarin, A. A., Kurkin, S. A., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Processes of virtual cathodes interaction in multibeam system //Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – №. 8. – P. 083110.

5) Бадарин, А. А., Куркин, С. А., Фролов, Н. С., Сельский, А. О., Храмов, А. Е., Короновский, А. А. Анализ сложных динамических режимов в различных модификациях релятивистских генераторов на виртуальном катоде //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – №. 11. – С. 1595-1600.

6) Куркин, С. А., Бадарин, А. А., Короновский, А. А., Фролов, Н. С., Храмов, А. Е. Моделирование неустойчивостей в релятивистском электронном потоке в среде CST Particle Studio //Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29. – №. 7. – С. 109-122.

7) Бадарин, А. А., Куркин, С. А., Короновский, А. А., Рак, А. О., Храмов, А. Е. Моделирование процессов развития и взаимодействия неустойчивостей в релятивистском электронном потоке при изменении толщины пучка //Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – №. 3. – С. 284-292.

8) Kurkin, S. A., Badarin, A. A., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E. The development and interaction of instabilities in intense relativistic electron beams //Physics of Plasmas. – 2015. – Vol. 22. – №. 12. – P. 122110.

9) Бадарин, А. А., Куркин, С. А., Храмов, А. Е. Мультистабильность в релятивистском электронном потоке со сверхкритическим током //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – №. 12. – С. 1646-1646.

10) Бадарин, А. А., Куркин, С. А., Короновский, А. А., Храмов, А. Е. Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – №. 23. – С. 72-80.

11) Frolov N. S., Kurkin S. A., Khramova M. V., Badarin A. A., Koronovskii A. A., Pavlov, A. N., Hramov A. E. Perspective sub-THz powerful microwave generator "nanovircator" for T-rays biomedical diagnostics //Proceedings of SPIE, 2016. – Vol. 9917. – P. 991721.

12) Kurkin, S. A., Badarin, A. A., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode //Physics of Plasmas. – 2014. – Vol. 21. – №. 9. – P. 093105.

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus

13. Badarin A. A., Kurkin S. A., Starodubov A. V., Frolov N. S., Koronovskii, A. A. Research of Volume Free-Electron Laser with Photonic Crystal Structure for Operation in Sub-Terahertz Range //2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2019. – Pp. 1-2.

14. Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii, A. A., Hramov, A. E., Rak, A. O. Novel Schemes of High-Power Relativistic Vircators //2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2019. – Pp. 1-2.

15. Starodubov A. V., Badarin A. A., Galushka V. V., Pavlov A. N., Kalinin Y. A., Kurkin S. A., Koronovskii A. A. Study of a Promising Electrodynamic Photonic Crystal-like Structure inside a Rectangular Waveguide //2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2019. – Pp. 1-2.

16. Badarin A. A., Kurkin S. A., Frolov N. S., Koronovskii, A. A., Hramov A. E., Rak, A. O. Analysis of the dispersion characteristics of the photonic crystal in the generator with intense relativistic electron beam //2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2018. – Pp. 265-266.
17. Kurkin S. A., Badarin A. A., Frolov N. S., Koronovskii A. A., Hramov A.E. Regularities and mechanisms of development of instabilities in the system with intense relativistic electron beam //2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2018. – Pp. 279-280.
18. Badarin A. A., Kurkin S. A., Andreev A. V., Koronovskii A. A., Frolov N. S., Hramov A. E., Rak A. O. Study of multibeam relativistic vircator //2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2017. – Pp. 1-2.
19. Badarin, A. A., Kurkin, S. A., Andreev, A. V., Koronovskii, A. A., Frolov, N. S., Hramov, A. E. Virtual cathode oscillator with elliptical resonator //2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2017. – Pp. 1-2.
20. Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., Kuraev A. A., Rak A. O. Increase of generation frequency of relativistic electron beam with virtual cathode using the regimes with the developed instabilities //2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2016. – Pp. 1-2.
21. Hramov A. E., Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A. Vortex structures formation in ultrarelativistic electron beam with virtual cathode //2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS). – IEEE, 2015. – P. 1-1.
22. Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Generation of higher harmonics in relativistic electron beam with virtual cathode //2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS). – IEEE, 2015. – P. 1-1.
23. Kurkin S. A., Badarin A. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E. The use of higher harmonics for Sub-THz generation in relativistic virtual cathode oscillator //2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). – IEEE, 2015. – Pp. 1-2.
24. Badarin A. A., Kurkin S. A., Hramov A. E. Study of oscillation modes with intensive higher harmonics in a relativistic electron beam with a virtual cathode //2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. – IEEE, 2014. – Pp. 837-838.

Глава в монографии

25. Бадарин А.А., Короновский А.А. Куркин С.А. и др. Мощные пучково-плазменные системы с виртуальным катодом и перспективы их продвижения в суб-ТГц и ТГц диапазоны / Глава в монографии «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона» / Под ред. А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2016. 460 с. ISBN: 978-5-7433-3013-3.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

26. Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А. Программный модуль для генерации вычислительных сеток. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615427
27. Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А. Программный модуль эффективного численного решения уравнений Максвелла. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615431
28. Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А., Журавлев М.О., Сельский А.О., Кириллов О.А., Елистратов А.А. Программа для обработки и анализа экспериментальных данных. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619577
29. Бадарин А.А., Куркин С.А., Кириллов О.А., Короновский А.А. Программный модуль для создания сложных геометрических объектов при 3D моделировании электронных приборов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2018619598

30. Бадарин А.А., Куркин С.А., Елистратов А.А., Короновский А.А. Программный модуль решения кинетического уравнения Власова методом крупных частиц. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619597

31. Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ по визуализации состояний релятивистского электронного потока при 3D моделировании (3DBeamVis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614534.

32. Куркин С.А., Бадарин А.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ по расчету характеристик генерации релятивистского вакуумного генератора, моделируемого с использованием трехмерного PIC кода (Relativistic Generator Characteristics Calc). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614530.

Подписано в печать 07.10.2020. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Times. Печать офсетная. Печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ №7133

Типография «Техно-Декор»,

Саратов, ул. Московская, 160, тел.: 77-07-48, www.sar-print.ru