

На правах рукописи

Полевин Сергей Декабрович

**РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ОДНОМODOVЫЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ
СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ТОМСК-2006

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН

Научный консультант: академик РАН
Коровин С.Д.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Стрелков П.С.
(Институт общей физики им. А.М. Прохорова
РАН, г. Москва)

доктор физико-математических наук,
профессор
Аржанников А.В.
(Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск)

доктор технических наук,
профессор
Усов Ю.П.
(Томский политехнический университет,
г. Томск)

Ведущая организация: Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург.

Защита состоится «8» 09 2006 г. в «15» часов на заседании диссертационного совета Д.003.031.01 в Институте сильноточной электроники СО РАН (634055, г. Томск, пр. Академический 2/3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной электроники СО РАН.

Автореферат разослан «3» 05 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Проскуровский Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

История вопроса и актуальность темы. За последние несколько десятилетий источники мощного когерентного СВЧ-излучения нашли широкое применение в различных областях науки и техники, таких как физика плазмы, спектроскопия, физика твердого тела, онкология, управляемый термоядерный синтез, радиолокация и др. Бурное развитие высоковольтной импульсной техники позволило разработать эффективные методы генерации интенсивных пучков релятивистских электронов с энергией значительно превышающей их энергию покоя ($mc^2 = 511$ кэВ, где m – масса покоя электрона, c – скорость света). С появлением в конце 60-х годов сильноточных электронных ускорителей прямого действия¹ позволявших в режиме взрывной эмиссии формировать релятивистские электронные пучки (РЭП) с плотностью тока 10^3 - 10^6 А/см² и мощностью 10^8 - 10^{13} Вт открылись перспективы существенного повышения импульсной мощности излучения в освоенных нерелятивистской (классической) электроникой диапазонах длин волн, а также создания мощных СВЧ-генераторов в более коротковолновых диапазонах. Качественное изменение взаимосвязи энергии $mc^2\gamma$ и скорости частиц V ($\gamma = (1-V^2/c^2)^{-1/2}$ – релятивистский фактор), приближающейся к скорости света, не могло не привести к существенному изменению поведения электронов при их взаимодействии с электромагнитными волнами. Это потребовало развития новых методов исследований и расчетов в электронике СВЧ. Стало возможным создание принципиально новых релятивистских микроволновых приборов.

Теоретическая основа для описания приборов с прямолинейными ультрарелятивистскими электронными пучками была заложена работой² М.И. Петелина, где выводится закон, связывающий основные параметры генератора и энергию используемых частиц. Эта связь, называемая еще принципом подобия, показывает возможность сохранения высокого КПД прибора при сколь угодно высокой энергии электронов. Позже аналогичный закон³ был выведен и для приборов типа убитрон со слабо искривленными ультрарелятивистскими пучками. Затем эти законы подобия были обобщены на всю область изменения энергии частиц.

Первые генерация СВЧ-излучения с помощью сильноточного РЭП была осуществлена в 1970 году (с эффективностью существенно менее процента). Современный этап развития релятивистской высокочастотной электроники, связанный с высокоэффективным использованием энергетических возможностей интенсивных РЭП, начался с создания в 1973 году первой релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ) сантиметрового диапазона⁴ с КПД около 10%.

К началу 80-х годов на основе релятивистских генераторов в сантиметровом диапазоне длин волн уже было получено когерентное излучение на уровне 10^8 - 10^9 Вт.

¹ Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. // М.: Сов. радио, 1974, 256 с.

² Петелин М. И. Принцип подобия для высокочастотных приборов с ультрарелятивистскими электронными потоками. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1970, Т. 13, № 10, с. 1586-1589.

³ Петелин М. И., Сморгонский А. В. К нелинейной теории убитрона. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1973, Т. 16, № 2, с. 232-237.

⁴ Ковалев Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д., Сморгонский А. В., Цопп Л. Э. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов. // Письма в ЖТФ, 1973, Т. 18, № 4, с. 232-235.

Многочисленные первоначальные попытки создания релятивистских электронных генераторов миллиметрового диапазона в своем большинстве оказались неудачными. Причины этого заключались как в низком качестве электронных пучков первых сильноточных ускорителей, так и в несовершенстве использовавшихся электродинамических систем, не обеспечивавших режима одномодовой генерации. Вследствие этого была низка эффективность генерации и степень когерентности излучения. (Исключение составляли два эксперимента, в которых в длинноволновой части миллиметрового диапазона были реализованы ЛОВ⁵ с мощностью 10 МВт при КПД 3% и релятивистский гиротрон⁶ с мощностью 25 МВт при КПД 4%.) Для создания эффективных коротковолновых устройств требовалось решать вопросы формирования электронных потоков соответствующего качества, а также адекватно использовать известные из классической электроники методы селекции типов колебаний, разрабатывать новые методы селекции волн и соответствующие электродинамические системы.

Кроме проблемы повышения эффективности релятивистских СВЧ-приборов, перед экспериментаторами остро вставали вопросы, связанные с освоением больших токов сильноточных электронных пучков, повышением мощности и энергии импульсов микроволнового излучения. В 1982 году Суливаном был предложен типично «сильноточный» релятивистский микроволновый генератор, основанный на колебаниях виртуального катода (ВК), образующегося в эквипотенциальной полости при инжекции в нее сверхкритического тока – виркатор⁷. СВЧ-приборы с ВК привлекают к себе внимание своей компактностью (длина области взаимодействия потока частиц и высокочастотного поля сравнима с длиной волны излучения), простотой конструкции и возможностью работы без внешнего магнитного поля. К сожалению, в большинстве экспериментов с виркаторами (особенно без внешнего магнитного поля) была низка эффективность генерации (~1%) и нестабильна частота излучения. Это чаще всего было обусловлено большим значением инжектируемого тока и использованием сверхразмерных электродинамических систем с высокой плотностью электромагнитных колебаний. Задача обеспечения режима одномодовой генерации и повышения КПД виркаторов стояла достаточно остро.

Другой важной проблемой на пути повышения мощности и энергии излучения релятивистских генераторов являлось ограничение длительности микроволновых импульсов. Так в релятивистском карсинотроне⁸ ограничение импульсов на уровне ~10 нс наблюдалось уже при мощности излучения около 300 МВт. Требовалось исследовать возможные механизмы подавления генерации и предложить адекватные методы решения данной проблемы.

Кроме того, следует отметить, что реализованные в лабораторных условиях экспериментальные макеты релятивистских СВЧ-генераторов, как правило,

⁵ Иванов В. С., Ковалев Н. Ф., Кременцов С. И., Райзер М. Д. Релятивистский карсинотрон миллиметрового диапазона. // Письма в ЖТФ, 1978, Т. 14, вып. 4, с. 817-820.

⁶ Воронков С. Н., Кременцов В. И., Стрелков П. С., Шкварупец А. Г. Вынужденное циклотронное излучение сильноточного релятивистского пучка электронов в миллиметровом диапазоне длин волн. // ЖТФ, 1982, Т. 52, № 1, с. 106-108.

⁷ Sullivan D. M. // Патент 4345220 (США), 1982, МКИ: Н 03 В 9/01.

⁸ Ельчанинов А. С., Загулов Ф. Я., Коровин С. Д., Месяц Г. А., Ростов В. В. Ограничение длительности импульсов СВЧ-излучения в релятивистском карсинотроне. // Письма в ЖТФ, 1981, Т. 6, вып. 19, с. 1168-1171.

представляли сложные громоздкие установки, обладающие низким КПД, плохой воспроизводимостью импульсов и малым ресурсом работы. В последние несколько десятилетий быстрое развитие в сильноточной электронике получили импульсно-периодические электронные ускорители (мощность в импульсе 10^8 - 10^{10} Вт, энергия электронов 10^5 - 10^6 эВ, длительность импульсов 10^{-9} - 10^{-7} с, частота повторения до 1000 Гц). При сравнительно небольших габаритах они обладают высокой эффективностью, стабильностью параметров РЭИ и большим ресурсом работы. Создание на их основе релятивистских СВЧ-генераторов позволяло расширить область практического применения мощных источников микроволнового излучения.

Цель диссертационной работы. Основной целью работы являлось исследование методов увеличения мощности, длительности импульсов и частоты излучения релятивистских СВЧ-генераторов на основе сильноточных электронных пучков. Конкретные решаемые задачи, естественно варьировались в зависимости от исследуемых механизмов взаимодействия и того уровня развития теории и эксперимента, с которых начиналась работа.

Так к концу 70-х годов теория релятивистских ЛОВ (в основном усилиями Н.Ф. Ковалева и его соавторов) была достаточно развита и в главных аспектах подтверждена экспериментально. Стояла задача по дальнейшему исследованию релятивистского карсипотрона: влиянию несинхронных волн на механизм энергообмена в генераторе; методов повышения эффективности за счет профилирования фазовой скорости синхронной гармоник, а также введения отражений от концов электродинамической системы; возможности широкополосной перестройки частоты генерации; механизма спонтанного ограничения длительности микроволновых импульсов и способов увеличения их длительности. Важна была (с точки зрения практического приложения) реализация импульсно-периодического режима генерации.

Другой круг задач был связан с исследованием методов повышения частоты излучения релятивистских СВЧ-приборов и практической реализации одномодовых релятивистских генераторов в миллиметровом диапазоне длин волн. Использование для этих целей черенковских генераторов со сверхразмерными электродинамическими системами позволяло уменьшить напряженность электрических полей на поверхности замедляющей структуры во избежание ее СВЧ-пробоя, а также применять сильноточные пучки с большими поперечными размерами, что было существенно для повышения мощности излучения.

Значительная часть работы была посвящена исследованию виркатора, основанного на формировании виртуального катода в двухсекционном одномодовом резонаторе, при инжекции электронного пучка с небольшим уровнем надкритичности тока. Подобная конструкция виркатора позволила в несколько раз в сравнении с односекционным виркатом повысить эффективность генерации и обеспечить широкополосную перестройку частоты излучения. Были проведены исследования механизмов ограничения и возможных путей увеличения длительности микроволновых импульсов в виркаторе.

Научная новизна работы. Основные результаты получены впервые. Наиболее важные из них:

1. Исследованы и экспериментально реализованы эффективные методы повышения частоты когерентного излучения релятивистских СВЧ-генераторов:

- доплеровское преобразование частоты осцилляторов в генераторе, основанном на вынужденном излучении Смита-Парселла;
 - использование черенковского взаимодействия электронов пучка с замедленными электромагнитными волнами, распространяющимися вдоль поверхности сверхразмерного гофрированного стержня;
 - совмещение в одном приборе маломощного задающего генератора, запитываемого малой частью рабочего электронного пучка и мощного сверхразмерного выходного устройства.
2. Найдены стартовые условия возбуждения колебаний в черенковских генераторах с резонансными электродинамическими системами в условиях комбинированного (черенковского и циклотронного) взаимодействия электронного пучка с электромагнитными волнами.
 3. Показано существенное влияние попутной электромагнитной волны на работу релятивистской ЛОВ. Экспериментально реализованы методы повышения КПД релятивистской ЛОВ за счет увеличения фазовой скорости синхронной гармоники волны вдоль пространства взаимодействия, а также отражения рабочей волны от концов электродинамической системы.
 4. Проведены исследования механизма ограничения и методов увеличения длительности микроволновых импульсов в релятивистской ЛОВ. Показано, что в наносекундном диапазоне времен, когда движение катодной и коллекторной плазмы пренебрежимо мало, причиной ограничения длительности импульсов является эмиссия электронов и ионов из взрывоэмиссионной плазмы, возникающей на поверхности гофр замедляющей системы под действием интенсивных ВЧ полей.
 5. Проведены численные и экспериментальные исследования одномодового двухсекционного виркатора. Показано, что использование в виркаторе двухсекционной электродинамической системы за счет более благоприятного распределения ВЧ поля в пространстве взаимодействия с электронами пучка позволяет повысить эффективность генерации в 3-4 раза (в области напряжений ~ 1 МВ), в сравнении с односекционной системой.
 6. Исследованы возможные причины ограничения длительности импульсов в двухсекционном виркаторе. Показано, что энергия и длительность импульсов существенно ограничены потерями тока электронного пучка в вакуумном диоде вследствие взрывной электронной эмиссии с фокусирующего электрода катода. Другим механизмом, усиливающим спад микроволновой мощности, является интенсивная эмиссия электронов и ионов из поверхностной плазмы, появляющейся в резонаторе виркатора под действием интенсивных ВЧ полей.

Практическая значимость. Импульсно-периодические ускорители и выполненные на их основе релятивистские СВЧ-генераторы применяются в настоящее время в ИСЭ СО РАН, ИПФ РАН, ИРЭ РАН, ИЭФ УрО РАН, ИТЭС РАН и ряде зарубежных организаций Англии, Франции, США, Китая для исследований в области релятивистской высокочастотной электроники, физики твердого тела, биологии, а также ряде радиотехнических приложений (радиолокации, тестировании электронного оборудования на электромагнитную совместимость и т.д.). Изложенные в диссертационной работе результаты исследований методов увеличения мощности, длительности импульсов и частоты вынужденного излучения сильноточных РЭП могут использоваться для создания мощных микроволновых

источников в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Личный вклад автора. В представленных в диссертационной работе результатах автор внес определяющий вклад в постановку задач исследований, проведение экспериментов и анализ полученных результатов, а также в разработку основных конструктивных решений, используемых в экспериментальных макетах и устройствах. В постановке отдельных задач и обсуждении результатов работ активное участие принимали С.Д. Коровин и В.В. Ростов. Фамилии соавторов, принимавших участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Положения, выносимые на защиту.

1. Экспериментально реализованы в миллиметровом диапазоне и исследованы новые релятивистские черенковские приборы: генератор, основанный на вынужденном излучении Смита-Парселла, генераторы стержневой волны, двухпучковый секционированный генератор. Проведенные исследования позволили впервые достигнуть в длинноволновой части миллиметрового диапазона уровень мощности одномодового излучения – 600 МВт при КПД 20 %, в коротковолновой части миллиметрового диапазона – 100 МВт при КПД 4 %.
2. Теоретически (в рамках анализа пусковых условий генерации) и экспериментально показано, что зависимость мощности излучения от величины продольного фокусирующего магнитного поля в релятивистских черенковских генераторах с резонансными электродинамическими системами может иметь несколько «провалов», обусловленных циклотронным взаимодействием попутной и встречной электромагнитных волн с электронным пучком. Экспериментально продемонстрирована эффективность циклотронной селекции разночастотных колебаний в генераторе, основанном на вынужденном излучении Смита-Парселла.
3. Использование в релятивистской ЛОВ отражений рабочей моды от концов замедляющей структуры и оптимизация взаимодействия электронного пучка со встречной и с попутной электромагнитными волнами позволяет повысить эффективность генерации до 30% и сократить длину прибора в 2–3 раза.
4. Уровень мощности когерентного излучения одномодовой релятивистской ЛОВ может достигать 3 ГВт в сантиметровом и 5 ГВт в дециметровом диапазонах длин волн с энергией в импульсе до 90 Дж и 250 Дж, соответственно. Изменение периода замедляющей системы при неизменных параметрах электронного пучка позволяет перестраивать частоту генерации в полосе до 15%.
5. Основной причиной ограничения длительности наносекундных импульсов излучения релятивистской ЛОВ является развитие взрывной эмиссии на поверхности замедляющей структуры под действием интенсивных ВЧ полей. Повышение электропрочности вакуумной изоляции электродинамической системы 3-ГВт релятивистской ЛОВ сантиметрового диапазона позволило увеличить длительность микроволновых импульсов более чем в 3 раза.
6. Предложена схема одномодового двухсекционного вилкатора без внешнего магнитного поля. Экспериментально показано, что использование в вилкаторе одномодовой двухсекционной системы с электродинамической обратной связью позволяет повысить эффективность генерации до 10 % (относительно мощности

инжектируемого пучка), сохраняя при этом когерентность излучения. В дециметровом диапазоне длин волн мощность одномодового излучения в двухсекционном виркаторе может достигать 1 ГВт, полоса регулируемой перестройки частоты генерации – до 15 %. Реализован импульсно-периодический режим генерации виркатора с частотой повторения до 50 Гц при мощности излучения в импульсах около 300 МВт.

7. В исследованиях, проведенных с использованием субмикросекундных высоковольтных генераторов, показано, что энергия импульса излучения в двухсекционном виркаторе ограничена на уровне около 100 Дж при пиковой мощности ≈ 1 ГВт. Ограничение энергии и длительности микроволновых импульсов обусловлено двумя факторами:

- потерями тока пучка в вакуумном диоде, связанными с развитием взрывной электронной эмиссии с поверхности фокусирующего электрода катода;
- эмиссией электронов и ионов из плазмы, формирующейся на поверхности резонатора виркатора по действием интенсивных ВЧ полей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на различных конференциях и симпозиумах: «Релятивистская высокочастотная электроника» - 1982 г. (Горький), 1984 г. (Москва), 1987 г. (Новосибирск), 1989 г. (Свердловск); «Мощные электронные и ионные пучки» - 1988 (Карлсруэ), 1990 г. (Новосибирск), 1992 г. (Вашингтон), 1994 г. (Сан-Диего), 1998 г. (Хайфа), 2000 г. (Нагаоки), 2002 г. (Альбукерка), 2004 г. (Санкт-Петербург); «Международная конференция по импульсной технике» - 1993 г., 1995 г. (Альбукерка), 1997 г. (Балтимор), 1999 г. (Монтерей), 2001 г. (Лас-Вегас), «Симпозиум по сильноточной электронике» - 1986 г., 2000 г., 2004 г. (Томск), «Международный симпозиум EUROEM» - 1994 г. (Бордо), 1998 г. (Тель-Авив), 2000 г. (Эдинбург) и других.

Результаты исследований опубликованы в 35 статьях и 35 трудах Международных и Российских симпозиумов и конференций. Получено одно авторское свидетельство на изобретение. Список основных публикаций по теме диссертационной работы приведен в конце автореферата.

Структура диссертации. Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 221 страницу, включая 116 рисунков, приложение на 6 страницах и список литературы из 193 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены вопросы, касающиеся создания и применения сильноточных импульсно-периодических ускорителей для генерации мощного микроволнового излучения [2,10,20,50].

В §1.1 показаны конструктивные особенности сильноточных импульсно-периодических ускорителей «СИНУС» (рис. 1), позволившие обеспечить их высокую надежность, эффективность и стабильность параметров импульсов: емкостной накопитель в виде коаксиальной формирующей линии, резонансный трансформатор с коэффициентом связи контуров близким к единице, высоковольтный газовый разрядник с принудительным продувом газа и тригatronным запуском. Приведены результаты испытаний и параметры ускорителей «СИНУС»: энергия электронов 0,2-2 МэВ, ток пучка 2-20 кА, длительность импульсов 4-130 нс, частота следования

импульсов до 1000 Гц, среднеквадратичный разброс нестабильности амплитуды импульсов 0,7-3 %.

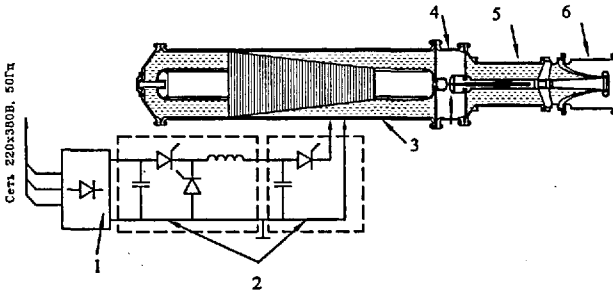


Рис. 1. Конструктивная схема ускорителей «СИНУС»:

- 1 — выпрямитель,
- 2 — первичный коммутатор,
- 3 — формирующая линия с трансформатором Тесла,
- 4 — высоковольтный разрядник,
- 5 — передающая линия,
- 6 — вакуумный диод.

§1.2 посвящен вопросам формирования электронных пучков с параметрами, приемлемыми для создания эффективных релятивистских импульсно-периодических СВЧ-генераторов в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазоне длин волн [7,43,61,65]. Рассмотрены особенности формирования пучков как в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией (КДМИ), так и в планарных диодах без внешнего магнитного поля.

В §1.3 описаны методы измерения параметров релятивистских электронных пучков и мощных СВЧ-импульсов.

Вторая глава посвящена исследованию методов повышения частоты и мощности вынужденного излучения релятивистских черенковских генераторов и созданию эффективных импульсно-периодических источников мощного миллиметрового излучения.

В §2.1 приведены теоретические оценки, показывающие реальность создания эффективных релятивистских черенковских генераторов одномодового излучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Обсуждаются перспективные, с точки зрения повышения частоты и мощности излучения, варианты черенковских приборов. Отмечается, что для повышения мощности при укорочении длины волны излучения в релятивистских черенковских генераторах необходимо переходить к сверхразмерным электродинамическим системам. Это позволяет уменьшить напряженность электрических ВЧ полей на поверхности замедляющей структуры во избежание ее СВЧ-пробоя [1,11] и использовать для генерации микроволнового излучения электронные пучки с относительно большим поперечным размером. Естественно возникающая при этом проблема обеспечения режима одномодовой генерации в ряде случаев решается использованием как электродинамических, так и электронных методов селекции.

В §2.2 изложены результаты экспериментов по исследованию черенковского МСЭ-генератора, основанного на вынужденном излучении Смита-Парселла, (флимаэтрона) [16,17]. В флимаэтроне частота излучения мигающего диполя, образованного прямолинейно движущимся вблизи металлической гофрированной поверхности электроном и его изображением, может, вследствие эффекта Доплера, более чем в γ^2 раз превышать частоту его осцилляций $\Omega = 2\pi V_e / d$. Поскольку период гофрировки d при этом существенно превышает длину волны излучения,

подобный прибор становится привлекательным с точки зрения повышения частоты генерации. В флиматроне генерация возможна как на основной высокочастотной, так и на «паразитной» низкочастотной ветвях синхронизма, поэтому для селекции мод был применен метод, основанный на циклотронном поглощении «паразитных» волн рабочим электронным пучком. Суть его состоит в том, что если в полосе черенковского синхронизма находятся n -е пространственные гармоники двух попутных электромагнитных волн, то обе волны испытывают циклотронное поглощение при одном и том же значении магнитного поля $H_r \approx \frac{mc^2}{e} h_d \gamma \beta_z$, где $h_d =$

$2\pi/d$. В то же время встречные пучку волны поглощаются при разных магнитных полях $H_r^{(1,2)} \approx \frac{mc^2}{e} \gamma \left(2 \frac{\omega_{1,2}}{c} - h_d \beta_z \right)$ и, соответственно, высокочастотные и

низкочастотные колебания могут быть подавлены раздельно. Теоретически и экспериментально было показано, что в области резонансных магнитных полей величина стартового тока генератора возрастает в несколько раз. Вдали от циклотронных резонансов генерация происходила в многочастотном режиме. На рис. 2 представлены зависимости мощности высокочастотного (а) и низкочастотного (б) излучений от напряженности продольного магнитного поля. При напряженности магнитного поля $H \approx H_r^{(2)} \approx 22$ кЭ, когда реализовывалась циклотронная селекция разночастотных колебаний, на длине волны 4,9 мм была получена одномодовая генерация с мощностью около 20 МВт при КПД $\approx 4\%$. Величина доплеровского преобразования составила $d/\lambda \approx \gamma^2$.

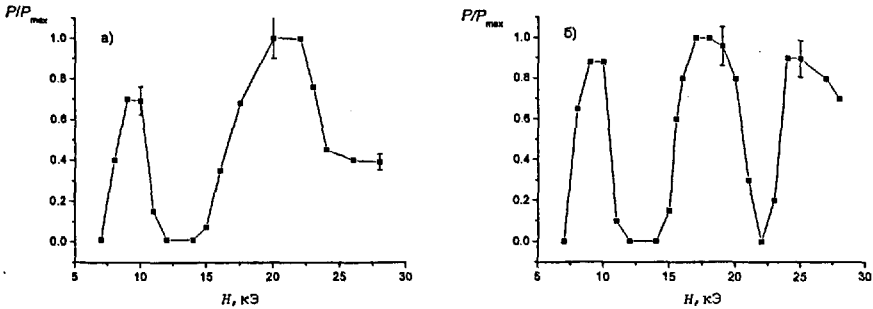


Рис. 2. Зависимости мощности высокочастотного $\lambda \approx 4,9$ мм (а) и низкочастотного $\lambda \approx 12$ мм (б) излучений флиматрона от величины продольного магнитного поля.

Для достижения оптимального по КПД режима генерации в соответствии с соотношениями подобия при укорочении длины волны излучения необходимо увеличивать напряженность синхронного поля. С этой точки зрения наиболее приемлемыми могут быть черенковские генераторы, в которых электронный пучок взаимодействует с основной замедленной волной [9]. В §2.3 описаны эксперименты по исследованию подобных генераторов. В качестве замедляющей структуры и резонатора в генераторах использован отрезок сверхразмерного гофрированного стержня (рис. 3). Вблизи полосы непрозрачности (π -вида) гофрированный стержень

обладает резонансными свойствами, за счет чего в генераторе обеспечивается распределенная связь. «Холодные» электродинамические измерения показали, что спектр колебаний отрезка гофрированного стержня существенно реже спектра колебаний отрезка волновода с близкими размерами. Это позволило успешно решить проблемы, связанные с селекцией типов колебаний в генераторе при сверхразмерности электродинамической системы $D/\lambda \approx 5$. Были реализованы одномодовые генераторы с длиной волны $\lambda \approx 4$ мм, мощностью излучения $P \approx 100$ МВт, КПД $\approx 4\%$ и $\lambda \approx 8$ мм, $P \approx 150$ МВт, КПД $\approx 6\%$.

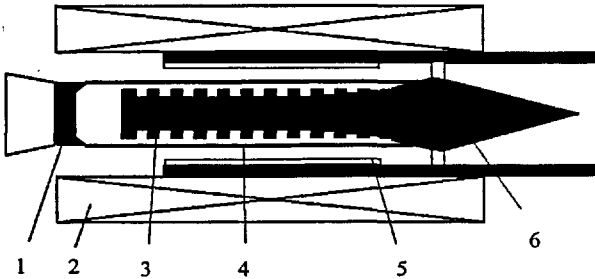


Рис. 3. Схема генератора стержневой волны:

- 1 – катод,
- 2 – соленоид,
- 3 – замедляющая система,
- 4 – электронный пучок,
- 5 – СВЧ-поглотитель,
- 6 – коллектор и выходной преобразователь типа волны.

Проблема селекции мод в существенно сверхразмерных генераторах может быть эффективно решена совмещением в одном приборе одномодового задающего генератора (первый каскад), имеющего относительно малое поперечное сечение и возбуждаемого сравнительно малой частью электронного пучка, а также мощного выходного устройства большого поперечного сечения (второй каскад), в котором при взаимодействии с основной частью электронного пучка происходит усиление сигнала. В §2.4 представлены результаты исследований двухпучкового генератора [18,19], в котором реализован этот принцип (рис. 4). В качестве задающего генератора использовалась релятивистская ЛОВ, а второй каскад состоял из модулирующей секции, пространства дрейфа и короткого отрезка ЛБВ. Достигнутый в экспериментах КПД прибора 20% был близок к расчетному. Мощность одномодового излучения составляла 600 МВт на длине волны $\approx 9,6$ мм. Длительность импульса излучения соответствовала длительности импульса задающего генератора ≈ 15 нс.

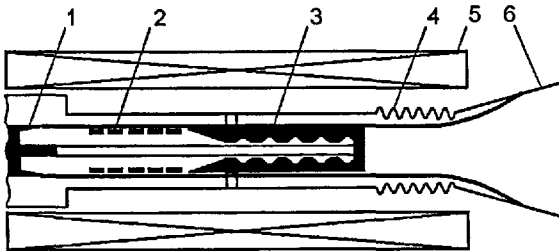


Рис. 4. Схема двухпучкового секционированного генератора:

- 1 – двойной катод,
- 2 – модулятор,
- 3 – задающий генератор (ЛОВ),
- 4 – секция энергоотбора (ЛБВ),
- 5 – соленоид,
- 6 – излучающий рупор.

В §2.5 описаны эксперименты по созданию импульсно-периодического одномодового СВЧ-генератора миллиметрового диапазона. Для генерации использовался оротрон [8] с дифракционным выводом излучения и рабочей модой

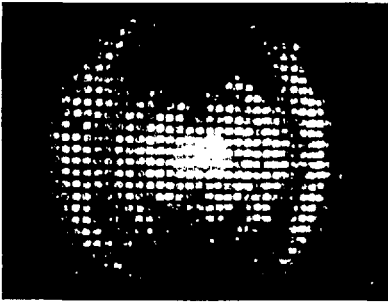


Рис. 5. Свечение газоразрядного табла под действием излучения оротрона.

100 МВт на длине волны 8 мм при КПД 7%, длительность импульсов ≈ 15 нс. Диаграмма направленности (рис. 5) достаточно хорошо соответствовала излучению волны TM_{13} из круглого волновода. При частоте следования импульсов 1 кГц нестабильность мощности генерации была, примерно, в полтора раза выше нестабильности напряжения на катодe и составляла 4-6%.

Третья глава посвящена исследованию релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ).

В §3.1 рассмотрены основные особенности релятивистской ЛОВ: циклотронное поглощение встречной волны, приводящее к немонотонной зависимости мощности излучения от величины продольного фокусирующего магнитного поля; влияние на механизм энергообмена попутной (не синхронной) электромагнитной волны; возможность повышения эффективности генерации за счет профилирования фазовой скорости синхронной гармоники.

В §3.2 изложены результаты исследований одноמודовой релятивистской ЛОВ сантиметрового диапазона длин волн. За счет одноступенчатого увеличения на 10% фазовой скорости синхронной гармоники удалось повысить КПД генератора до 40% при мощности излучения 500 МВт [21-24,31]. В экспериментах было подтверждено существенное влияние в относительно коротких системах попутной

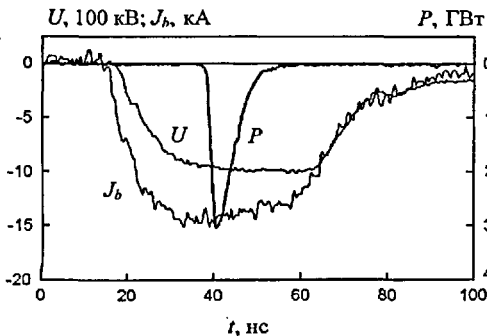


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на катодe, тока пучка и мощности СВЧ-излучения 3-ГВт релятивистской ЛОВ сантиметрового диапазона.

TM_{13} . Для дискриминации конкурирующих мод TM_{32} и TM_{61} применялись две продольные щели в боковой стенке резонатора оротрона шириной около половины длины волны. Электронный пучок формировался в КДМИ со взрывоэмиссионным графитовым катодом. Продольное магнитное поле напряженностью около 20 кЭ создавалось соленоидом со сверхпроводящей катушкой. Вывод излучения осуществлялся через поворотное зеркало на 90° , во избежание пробоя микроволнового окна под действием осевых электронов рабочего пучка. В эксперименте при напряжении на катодe 400 кВ, токе пучка 3,5 кА мощность излучения составляла

электромгнитной волны на работу релятивистской ЛОВ [25,30]. Оптимизация прибора по взаимодействию с попутной волной позволяет повысить эффективность генератора в 1,5-2 раза. С использованием разработанных методов оптимизации было создано несколько импульсно-периодических СВЧ-генераторов сантиметрового диапазона длин волн на основе релятивистских ЛОВ с однородными замедляющими системами с КПД около 25% и мощностью излучения 600-700 МВт.

Приводятся результаты экспериментов на ускорителе «СИНУС-7» по генерации 3-см релятивистской ЛОВ одноимодового излучения с предельно высокой импульсной мощностью ≈ 3 ГВт (рис. 6) [11,13-15]. Получена зависимость длительности микроволновых импульсов от мощности излучения (рис 7).

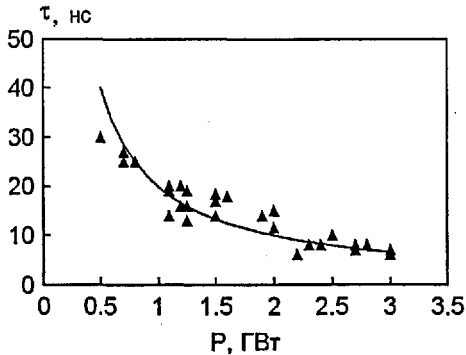


Рис. 7. Зависимость длительности генерируемых импульсов от величины мощности излучения 3-см ЛОВ.

излучения с импульсной мощностью около 5 ГВт и длительностью импульсов ≈ 25 нс. Были проведены исследования возможности широкополосной перестройки частоты генерации посредством изменения периода замедляющей структуры. В экспериментах полоса перестройки частоты (по половинному уровню мощности) составила около 15%.

Описаны эксперименты по созданию компактного микроволнового генератора дециметрового диапазона с импульсной мощностью излучения около 750 МВт на основе резонансной ЛОВ с запиткой от взрывного магнитокумулятивного генератора [66,67].

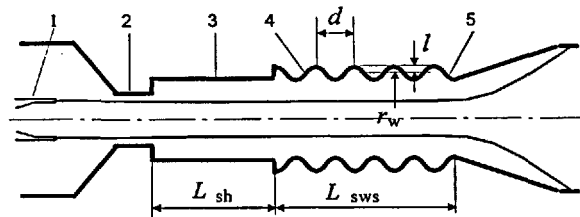


Рис. 8. Конфигурация резонансной ЛОВ:
1 — катод,
2 — запрещенное сужение,
3 — вставка,
4 — замедляющая структура,
5 — выходной отражатель.

Четвертая глава посвящена численному и экспериментальному исследованию процессов, вызывающих ограничение длительности импульсов излучения в релятивистской ЛОВ [1,33-37].

В микроволновых генераторах, запитываемых сильноточными релятивистскими электронными пучками, при напряженности ВЧ электрического поля на поверхности электродинамической системы 10^5 - 10^6 В/см наблюдается ограничение длительности СВЧ-импульсов на уровне 10^{-8} - 10^{-7} с. Круг возможных причин данного явления достаточно широк. Для черенковских приборов с ведущим

(рис 7).
В §3.3 представлены результаты исследований резонансной релятивистской ЛОВ (рис. 8) дециметрового диапазона длин волн [12,45-47,49]. Введение отражений от концов электродинамической системы и оптимизация взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной волнами позволяет увеличить эффективность генерации ЛОВ до 30 % и существенно (в 2-3 раза) уменьшить длину прибора. На основе ускорителя «СИНУС-7» был создан источник одноимодового 8-см

магнитным полем, при длительности импульсов $< 10^{-7}$ с, когда смещение катодной и коллекторной плазмы незначительно, основную роль в укорочении импульса, по-видимому, играет плазма, образующаяся на поверхности замедляющей системы под действием интенсивного ВЧ электрического поля. Источником плазмы могут являться взрывоэмиссионные центры, а также десорбированный с поверхности газ, ионизованный вторичными и рассеянными электронами.



Рис. 9. Следы эрозии на поверхности электродинамической системы 3-ГВт ЛОВ сантиметрового диапазона.

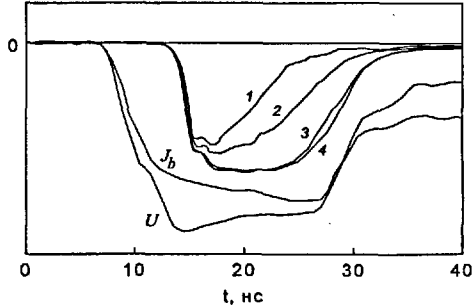


Рис. 10. Осциллограммы напряжения на катоде, тока пучка и СВЧ-импульса после установки гофры со вставкой: 1- вставка на 4-й от запредельного сужения гофры, 2 – на 8-й, 3 – на 1-й гофре. 4 – без вставки.

В экспериментах на ускорителе «СИНУС-7» с одномодовой релятивистской ЛОВ сантиметрового диапазона при мощности излучения 3 ГВт длительность СВЧ-импульсов составляла лишь 6 нс [11] (рис. 6). Длительность импульсов была обратно пропорциональна их мощности, так что энергия в импульсах сохранялась на уровне 20 Дж (рис. 7). На поверхности замедляющей системы ЛОВ в местах максимальной напряженности электрического поля наблюдались следы эрозии (рис.9), такие же, как на поверхности металлических взрывоэмиссионных катодов. (Размер микрократеров составлял 10-50 мкм). Это говорит о связи эффекта укорочения СВЧ-импульса со взрывной эмиссией на поверхности электродинамической системы генератора.

Для проверки влияния на длительность микроволнового импульса взрывной эмиссии были проведены эксперименты (§4.1) на ускорителе «СИНУС-6» с использованием 3-см однородной релятивистской ЛОВ. При мощности излучения около 500 МВт ограничения длительности импульсов в условиях эксперимента не наблюдалось. При установке на одну из гофр замедляющей системы графитовой вставки, облегчающей развитие взрывной эмиссии на ее поверхности, произошло ограничение длительности микроволновых импульсов (рис. 10). Наиболее значительное укорочение длительности (до 7-8 нс) достигалось при установке графитовой вставки вблизи середины замедляющей системы. В тех случаях, когда СВЧ-импульс укорачивался, в промежутке между гофрами в окрестности гофры со вставкой наблюдался интенсивный поток электронов с плотностью тока ~ 1 кА/см², движущихся вдоль силовых линий магнитного поля. Как показывают теоретические оценки и эксперименты, такую плотность тока может обеспечить только взрывная электронная эмиссия.

В §4.2 предложен возможный механизм ограничения длительности микроволновых импульсов в релятивистской ЛОВ. Приводятся теоретические оценки и результаты численного моделирования, показывающие, что в наносекундном диапазоне времен, когда движение катодной и коллекторной плазмы пренебрежимо мало, причиной ограничения длительности импульса релятивистской ЛОВ является развитие взрывной эмиссии на поверхности замедляющей структуры под действием интенсивных ВЧ полей. Прекращение генерации можно объяснить поглощением электромагнитной волны электронной компонентой эмиссии. Положительные ионы, эмитированные из поверхностной плазмы, снимают ограничение по пространственному заряду на ток эмиссии электронов и играют ключевую роль в механизме поглощения волны. Таким образом, длительность СВЧ-импульса ограничена в совокупности временем развития взрывной электронной эмиссии на поверхности электродинамической системы и временем заполнения ионами ее объема.

В §4.3 описаны эксперименты на основе ускорителей «СИНУС-7» и «СТЕНД» по увеличению длительности импульсов релятивистских черенковских генераторов [38,41,51,52]. Как показали исследования, задача увеличения длительности микроволновых импульсов связана с подавлением или отдалением момента развития взрывной электронной эмиссии в электродинамической системе ЛОВ, то есть с повышением ее импульсной электрической прочности в ВЧ поле. В ИСЭ СО РАН был предложен новый метод повышения электрической прочности вакуумной изоляции путем обработки поверхности электродов низкоэнергетическим сильнотоочным электронным пучком (НСЭП) микросекундной длительности. Высокая плотность энергии (~ 10 Дж/см²) и малая длительность импульса электронного пучка обеспечивают обработку поверхности как в режиме плавления, так и частичного испарения. Эффективно удаляя из его поверхностного слоя диэлектрические включения, примеси и газы, и сглаживая поверхность металла, такая обработка подавляет развитие взрывной эмиссии.

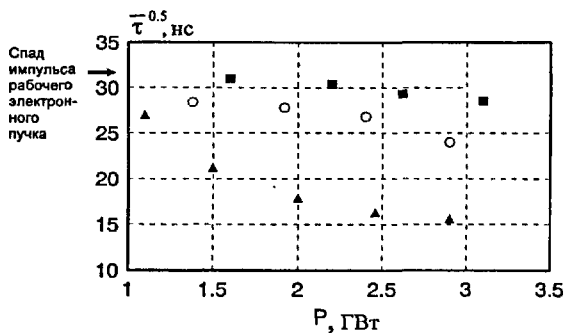


Рис. 11. Зависимости длительности СВЧ-импульсов от мощности излучения 3-см ЛОВ для различных вакуумных условий:

▲ — «масляный» вакуум;
 ○ — «безмасляный» вакуум;
 ■ — «безмасляный» вакуум и замедляющая структура обработана НСЭП (эксперимент на «СИНУС-7», $\tau \approx 50$ нс).

В экспериментах использование обработки поверхности электродинамической системы релятивистской ЛОВ с помощью НСЭП, а также «безмасляных» вакуумных условий позволило увеличить длительность микроволновых импульсов в несколько раз при мощности излучения около 3 ГВт. Энергия в импульсах излучения 3-см

релятивистской ЛОВ составляла около 90 Дж (рис. 11), резонансной релятивистской ЛОВ дециметрового диапазона ≈ 250 Дж (рис. 12).

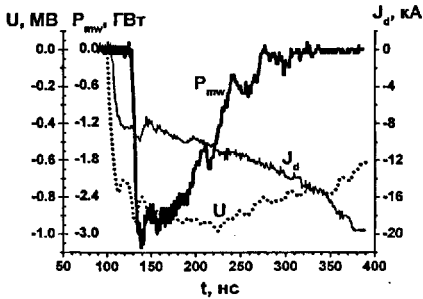


Рис. 12. Осциллограммы напряжения на катоде, тока в вакуумном диоде и СВЧ-излучения резонансной ЛОВ (эксперимент на «СТЕНДе», $t_0 \approx 150-300$ нс).

моделирования виркатора в одномерной модели методом крупных частиц. Использование сдвига фазы между ВЧ полями в секциях двухсекционной системы позволяет достичь более благоприятного распределения ВЧ поля на траектории электрона с точки зрения модуляции тока и энергообмена по сравнению с одноззорным случаем. Расчеты показали, что эффективность двухззорной системы (для энергии электронов ~ 1 МэВ) может более чем втрое превышать эффективность одноззорной системы.

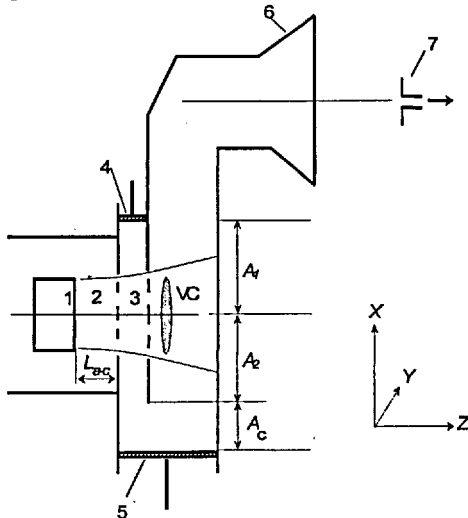


Рис. 13. Схема двухсекционного виркатора:
1 - катод,
2 - вакуумный диод,
3 - модулирующий зазор,
4, 5 - настроенные поршни,
6 - излучающая рупорная антенна,
7 - приемная антенна.

В §5.2 описана конструкция двухсекционного виркатора дециметрового диапазона (рис. 13). Обосновывается выбор однододовой электродинамической

Пятая глава посвящена исследованию двухсекционного однододового виркатора без внешнего магнитного поля [53-64].

В §5.1 описаны возможные механизмы генерации излучения в виркаторах. В приближении малого уровня ВЧ поля рассмотрены механизмы возбуждения колебаний в односекционной и двухсекционной системах. Показано, что возбуждение колебаний в виркаторе может происходить как за счет прямой модуляции тока, обусловленной осцилляциями потенциала ВК в ВЧ полях, так и за счет пространственных колебаний ВК. Приведены результаты численного

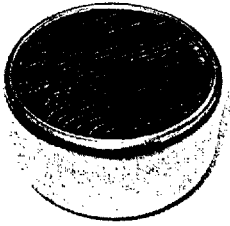


Рис. 14. Металлодиэлектрический лемнистый катод.

системы с синфазными полями в секциях виркатора. Электродинамическая система виркатора представляла собой два прямоугольных волновода, связанных прямоугольным отверстием связи. Рабочее колебание – низшая мода TE_{10} . Электронный пучок формировался в планарном вакуумном диоде без внешнего магнитного поля. Для эмиссии электронов использовался металлодиэлектрический лемнистый катод с фокусирующим электродом (рис. 14).

Приведены результаты «холодных» электродинамических измерений параметров резонатора виркатора, показывающие возможность перестройки резонансной частоты и добротности колебаний посредством смещения

настроечных поршней, изменения размера и положения отверстия связи. Предварительно виркатор оптимизировался с использованием трехмерной версии PIC-кода KARAT. Численное моделирование показало резонансный характер СВЧ-генерации по отношению к величине импеданса вакуумного диода (оптимальная величина $\sim 60 \Omega$, превышение инжектируемого тока над критическим током $\sim 30\%$) и настроечным параметрам резонатора.

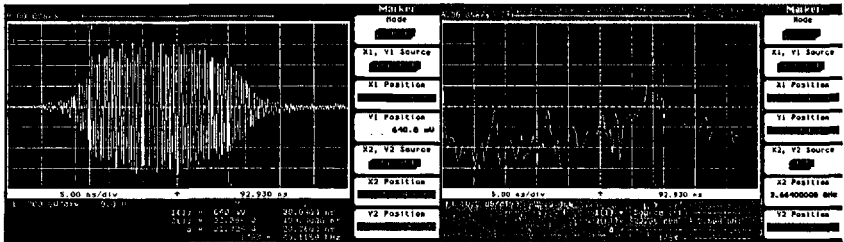


Рис. 15. Осциллограммы СВЧ-импульса и спектр излучения виркатора

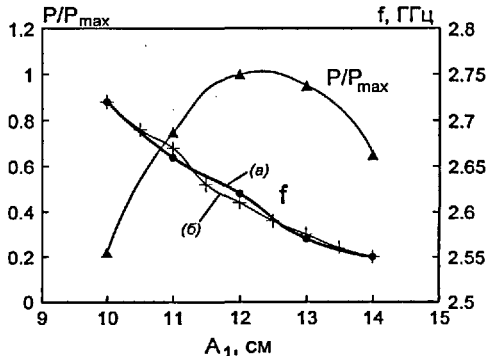


Рис. 16. Зависимость мощности и частоты излучения виркатора от положения поршня 4 (а – эксперимент, б – электродинамические измерения).

Эксперименты на ускорителе «СИНУС-7» (§5.3) подтвердили достаточно высокую эффективность (до 10 % относительно мощности инжектируемого электронного пучка) генерации и степень когерентности излучения двухсекционного виркатора (рис. 15). Пиковая мощность излучения составляла около 1 ГВт при длительности импульсов ≈ 25 нс. Одним из факторов, ограничивших величину эффективности в эксперименте, оказался существенный дрейф параметров электронного пучка в течение импульса, свойственный

сильноточным диодам без внешнего магнитного поля. Вместе с тем, частота генерации не изменялась как в течение импульса, так и от импульса к импульсу, что доказывает определяющее влияние электродинамической системы. За счет варьирования параметров резонатора удалось осуществить непрерывную перестройку частоты генерации виркатора в полосе $\approx 15\%$ на половинном уровне мощности (рис. 16). Был реализован импульсно-периодический режим генерации виркатора с частотой повторения до 50 Гц при мощности излучения в импульсе около 300 МВт.

В §5.4 приводятся результаты экспериментальных исследований двухсекционного виркатора с использованием субмикросекундных высоковольтных генераторов (генератора с индуктивным накопителем энергии «МАРИНА» и генератора Маркса с водяной формирующей линией «СТЕНД»). Было показано, что в данных экспериментах энергия и длительность импульсов существенно ограничены перераспределением тока электронного пучка в вакуумном диоде из-за развития взрывной электронной эмиссии с фокусирующего электрода катода (рис 17). Вследствие этого инжектируемый в виркатор ток был, примерно, в два раза меньше полного тока в диоде.

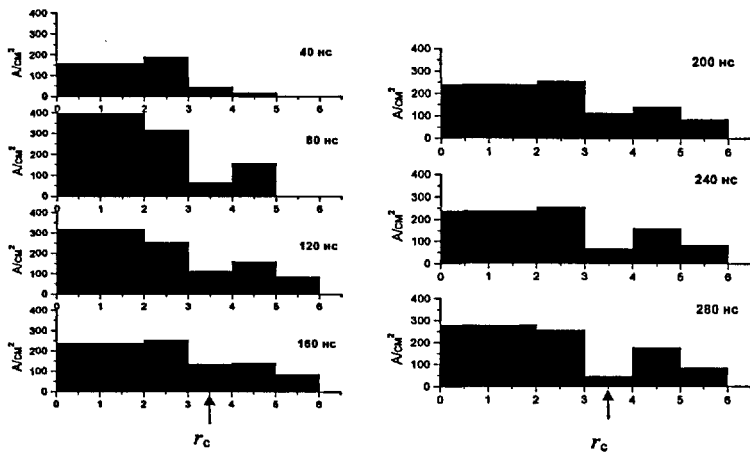


Рис. 17. Эволюция распределения плотности тока в плоскости инъекции пучка в виркатор (позади плоскости инъекции все электроны пучка на радиусе больше 4 см отсекались диафрагмой), r_c – радиус эмитирующей части катода.

Другой причиной, усиливающей спад микроволновой мощности, является, как и в релятивистской ЛОВ, интенсивная эмиссия электронов и ионов из поверхностной плазмы, появляющейся в резонаторе виркатора под действием интенсивных ВЧ полей. Как показало численное моделирование и эксперимент, наиболее критичной является эмиссия частиц в модулирующем зазоре, поскольку она приводит к падению добротности и нарушению оптимального соотношения между амплитудами ВЧ полей в секциях. Для увеличения электропрочности электродинамической системы в области максимальных ВЧ полей вблизи отверстия связи был в два раза увеличен радиус скругления края стенки, разделяющей секции виркатора. Это позволило при мощности излучения около 1 ГВт увеличить длительность

микроволновых импульсов, примерно, в полтора раза (до 100 нс). Как показывают оценки, максимальная напряженность электрического поля в этом случае составляла ~ 800 кВ/см. Дальнейшее увеличение радиуса скругления стенки вблизи отверстия связи нарушало оптимальное распределение электрического поля вдоль траекторий электронов пучка и приводило к падению мощности генерации.

В **Заключении** формулируются основные результаты диссертационной работы, обоснована достоверность результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

Приложение содержит копии документов, подтверждающих практическое использование результатов работы.

ВЫВОДЫ

1. На основе сильноточных импульсно-периодических электронных ускорителей «СИНУС», обеспечивающих энергию электронов до 2 МэВ, ток электронного пучка до 20 кА, способных работать с тактовой частотой до 1000 Гц и обладающих большим ресурсом работы ($\sim 10^8$ импульсов), были созданы экспериментальные стенды по исследованию релятивистских микроволновых генераторов миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.
2. Теоретически (в рамках анализа пусковых условий генерации) и экспериментально показано, что зависимость мощности излучения от величины продольного транспортирующего магнитного поля в релятивистских черенковских генераторах с резонансными электродинамическими системами может иметь несколько «провалов», обусловленных циклотронным взаимодействием попутной, либо встречной электромагнитных волн с электронным пучком. Экспериментально продемонстрирована эффективность циклотронной селекции разночастотных колебаний в мазере на свободных электронах, основанном на индуцированном излучении Смита-Парселла.
3. В результате проведенных исследований создан релятивистский черенковский генератор стержневой волны. За счет реализации в генераторе взаимодействия электронного пучка с поверхностной волной, позволяющей обеспечить близкое к оптимальному значение напряженности синхронного поля, а также использования высокоселективного резонатора в виде отрезка гофрированного стержня с большим поперечным размером $D/\lambda \approx 5$, в коротковолновой части миллиметрового диапазона удалось достигнуть уровня мощности одномодового излучения 100 МВт.
4. Проведены исследования взаимодействия модулированного сильноточного РЭП с замедленными электромагнитными волнами сверхразмерного гофрированного волновода. Показана возможность повышения мощности при сохранении когерентности излучения с помощью совмещения в одном приборе маломощного задающего генератора и мощного выходного устройства. В длинноволновой части миллиметрового диапазона экспериментально реализован релятивистский секционированный черенковский генератор с выходной мощностью 600 МВт и КПД $\approx 20\%$.
5. С использованием релятивистского оротрона в эксперименте была продемонстрирована возможность генерации мощного миллиметрового когерентного излучения на основе сильноточного РЭП с частотой следования

- импульсов до 1000 Гц. Мощность излучения в импульсе составляла около 100 МВт при КПД $\approx 7\%$.
6. Показано существенное влияние попутной электромагнитной волны на работу релятивистской ЛОВ. Оптимизация прибора по взаимодействию с попутной волной позволяет повысить эффективность генератора в 1,5-2 раза. С использованием разработанных методов оптимизации было создано несколько импульсно-периодических СВЧ-генераторов сантиметрового диапазона длин волн на основе релятивистских ЛОВ с однородными замедляющими системами с КПД около 25%. Импульсная мощность излучения составляла 600-700 МВт, частота следования импульсов до 200 Гц. Нестабильность мощности излучения соответствовала нестабильности параметров инжектируемого пучка и составляла 1-2 %.
 7. Продемонстрирована эффективность метода повышения КПД релятивистской ЛОВ за счет увеличения фазовой скорости синхронной гармоники волны вдоль пространства взаимодействия. За счет одноступенчатого увеличения на 10 % фазовой скорости гармоники удалось повысить КПД генератора до 40 % при мощности излучения 500 МВт.
 8. На основе релятивистской ЛОВ с однородной замедляющей системой был создан микроволновый источник 3-см одномодового излучения с импульсной мощностью ≈ 3 ГВт при КПД около 20 %. Получена зависимость длительности микроволновых импульсов от мощности излучения.
 9. Улучшение продольного распределения ВЧ поля посредством отражения рабочей моды TM_{01} от концов электродинамической системы и оптимизация взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной волнами, позволяет повысить эффективность генерации резонансной ЛОВ до 30%. Важным достоинством резонансной ЛОВ в сравнении с обычной релятивистской ЛОВ является также меньшая длина пространства взаимодействия (порядка трех длин волн), требующая меньших затрат энергии на создание фокусирующего магнитного поля. В дециметровом диапазоне длин волн получена импульсная мощность одномодового излучения около 5 ГВт. Продемонстрирована возможность перестройки частоты генерации резонансной ЛОВ посредством изменения периода замедляющей структуры в полосе 15%. Создан компактный релятивистский СВЧ-генератор с мощностью излучения 750 МВт на основе резонансной ЛОВ с запиткой от ВМГ.
 10. Показано, что в наносекундном диапазоне времен, когда движение катодной и коллекторной плазмы пренебрежимо мало, причиной ограничения длительности импульса релятивистской ЛОВ может быть появление взрывоэмиссионной плазмы на поверхности гофр замедляющей системы под влиянием интенсивных ВЧ полей. Прекращение генерации можно объяснить поглощением электромагнитной волны эмитируемыми из плазмы электронами, радикально усиливающимся присутствием эмитированных из плазмы ионов. Таким образом, длительность СВЧ-импульса ограничена в совокупности временем развития взрывной электронной эмиссии на поверхности электродинамической системы и временем заполнения ионами ее объема.
 11. Использование обработки поверхности электродинамической системы релятивистской ЛОВ с помощью низкоэнергетичного сильноточного электронного пучка и обеспечение «безмасляных» вакуумных условий позволило увеличить длительность микроволновых импульсов в несколько раз при

мощности излучения около 3 ГВт. Энергия в импульсах излучения 3-см релятивистской ЛОВ составляла около 90 Дж, резонансной релятивистской ЛОВ дециметрового диапазона ≈ 250 Дж.

12. Предложена схема одномодового двухсекционного виркатора без внешнего магнитного поля. Показано, что использование в виркаторе двухсекционной электродинамической системы за счет более благоприятного распределения ВЧ поля в пространстве взаимодействия с электронами пучка позволяет повысить эффективность генерации в 3-4 раза (в области напряжений ~ 1 МВ), в сравнении с односекционной системой. В экспериментах на сильноточном импульсно-периодическом ускорителе «СИНУС-7» в дециметровом диапазоне длин волн была получена одномодовая генерация с мощностью ≈ 1 ГВт, длительностью импульсов ≈ 25 нс и эффективностью 5-6 % (8-10% относительно мощности инжектируемого в виркатор пучка). За счет варьирования параметров резонатора удалось реализовать непрерывную перестройку частоты генерации виркатора в полосе ≈ 15 % на половинном уровне мощности.
13. В экспериментах с запиткой двухсекционного виркатора от субмикросекундного высоковольтного источника были получены микроволновые импульсы с энергией около 100 Дж при мощности излучения ≈ 1 ГВт. Показано, что энергия и длительность импульсов существенно ограничены потерями тока электронного пучка в вакуумном диоде вследствие взрывной электронной эмиссии с фокусирующего электрода катода. Другой причиной, усиливающей спад микроволновой мощности, может быть интенсивная эмиссия электронов и ионов из поверхностной плазмы, появляющейся в резонаторе виркатора под действием интенсивных ВЧ полей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Pulse Width Limitation in the Relativistic Backward Wave Oscillator. // IEEE Trans. Plasma. Sci., V. 28, No. 3, June 2000, pp. 485-495.
2. Быков Н. М., Губанов В. П., Гунин А. В., Денисов Г. Г., Загулов Ф. Я., Коровин С. Д., Ларичев Ю. Д., Орлова Н. М., Полевин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В., Якушев А. Ф. Релятивистские импульсно-периодические СВЧ-генераторы сантиметрового диапазона длин волн. // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, вып. 5. Горький: ИПФ АН СССР, 1988, с. 101-124.
3. Быков Н. М., Губанов В. П., Гунин А. В., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В., Якушев А. Ф. Релятивистский карсинотрон с высокой средней мощностью. // ЖТФ, 1989, Т. 59, № 5, с. 32-38.
4. Bykov N. M., Gubanov V. P., Gunin A. V., Korovin S. D., Mesyats G. A., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., Smorgonsky A. V., Yakushev A. F. Relativistic pulsed periodic microwave oscillators. // Proc. of 8th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Novosibirsk, 1990, pp. 1141-1146.
5. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ростов В. В., Якушев А. Ф. Релятивистский черенковский генератор миллиметрового диапазона длин волн. // Письма в ЖТФ, 1983, Т. 9, вып. 10, с. 617-620.

6. Братман В. Л., Денисов Г. Г., Коровин С. Д., Офицеров М. М., Полевин С. Д., Ростов В. В. Релятивистские генераторы миллиметрового диапазона длин волн. // В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984, с. 119-177.
7. Vukov N. M., Gubanov V. P., Gunin A. V., Korovin S. D., Kutenkov O. P., Landl V. F., Mesyats G. A., Polevin S. D., Rostov V. V., Zagulov F. Ya.. Development of Long Lifetime Cold Cathode. // Proc. of 10th Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, New Mexico, 1995, p. 71-74.
8. Братман В. Л., Губанов В. П., Денисов Г. Г., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В. Релятивистские оротроны - мощные источники когерентного миллиметрового излучения // Письма в ЖТФ, 1984, Т. 10, вып. 13, с. 807-812.
9. Гунина Н. И., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Христенко В. Я. Релятивистский черенковский генератор миллиметрового излучения со стержневым резонатором // Письма в ЖТФ, 1988, Т. 14, вып. 15, с. 1425-1428.
10. Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ростов В. В. Мощные черенковские СВЧ-генераторы на основе высокоточных наносекундных электронных пучков. // Известия ВУЗов. Физика, 1996, № 12, с. 5-20.
11. Гунин А. В., Кицанов С. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В., Степченко А. С., Сухов М. Ю. Релятивистская 3-сантиметровая ЛОВ с импульсной мощностью 3 ГВт. // Известия ВУЗов. Физика, 1996, № 12, с. 84-88.
12. Кицанов С. А., Коровин С. Д., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д. Резонансная релятивистская ЛОВ дециметрового диапазона с импульсной мощностью 5 ГВт. // Письма в ЖТФ, 2003, Т. 29, вып. 6, с. 87-94.
13. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., and Stepchenko A. S. Relativistic X-band BWO with 3 GW Pulse. // Proc. Int. Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening. - Edinburg, June 1997, pp. 173-177.
14. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., Stepchenko A. S., and Totmeninov E. M. X-band 3 GW Relativistic BWO Based on High-Current Repetitive-Pulsed Accelerator. // Proc. 11th Int. Pulsed Power Conf. -Baltimore, June29-July 2 1997, pp. 141-146.
15. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., Stepchenko A. S., and Totmeninov E. M. Relativistic X-band BWO with 3 GW Output Power. // IEEE Trans. Plasma Science, V. 26, No. 3, 1998, pp. 326-331.
16. Коровин С. Д., Месяц Г. А., Полевин С. Д. Генератор мощного миллиметрового излучения на основе эффекта Смита-Парселла. // Письма в ЖТФ, 1984, Т. 10, вып. 20, с. 1269-1273.
17. Bratman V. L., Denisov G. G., Kolchugin V. D., Korovin S. D., Polevin S. D., Rostov V. V. Powerful electromagnetic millimeter-wave generators based on the stimulated Cherenkov radiation on relativistic electron beams. //Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1984, V. 5, No. 9, pp. 1311-1332.
18. Братман В. Л., Губанов В. П., Денисов Г. Г., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В. Экспериментальное исследование секционированного СВЧ-генератора с релятивистским электронным пучком. // Письма в ЖТФ, 1988, Т. 14, вып. 1, с. 9-14.

19. Братман В. Л., Губанов В. П., Денисов Г. Г., Коровин С. Д., Мовшевич Б. З., Полевин С. Д., Ростов В. В., Сморгонский А. В. Когерентное излучение модулированного сильноточного пучка релятивистских электронов. // В кн.: 6^й Всес. Симпозиум по сильноточной электронике, тезисы докладов. Томск, 1986, часть 3, с.6-8.
20. Быков Н. М., Иванов В. Н., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов с частотой следования импульсов 1 кГц. // ПТЭ, 1991, № 2, с. 38-40.
21. Bykov N. M., Gubanov V. P., Korovin S. D., Mesyats G. A., Polevin S. D., Rostov V. V., Roitman A. M., Smorgonsky A. V. Relativistic pulse-periodic microwave oscillators. // Proc. of the Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, 1991, pp. 866-871.
22. Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В. Релятивистская ЛОВ с переменной фазовой скоростью. // Письма в ЖТФ, 1992, Т. 18, вып. 8, с. 63-67.
23. Korovin S. D., Polevin S. D., Rostov V. V., Roitman A. V. The Nonuniform Phase-Velocity Relativistic BWO. // Proc. of the IX Int. Conf. On High Power Particle Beams, Washington, 1992, V. 3, pp. 1580-1585.
24. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V. Efficiency Increase of Relativistic BWO. // Proc. of the 9th IEEE Int. Pulsed Power Conference, 1993, pp. 392-395.
25. Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В. Влияние попутной волны на работу однородной релятивистской ЛОВ. // Письма в ЖТФ, 1994, Т.20, вып.1, с.12-16.
26. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Roitman A. M., Bratman V. L., Denisov G. G., Smorgonsky A. V. High power microwave Cherenkov oscillators using high current relativistic electron beams. // Proc. Int. Symp. EUROEM'94, Bordeaux, France, June 1-3, 1994, pp. 177-184.
27. Korovin S. D., Polevin S. D., Pegel I. V., Rostov V. V., Roitman A. M., Bratman V. L., Denisov G. G., Smorgonsky A. V. High power microwave Cherenkov oscillators with high current relativistic electron beams. // Proc. of the 16th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. SPIE, 1994, V. 2259, pp. 506-511.
28. Roitman A. M., Korovin S. D., Polevin S. D., Rostov V. V., Moreland L. D., Schamiloglu E. A high power microwave generator based on a relativistic BWO. // Proc. SPIE's Int. Symp. on Optical Science Engineering and Instrumentation, 40th Annual Meeting, San Diego. SPIE, 1995, V. 2557, pp. 422-433.
29. Коровин С. Д., Гунин А. В., Губанов В. П., Климов А. И., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В., Тотьменинов Е. М. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей. // Физика микроволн. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 1996, Т.1, с.43-48.
30. Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В., Морэлэнд Л. Д., Шамильоглы И. Влияние попутной волны на эффективность генерации СВЧ-излучения в релятивистской ЛОВ. // Известия ВУЗов. Физика, 1996, № 12, с. 49-55.
31. Коровин С. Д., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В. Релятивистская ЛОВ с неоднородной фазовой скоростью синхронной гармоника. // Известия ВУЗов. Физика, 1996, № 12, с. 56-61.

32. Коровин С. Д., Гунин А. В., Губанов В. П., Климов А. И., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В., Тотьменинов Е. М. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей // Физика микроволн: Сборник отчетов по научным проектам МНТП России. Нижний Новгород, 1999, Т. 1, с 41-44.
33. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Mechanism of Microwave Pulse Shortening in the Relativistic Backward Wave Oscillator. // Proc. Int. University Conf. Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies (UHF – 99). St. Petersburg, St. Petersburg State Technical University, May 24 - 28, 1999, pp. 229 -232.
34. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Study of Spontaneous Microwave Pulse Shortening in the Relativistic BWO. // Труды IV международного совещания Мощное СВЧ-излучение в плазме, Нижний Новгород – Саратов, 1-8 августа 1999, с. 161-163.
35. Коровин С. Д., Месяц Г. А., Пегель И. В., Полевин С. Д., Тараканов В. П. Механизм ограничения длительности микроволнового импульса релятивистской ЛОВ. // Письма в ЖТФ, 1999, Т. 25, вып.6, с. 27-36.
36. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Mechanism of Microwave Pulse Shortening in the Relativistic Backward Wave Oscillator. // Proc. 12th Int. Pulsed Power Conf., Monterey, CA, 1999, V. 2, pp. 848-851.
37. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Mechanism of Microwave Pulse Shortening in the Relativistic Backward Wave Oscillator. // J. of Communication Technology and Electronics, 2000, V. 45, Suppl. 1, pp. S19-S31.
38. Gaponenko A. M., Karlik K. V., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Konovalov I. N., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., Proskurovsky D. I., and Sukhov M. Yu. Lengthening of Microwave Pulse in a 3-GW Relativistic BWO. // Proc. BEAMS-2000, pp. 730-733.
39. Batrakov A. V., Karlik K. V., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Konovalov I. N., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., Proskurovsky D. I., and Sukhov M. Yu. Mechanisms of Spontaneous Pulse Shortening and Methods of Pulse Lengthening in Gigawatt Relativistic BWO. // Book of Abstracts, EUROEM-2000, Edinburgh, p. 95.
40. Rostov V. V., Gunin A. V., Korovin S. D., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Polevin S. D., Stepchenko A. S., and Totmeninov E. M. Reptitive-pulsed operation of the relativistic BWO. // Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, Russia, 24-29 September 2000, V. 2, pp.408- 411.
41. Батраков А. В., Карлик К. В., Кицанов С. А., Климов А. И., Коновалов И. Н., Коровин С. Д., Месяц Г. А., Пегель И. В., Полевин С. Д., Проскуровский Д. И., Сухов М. Ю. Увеличение длительности микроволнового импульса релятивистской ЛОВ с мощностью 3 ГВт. // Письма в ЖТФ, 2001, Т. 27, вып. 4, с. 39-46.
42. Gunin A. V., Gubanov V. P., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., and Stepchenko A. S. High-Current Periodically-Pulsed Electron Accelerators and

- their Application for High-Power Microwave Production. // Proc. International Conf. on Pulsed Power Applications. Gelsenkirchen, March 29-30, 2001, pp. G04/1-G04/6.
43. Коровин С. Д., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В. Импульсно-периодические микроволновые генераторы с релятивистскими электронными пучками. // Вакуумная СВЧ электропика (сборник обзоров). Нижний Новгород, 2002, с. 144-148.
 44. Kitsanov S. A., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Totmeninov E. M. Broadband frequency tuning in a gigawatt S-band relativistic BWO. // Proc. of the 14th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Albuquerque, 2002, pp. 259-262.
 45. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D. S-band resonant BWO with 5 GW pulse power. // Proc. of the 14th Int. Conf. on High Power Particle Beams, Albuquerque, 2002, p. 255-258.
 46. Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., and Polevin S. D. Gigawatt S-band frequency-tunable HPM sources. // Conf. Records of the 25th Int. Power Modulator Symp. And 2002 high Voltage Workshop. Hollywood, CA, June 30-July 03, 2002, pp. 244-247.
 47. Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., and Polevin S. D. Gigawatt S-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. // Proc. Int. Workshop Strong Microwaves in Plasmas, 1-9 August 2002, Nizhny Novgorod: IAP RAS, V. 1, pp. 70-81.
 48. Korovin S. D., Kurkan I. K., Loginov S. V., Pegel I. V., Polevin S. D., Volkov S. N., Zherlitsyn A. A. Decimeter-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses. // Laser and particle beams, 2003, V. 21, Issue 02, pp. 175-185.
 49. Кицанов С. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д. Резонансная релятивистская ЛОВ дециметрового диапазона длин волн. // Известия ВУЗов. Радиофизика, 2003, Т. 46, № 10, с.891-896.
 50. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Schamiloglu E., Fuks M. I., and Barker R. J. Pulsed Power-Driven High-Power Microwave Sources // IEEE, Special Issue on Pulsed Power: Technology and Applications, July 2004, V. 92, №. 7, pp. 1082-1095.
 51. Korovin S. D., Kovalchuk B. M., Karlik K. V., Kurkan I. K., Ozur G. E., Pegel I. V., Polevin S. D., Proskurovsky D. I., Sukhov M. Yu., and Volkov S. N. Pulse Lengthening of S-band Resonant Relativistic BWO. // Proc. 13th International Symposium on High Current Electronics, Tomsk, 2004, pp. 246-249.
 52. Korovin S. D., Kovalchuk B. M., Karlik K. V., Kurkan I. K., Ozur G. E., Polevin S. D., Proskurovsky D. I., Sukhov M. Yu., and Volkov S. N. Pulse Lengthening of S-band Resonant Relativistic BWO. // Proc. 2nd European Pulsed Power Symposium, Hamburg, Germany, 2004, pp. 24-27.
 53. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., and Tarakanov V. P. Numerical Simulation of Efficient 1.5 GHz Vircator. // Proc. 11th Int. Pulsed Power Conf. -Baltimore, June 29-July 2, 1997, pp. 736-741.
 54. El'chaninov A. A., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Totmeninov E. M., and Tarakanov V. P. Powerful microwave sources with virtual cathode. // Proc. 11th Int. Conf. on High-Power Electromagnetics (EUROEM'98), Tel Aviv, Israel, 14-19 June 1998, p. 224.

55. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P., and Wioland R. Tunable L-Band and S-Band Gigawatt Vircators with Feedback. // Proc. BEAMS-2000, pp. 726-729.
56. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P., and Wioland R. Study of Frequency-Tunable L-Band and S-Band Feedback Vircators. // Book of Abstracts, EUROEM-2000, 30 May-2 June 2000, Edinburgh, pp. 12-15.
57. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Tarakanov V. P., and Wioland R. Tunable L-band and S-band gigawatt vircators with feedback. // Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, Russia, 24-29 September 2000, V. 2, pp.423-428.
58. Korovin S. D., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., and Tarakanov V. P. Tunable vircators with e-beam premodulation. // Digest of Technical Papers/ 2001 IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference2001, Las Vegas, June 17-22, 2001, V. 1, pp. 495-499.
59. Polevin S. D., Efremov A. M., Zherlitsyn A. A., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kovalchuk B. M., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Loginov S. V. and Pegel I. V. S-band vircator with electron beam premodulation based on compact inductive energy storage generator. // Digest of Technical Papers/ 2001 IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference2001, Las Vegas, June 17-22, 2001. V. 2, pp. 1642-1645.
60. Ефремов А. М., Жерлицын А. А., Кицанов С. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Ковальчук Б. М., Куркан И. К., Кутенков О. П., Логинов С. В., Пегель И. В., Полевин С. Д. Виркатор дециметрового диапазона с предмодуляцией электронного пучка на основе компактного генератора с индуктивным накопителем энергии. // Письма в ЖТФ, 2001, Т. 27, вып. 7, с. 57-63.
61. Кицанов С. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д. Виркатор с предмодуляцией электронного пучка на основе сильноточного импульсно-периодического ускорителя. // ЖТФ, 2002, Т. 72, вып. 5, с. 82-90.
62. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., and Polevin S. D., A vircator with electron beam premodulation based on high-current repetitively pulsed accelerator // IEEE Trans. Plasma Sci., 2002, V. 30, issue 1, part 2, pp. 274-285.
63. Коровин С. Д., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В. Виркаторы. // Вакуумная СВЧ электроника (сборник обзоров). Нижний Новгород, 2002, с. 149-152.
64. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kovalchuk B. M., Kurkan I. K., Loginov S. V., Pegel I. V., Polevin S. D., Zherlitsyn A. A. S-band vircator with electron beam premodulation based on compact pulse driver with inductive energy storage. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. No. 2. pp. 1179-1185.
65. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А., Коровин С. Д., Полевин С. Д., Рыжов В. В. Ток трубчатого электронного пучка за виртуальным катодом. // Письма в ЖТФ, 2005, Т. 31, вып. 2, с.22-26.

66. Горбачев К. В., Коровин С. Д., Месяц Г. А., Нестеров Е. В., Полевин С. Д., Строганов В. А., Сухов М. Ю., Черных Е. В., Фортвов В. Е. Генерация мощных микроволновых импульсов резонансной релятивистской ЛОВ с системой питания на основе взрывных магнитокумулятивных генераторов. // Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып. 18, с. 22-29.
67. Chernykh E.V., Fortov V.E., Gorbachev K.V., Korovin S.D., Mesyats G.A., Nesterov E.V., Polevin S.D., Stroganov V.A. Multipurpose Generator of High-Power Nanosecond High-Voltage Pulses. // Proc. 15th International Conference on High Power Particle Beams, Beams-2004, Saint Petersburg, pp. 343-347.
68. Polevin S.D., Kitsanov S.A., Korovin S.D., Kovalchuk V.M., Kurkan I.K., Loginov S.V., Pegel I.V., Volkov S.N., and Zherlitsyn A.A. Spontaneous Pulse Width Limitation in S-band Two-sectional Vircator. // Proc. 15th International Conference on High Power Particle Beams, Beams-2004, Saint Petersburg, pp. 483-486.
69. Беломятцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А., Коровин С.Д., Полевин С.Д., Рыжов В.В., Ячный А.П. Экспериментальные исследования электронного пучка в «сжатом» состоянии. // Письма в ЖТФ, 2005, т.31, вып.22, с. 74-81.
70. Belomyttsev S.Ya., Grishkov A.A., Kitsanov S.A., Korovin S.D., Polevin S.D., Ryzhov V.V. Stationary States of Annular Electron Beam with Virtual Cathode in Drift Tubes. // Proc. 15th International Conference on High Power Particle Beams, Beams-2004, Saint Petersburg, pp. 81-85.
71. Авторское свидетельство на изобретение №1457708 (СССР). Релятивистский СВЧ-прибор // ИПФ АН СССР, ИСЭ СО РАН; Авт. изобретения: Братман В.Л., Денисов Г.Г., Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Сморгонский А.В., Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ростов В.В. – Заявл. 28.01.1987 Г. №4186817.



