

На правах рукописи
УДК 621.385, 537.533

ПЕГЕЛЬ Игорь Валериевич

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
ПУЧКОВ И МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.04 — физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
*диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Томск—2006

Научный консультант: академик РАН,
доктор физико-математических наук
КОРОВИЧ С. Д.
(Институт сильноточной электроники СО РАН,
г. Томск)

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
БРАТМАН В. Л.
(Институт прикладной физики РАН,
г. Нижний Новгород)

доктор физико-математических наук,
профессор
КОШЕЛЕВ В. И.
(Институт сильноточной электроники СО РАН,
г. Томск)

доктор технических наук,
профессор
ЮШКОВ Ю. Г.
(Томский политехнический университет,
г. Томск)

Ведущая организация: Институт общей физики им. А. М. Прохорова
РАН (119333, г. Москва, ул. Вавилова, 38)

Защита состоится 08 сентября 2006 г. в 10-00 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 « 11 » мая 2006 г.

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



Д. И. Проскуровский

Общая характеристика работы

Актуальность тематики исследований

Основные цели и задачи диссертационной работы лежат в русле фундаментальных исследований релятивистской сильнооточной электроники. Направления этих исследований диктуются необходимостью решения практических задач, главными из которых на сегодняшний день являются:

- Повышение пиковой мощности и энергии СВЧ-импульсов. Увеличение эффективности использования запасенной энергии в релятивистских СВЧ-генераторах.
- Разработка широкополосных источников излучения и приборов с возможностью оперативного управления частотой генерации.
- Повышение средней мощности излучения. Увеличение ресурса работы импульсно-периодических СВЧ-генераторов.
- Снижение массогабаритных характеристик импульсных СВЧ-источников.

Повышение мощности и энергии СВЧ-импульсов традиционно является центральной практической задачей релятивистской высокочастотной электроники¹. Одной из проблем, затрудняющих движение в этом направлении, является ограничение длительности СВЧ-импульсов, возникающее в мощных генераторах. В гигагерцовом диапазоне мощности эта проблема приобретает особую остроту. Как показали многочисленные независимые исследования, в релятивистских генераторах на основе сильнооточных релятивистских электронных пучков длительность импульсов излучения обычно ограничена величинами 10^{-8} — 10^{-7} с при величине электрических полей на поверхности электродинамической системы 10^5 — 10^6 В/см. Длительность импульса уменьшается с ростом его мощности. В настоящее время максимальная величина энергии СВЧ-импульсов релятивистских генераторов не превышает нескольких сотен джоулей. Рассматриваемые в литературе механизмы ограничения длительности импульса излучения достаточно многообразны и специфичны для различных типов СВЧ-приборов².

Одним из генераторов мощных СВЧ-импульсов, наиболее хорошо исследованным в теории и эксперименте, является релятивистская лампа

¹ Гапонов–Грехов А. В., Петелин М. И. // Вест. АН СССР, 1979, 4, 11; Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника / М.: МГУ, 2002; Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. – М.: Физматлит, 2003, 2004; Benford J., Swegle J. High-power microwaves. Artech House, 1992; Granatstein V. L., Alexeff I. High-power microwave sources. Artech House, 1987; High-power microwave sources and technology / R. J. Barker, E. Schamiloglu, Eds. Wiley, 2001.

² Benford J., Benford G. // IEEE Trans. Plasma. Sci., 1997, 2, 311; Kovalev N. F., et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci., 1998, 3, 246; Loza O. T., Strelkov P. S. / Dig. Tech. Papers. Int. Workshop on HPM Generation and Pulse Shortening, Edinburg, UK, 1997, 103; Mesyats G. A. / in: High Power Microwave Generation and Applications. SIF, 1992, 345.

обратной волны (ЛОВ)³. Максимальные уровни пиковой мощности излучения, достигнутые с использованием релятивистской ЛОВ, составили ~ 3 ГВт в 3-см диапазоне длин волн [7, 37] и более 5 ГВт в 8-см диапазоне [14, 15]. Именно в этом генераторе было зарегистрировано ярко выраженное ограничение длительности СВЧ-импульса: около 6 нс при пиковой мощности излучения 3 ГВт и длительности импульса тока электронного пучка 50 нс [37]. В отличие от длинноимпульсных, субмикросекундных систем при наносекундной длительности электронного пучка укорочение импульса не может быть объяснено движением катодной и коллекторной плазмы. До последнего времени физическая картина явления оставалась невыясненной. Итак, актуальным являлось исследование механизмов прекращения генерации в релятивистской ЛОВ гигаваттного уровня мощности с наносекундным электронным пучком (Глава 2 диссертации).

Задача повышения пиковой мощности излучения тесно стыкуется с проблемой получения СВЧ-импульсов минимальной длительности. Хорошо известно, что с уменьшением длительности импульса существенно возрастает электрическая прочность электродинамических и антенных систем генераторов, и это открывает дополнительные возможности для увеличения мощности излучения. Минимизация длительности СВЧ-импульсов важна в радиолокации. Исследования показали, что наряду с методами временной и пространственной компрессии электромагнитной энергии большие возможности для получения коротких импульсов излучения с высокой пиковой мощностью открываются при использовании нестационарных эффектов. Так, например, было обнаружено, что для релятивистской лампы обратной волны при высокой надкритичности тока характерен начальный всплеск мощности, заметно превышающий ее последующий квазистационарный уровень⁴. Этот факт сыграл важную роль в появлении идеи использовать для генерирования коротких СВЧ-импульсов электронные пучки минимальной длительности. Впервые такая возможность была продемонстрирована 1996 г. в миллиметровом диапазоне длин волн⁵. Был использован пучок длительностью в несколько сотен пикосекунд и циклотронный механизм генерации; пиковая мощность СВЧ-импульса составила ~ 10⁵ Вт. В дальнейшем при использовании черенковского механизма взаимодействия пиковая мощность импульсов была увеличена до десятков и сотен мегаватт⁶, а также реализован режим с высокой частотой следования импульсов⁷. В 2002 г. А. А. Ельчаниновым и В. В. Ростовым была впервые продемонстрирована возможность получения импульсов сантиметрового диапазона с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного пучка [27].

³ Ковалев Н. Ф. и др. // Письма в ЖТФ, 1973, 18, 4, 232; Carmel Y., et al. // Phys. Rev. Lett., 1974, 33, 21.

⁴ Гинзбург Н. С. и др. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1978, 21, 7, 1037.

⁵ Гинзбург Н. С. и др. // Письма в ЖЭТФ, 1996, 63, 5, 322.

⁶ Ginzburg N. S., et al. // Phys. Rev. E, 1999, 60, 3297; Yalandin M. I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci., 2000, 28, 5, 1615; Коровин С. Д. и др. // Письма в ЖТФ, 2002, 28, 2, 81.

⁷ Гришин Д. М. и др. // Письма в ЖТФ, 2002, 28, 19, 24.

В рамках данного направления исследований актуальной на момент выполнения работы являлась задача формулировки физических условий, необходимых для генерирования коротких СВЧ-импульсов с максимальной величиной конверсии мощности электронного пучка в мощность излучения. В частности, важным представлялся ответ на вопрос о том, возможна ли эффективная генерация коротких мощных СВЧ-импульсов при использовании электронных пучков сравнительно большой длительности (много большей, чем у генерируемого импульса излучения). Результаты соответствующих исследований представлены в Главе 4 диссертации.

Потребительские свойства мощных СВЧ-источников во многом определяются их массогабаритными характеристиками, а также возможностью работы с высокой частотой повторения импульсов. Значительное сокращение размеров и вес СВЧ-генераторов, а также реализация импульсно-периодического режима генерации могут быть достигнуты за счет уменьшения величины магнитного поля, используемого для проводки сильноточного электронного пучка, или полного отказа от его использования. Последнее возможно, если протяженность транспортировки пучка в приборе невелика, а его конфигурация позволяет рассчитывать на фокусирующие свойства собственного магнитного поля пучка. К приборам, обладающим такими свойствами, относятся виркаторы⁸, в которых, благодаря свойствам виртуального катода, фазовая сепарация электронов в ВЧ поле может развиваться на расстояниях, сравнимых с длиной волны излучения. Компактность виркаторов делает их привлекательными для генерации излучения в длинноволновой части СВЧ-диапазона, что в настоящее время представляет значительный практический интерес.

Нельзя не упомянуть, что именно с использованием виркатора была получена рекордная мощность излучения в дециметровом диапазоне длин волн⁹. Вместе с тем, в большинстве известных экспериментов с виркаторами эффективность генерации была невелика (~1%), частота излучения нестабильна, а спектр излучения имел многомодовый состав. Большая величина мощности излучения достигалась в основном за счет колоссальной мощности электронного пучка. Имевшиеся представления о процессах генерации микроволновых колебаний в системах с виртуальным катодом не позволяли дать рекомендаций по повышению эффективности таких устройств. В связи с этим, актуальным являлось исследование нелинейных процессов взаимодействия электромагнитных полей с электронными пучками при наличии виртуального катода и разработка методов повышения эффективности генерации виркаторов без магнитного поля. Большой практический интерес представляет исследование возможности оперативного управления частотой генерации виркатора, а также исследование механизмов, вызывающих ограничение длительности и энергии

⁸ Диденко А. Н. и др. / в кн.: Плазменная электроника. — Киев: Наукова думка, 1989, 112; Рухадзе А. А. и др. // РиЭ, 1992, 3, 385; Селемир В. Д. и др. // Физика плазмы, 1994, 20, 7—8, 689; Гадецкий Н. П. и др. // Физика плазмы, 1993, 19, 4, 530; Jiang W., Kristiansen M. // Physics of plasmas, 2001, 8, 8, 3781.

⁹ Huttlin G.A., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci., 1990, 18, 618.

генерируемого микроволнового импульса — такие явления наблюдались в ряде экспериментов с виркаторами, использующими электронные пучки субмикросекундной длительности. Исследованиям этих вопросов посвящена Глава 3 диссертации.

Основу любого генератора мощных СВЧ-импульсов составляет источник сильноточного электронного пучка. Применяются в основном ускорители прямого действия, построенные на базе импульсных высоковольтных генераторов. Среди них рядом достоинств с точки зрения возможности генерирования импульсов с высокой частотой повторения выделяются генераторы с трансформаторной зарядкой формирующих линий. В ИСЭ СО РАН с середины 70-х годов ведется разработка импульсно-периодических сильноточных электронных ускорителей прямого действия семейства СИНУС с длительностью импульса в единицы и десятки наносекунд¹⁰. Формирование высоковольтного импульса в этих устройствах происходит при разряде длинной коаксиальной формирующей линии, заряжаемой с помощью встроенного в нее трансформатора Тесла с высоким коэффициентом связи. В качестве высоковольтного коммутатора используется искровой газовый разрядник высокого давления.

Численное моделирование импульсных генераторов такого типа, с возможно более полным учетом геометрических и физических параметров их высоковольтной части, с использованием полностью электромагнитных кодов, представляется важной задачей с точки зрения возможности генерирования импульсов правильной формы, с коротким фронтом, что часто является критическим требованием при запитке мощных СВЧ-генераторов. Особый интерес представляет моделирование разрабатываемых в последнее время генераторов с комбинированными формирующими линиями, содержащими секции с центральным проводником спирального типа. Разработка таких импульсных источников имеет целью увеличение длительности формируемого высоковольтного импульса при сохранении габаритов устройства; также этим достигается повышение величины выходного импеданса. Последнее требование часто является важным для эффективной передачи энергии из высоковольтного источника в СВЧ-генератор, импеданс вакуумного диода которого, как правило, сравнительно высок. Актуальным является детальное моделирование подобных устройств (в частности, с учетом влияния локальных неоднородностей в местах сопряжения секций на форму генерируемого импульса), предполагающее решение нестационарной задачи с детальным описанием геометрии линии и решением уравнений электромагнитного поля — Глава 5 диссертации.

Одной из важных практических задач, решаемых современной радиотехникой, является разработка мощных источников сверхширокополосных электромагнитных импульсов. Радиолокационные системы, использующие такие — не имеющие высокочастотного заполнения —

¹⁰ Ельчанинов А. С. и др. / в кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. В. 2. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1981, 5; Коровин С. Д., Ростов В. В. // Изв. вузов. Физика, 1996, 12, 21; Mesyats G. A., et al. // Laser and Particle Beams, 2003, 21, 2, 197.

импульсы наносекундной и пикосекундной длительности¹¹, обладают рядом преимуществ по сравнению с радарными сигналами с квазинепрерывным сигналом. Малая длительность импульсов обеспечивает высокое пространственное разрешение и контраст локации, а широкий непрерывный спектр сигнала дает возможность обнаружения объектов, защищенных от лоцирования в отдельных спектральных диапазонах. Фазовый анализ отраженного сигнала дает возможность для высокоинформативной диагностики объектов. Важным преимуществом таких устройств по сравнению с СВЧ-генераторами является их более простое устройство. Если в СВЧ-генераторе для преобразования энергии высоковольтного импульса в энергию электромагнитной волны применяется электронный пучок, то генератор сверхширокополосных импульсов может быть построен без использования этой промежуточной стадии преобразования энергии. При применении подходящей антенной системы короткий импульс напряжения, сформированный высоковольтным источником, может быть прямо преобразован в импульс излучения в открытом пространстве.

Актуальным для сверхширокополосной радиолокации является создание источников, у которых высокая импульсная мощность сочеталась бы с большой частотой повторения импульсов. Это предъявляет определенные требования к основным составным частям излучателя — формирователю высоковольтного импульса (стабильность параметров импульса и большой ресурс) и антенной системе (электрическая прочность при гигаваттном уровне мощности). В связи с этим является актуальным исследование возможности генерирования сверхширокополосных импульсов в помощь антенн, обладающих симметрией вращения (как наиболее электропрочных), запитываемых от высоковольтных генераторов на основе коаксиальных линий с трансформаторной зарядкой (в ИСЭ СО РАН — генераторы семейства СИНУС с минимальной, в единицы наносекунд, длительностью импульса). Результаты численных исследований, выполненных автором в этой области, представлены в Главе 5 диссертации.

В большинстве электронных ускорителей, лежащих в основе мощных СВЧ-генераторов, формирование электронного пучка происходит в вакуумных диодах с холодным взрывоэмиссионным катодом. В зависимости от типа СВЧ-генератора, могут использоваться коаксиальные диоды с магнитной изоляцией (в приборах с длительной инерционной группировкой электронов), родственные им диоды магнетронного типа (в релятивистском магнетроне и гиротронах), а также — например, в виркаторах — планарные диоды без магнитного поля. Важным требованием к вакуумному диоду является стабильность тока пучка и энергии электронов в течение импульса. Если для коаксиальных диодов с магнитным полем это требование в основном удовлетворяется, то для планарных диодов без магнитного поля характерно существенное снижение импеданса уже в течение первых десятков наносекунд.

¹¹ Ultrawideband Radar / Ed. LaHaie I. J. Los Angeles: SPIE Proc. Series, 1992, 1631.

Известно, что при наносекундной длительности импульса напряжения эмиссионная поверхность холодного катода не является сплошной, а представляет собой дискретную структуру образований из плотной плазмы — эмиссионных центров. Очевидно, что на величину импеданса вакуумного диода влияют не только крупномасштабное расширение катодной плазмы, приводящее к уменьшению эффективной величины диодного зазора, но и — в более ранние моменты времени — микроскопические процессы, связанные с расширением плазмы отдельных эмиссионных центров. Попытки исследования данной проблемы с использованием идеализированных моделей катода с полусферическими эмиттерами, предпринимавшиеся до настоящего времени, давали противоречивые результаты (см. сноски ¹³ и ¹⁴ на с. 15). Таким образом, актуальным являлось исследование токовых характеристик сильноточных диодов с дискретной поверхностью эмиссии, а также разработка методов, позволяющих минимизировать зависимость импеданса диода от разлета катодной плазмы. Результаты исследований, выполненных автором в данной области, изложены в Главе 1 диссертации.

Значительная часть результатов, представленных в диссертационной работе, получена методами компьютерного моделирования. Процессы генерации СВЧ-излучения потоками заряженных частиц нелинейны; это затрудняет их аналитическое рассмотрение. Корректный количественный анализ таких процессов требует учета влияния собственных квазистатических и ВЧ полей объемного заряда электронного пучка. Наконец, важной особенностью процесса генерации мощного СВЧ-импульса является его нестационарность. Она связана, во-первых, с нестационарностью процесса формирования наносекундного сильноточного электронного пучка — как на макроскопическом уровне (пролетные эффекты, связанные с объемным зарядом), так и на микроскопическом уровне (динамика эмиссионной поверхности на катоде). Во-вторых, при использовании электронных пучков наносекундной длительности время переходных процессов в СВЧ-генераторах может быть соизмеримо с длительностью импульса тока. Наконец, при определенных условиях генерация ВЧ колебаний может происходить в автомодуляционном и стохастическом режимах, когда максимальная мощность излучения достигается в узких пиках. Наиболее выраженным случаем нестационарного процесса излучения является генерация СВЧ-импульсов предельно малой длительности — в несколько ВЧ периодов.

Перечисленные обстоятельства делают необходимой разработку и совершенствование методов и программных средств для численного моделирования нестационарных процессов формирования сильноточных пучков электронных потоков и их взаимодействия с интенсивными электромагнитными полями. Наибольшие возможности для исследования сложных нестационарных «кинетических» систем предоставляет метод макрочастиц или PIC-метод (Particle-In-Cell)¹². На его основе созданы

¹² Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоиздат, 1989; Hockney R. W., Eastwood J. W. Computer simulation using particles. IPP, 1988.

многочисленные универсальные двух- и трехмерные полностью электромагнитные коды, позволяющие производить численное моделирование электродинамических устройств с весьма подробным учетом их геометрических и физических параметров. Однако при всем обилии возможностей, предоставляемых этими кодами, достоверность и практическая ценность информации, получаемой в численном эксперименте, в первую очередь определяется корректной постановкой физической задачи. Задача исследователя состоит в постановке корректных физических условий, не противоречащих модельным ограничениям, и соотношении получаемых результатов с фундаментальными теоретическими представлениями и результатами реального эксперимента.

Наряду с использованием универсальных электромагнитных кодов, неизменную актуальность сохраняет разработка упрощенных специализированных моделей, и здесь PIC-метод предоставляет большие возможности. Будучи легко совместим, в качестве метода описания потоков заряженных частиц, с различными упрощенными методами описания электромагнитного поля, он может быть применен не только к проблеме формирования и динамики электронных потоков, но и к задачам об их взаимодействии с излучением в приборах различных типов.

Численный эксперимент все больше принимает на себя функции оптимизации при подготовке реальных экспериментов и разработке конструкций устройств сильноточной релятивистской электроники. С другой стороны, он доставляет возможность «заглянуть» внутрь системы, не внося возмущений в ее поведение, помогает выявить наиболее весомые физические факторы, а в дальнейшем и формализовать их в аналитической модели.

Итак, актуальным является развитие методов численного моделирования применительно к задачам релятивистской сильноточной электроники, позволяющих анализировать физические процессы в генераторах мощных импульсов электромагнитного излучения, а также выполнять проектирование экспериментальных конструкций таких устройств и их компонентов.

Цели диссертационной работы

1. Развитие методов численного моделирования применительно к задачам релятивистской сильноточной электроники.
2. Численное и экспериментальное исследование токовых характеристик сильноточных вакуумных диодов с дискретной поверхностью эмиссии.
3. Численное и теоретическое исследование механизма ограничения длительности импульса излучения релятивистской ЛОВ гигаваттного уровня мощности.
4. Численное моделирование процессов генерации мощных импульсов СВЧ-излучения в системах с виртуальным катодом. Разработка средствами численного эксперимента конструкции двухсекционного виркатора с обратной связью, без магнитного поля, с возможностью управления частотой излучения при постоянных параметрах электронного пучка.

5. Теоретическое, численное и экспериментальное исследование возможности эффективного преобразования мощности сильноточного электронного пучка в мощность сверхкороткого импульса СВЧ-излучения в системе с обратной электромагнитной волной.

6. Решение методами численного эксперимента прикладных задач о формировании наносекундных высоковольтных импульсов генераторах на основе коаксиальных линий и излучения наносекундных электромагнитных импульсов в открытое пространство.

Научная ценность и новизна результатов

Следующие научные результаты были впервые получены в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

1. В численном расчете определен закон зависимости тока планарного диода с одиночным полусферическим чайлд-лэнгмюровским эмиттером и с периодической структурой таких эмиттеров от радиуса эмиттера. Экспериментально зарегистрирована форма тока в релятивистском вакуумном диоде с одиночным эмиссионным центром при квазипостоянном уровне напряжения.

2. Численно и теоретически исследован механизм прекращения генерации микроволнового излучения в мощной релятивистской ЛОВ на основе наносекундного электронного пучка, связанный с поглощением энергии рабочей волны заряженными частиц, эмитированными из плотной (взрывоэмиссионной) плазмы на поверхности замедляющей системы.

3. С использованием численного моделирования исследованы процессы взаимодействия сильноточного электронного пучка с электромагнитным полем в двухсекционной планарной системе с виртуальным катодом. В численном эксперименте выполнено определение рабочих параметров экспериментальной конструкции гигаваттного двухсекционного виркатора с электродинамической обратной связью.

4. Предложен, теоретически и численно исследован и реализован в эксперименте механизм генерирования сверхкоротких импульсов СВЧ-излучения в режиме пространственного накопления энергии в протяженных существенно неоднородных системах с обратной волной и длительным по сравнению с генерируемым импульсом сильноточным электронным пучком, позволяющий получать импульсы излучения с пиковой мощностью, значительно превосходящей мощность электронного пучка.

5. Выполнено полностью электромагнитное численное моделирование процесса генерации наносекундных высоковольтных импульсов в длинных коаксиальных линиях, в том числе со спиральным внутренним проводником.

6. Выполнено полностью электромагнитное численное моделирование процесса излучения наносекундных импульсов ТЕМ-антенной коаксиального типа.

Научная ценность перечисленных результатов обусловлена тем, что они дают новые знания о физических явлениях, определяющих процессы генерирования мощных импульсов когерентного электромагнитного

излучения интенсивными электронными пучками, а также процессы формирования таких пучков в сильноточных вакуумных диодах.

Разработанные в диссертации методика и средства численного моделирования расширяют возможности численного эксперимента в области электродинамики, релятивистской ВЧ электроники, физики пучков заряженных частиц.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность научных результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается использованием комплексной методики исследования: сочетанием теоретического анализа, численного моделирования, эксперимента, а также успешной реализацией заложенных идей в действующих макетах генераторов мощных импульсов электромагнитного излучения.

Личный вклад автора

Основная часть результатов, представленных в диссертации, получена автором лично, при консультативной поддержке академика РАН д.ф.-м.н. С. Д. Коровина, которым была поставлена большая часть задач. При изложении результатов, полученных в соавторстве либо заимствованных (приведенных в диссертации для полноты изложения), их авторство указывается отдельно. В частности, решение задачи о токе вакуумного диода с дискретной эмиссионной поверхностью (Глава 1) выполнено в сотрудничестве с к.ф.-м.н. С. Я. Беломытцевым и акад. С. Д. Коровиным, которые дали теоретическое обоснование полученным в расчетах зависимостям (Приложение 3). Анализ особенностей поглощения электромагнитной волны электронной нагрузкой (Глава 2, п. 2.4), а также оценка оптимальной длительности бегущего СВЧ-импульса (Глава 4, п. 4.2.3) проведены акад. С. Д. Коровиным. Экспериментальная часть исследований процессов генерации коротких СВЧ-импульсов в режиме пространственного накопления энергии (Глава 4, п. 4.6) выполнена автором диссертации совместно с А. А. Ельчаниновым.

Практическая ценность работы

1. Разработанные в диссертации подходы к численному эксперименту в задачах сильноточной электроники и релятивистской СВЧ-электроники с использованием программных средств, как существующих, так и разработанных автором, позволяют облегчить и сделать более целенаправленным проведение натуральных экспериментов и конструирование электронных приборов, делают возможным более экономичное использование научных и производственных ресурсов.

2. Полученные в численном моделировании и эксперименте данные о токе взрывоземиссионных катодов с дискретной поверхностью эмиссии позволили создать экспериментальные макеты катодов, обеспечивающих малую зависимость импеданса рабочей части электронного пучка от разлета

катодной плазмы в течение импульса длительностью в несколько десятков наносекунд. Такие катоды в настоящее время используются для генерирования электронных пучков в двухсекционном виркаторе (энергия электронов до 1.2 МэВ, ток до 20 кА, длительность импульса до 50 нс) и других СВЧ-генераторах без магнитного поля.

3. Результаты численного моделирования процессов генерации СВЧ-излучения в системах с виртуальным катодом позволили разработать экспериментальные макеты двухсекционных виркаторов с электродинамической обратной связью, без внешнего магнитного поля, с рабочими частотами 1.4, 2.1, и 2.6 ГГц, пиковой мощностью более 1 ГВт, с возможностью перестройки частоты генерации в пределах 15%.

4. Полученные в работе сведения о механизмах ограничения энергии и длительности импульсов мощных СВЧ-генераторов (релятивистская ЛОВ, двухсекционный виркатор) определяют требования к технологиям, которые должны быть использованы при изготовлении генераторов для повышения их выходной энергии, а также эксплуатационные требования для таких генераторов.

5. Результаты численных экспериментов по формированию высоковольтных импульсов в генераторах на основе коаксиальных формирующих линий (в том числе, комбинированных, с внутренними проводниками спирального типа) используются при разработке сильноточных импульсно-периодических ускорителей электронов семейства СИЛУС.

6. Результаты численных экспериментов по излучению электромагнитного импульса в открытое пространство с помощью осесимметричной антенны ТЕМ-типа позволили разработать источник импульсов сверхширокополосного излучения субгигаваттной мощности на основе компактного импульсно-периодического генератора высоковольтных импульсов семейства СИЛУС.

7. Результаты теоретического и экспериментального исследования процессов генерации коротких СВЧ-импульсов в режиме пространственного накопления электромагнитной энергии позволили определить основные принципы построения СВЧ-генераторов мультигигаваттного уровня мощности на основе электронных ускорителей компактного класса. В ходе выполнения работы был создан источник импульсов 3-см диапазона с пиковой мощностью до 3 ГВт на основе ускорителя СИЛУС-200, имеющего массу менее 100 кг. Полученные результаты открывают возможность освоения диапазона мощностей излучения 10^{10} — 10^{11} Вт при использовании уже существующих электронных ускорителей класса СИЛУС-7.

Результаты работы используются в Институте сильноточной электроники СО РАН, Институте электрофизики УрО РАН, компании ITHPP (International Technologies for High Pulsed Power) и исследовательском центре Gramat (Франция).

Публикация и апробация результатов

Основные материалы по теме диссертации опубликованы в работах [1—64] и докладывались на 24 международных конференциях: 11—15 конференциях по мощным пучкам частиц BEAMS (Прага, Чехия, 1996 г.; Хайфа, Израиль, 1998 г.; Нагаока, Япония, 2000 г.; Альбукерке, США, 2002 г.; Санкт-Петербург, Россия, 2004 г.), 11—13 конференциях по импульсной технике IEEE PPC (Балтимор, США, 1997 г.; Монтерей, США, 1999 г.; Лас Вегас, США, 2001 г.), симпозиумах по мощному электромагнетизму AMEREM—EUROEM (Альбукерке, США, 1996 г.; Тель-Авив, Израиль, 1998 г.; Эдинбург, Великобритания, 2000 г.), конференциях по физике плазмы IEEE ICOPS (Санта Фе, США, 1994 г.; Новый Орлеан, США, 2000 г.), рабочем совещании NATO ARW по современным исследованиям в области разминирования (Москва, Россия, 1997 г.), конференции «Электроника и радиофизика сверхвысоких частот» (UHF-99) (Санкт-Петербург, Россия, 1999 г.), 12 и 13 Международных симпозиумах по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2000 г. и 2004 г.), конференции по применению импульсной техники (Гельзенкирхен, Германия, 2001 г.), III, IV, V Международных совещаниях «Мощные микроволны в плазме» (Москва — Санкт Петербург, 1996 г.; Нижний Новгород — Саратов, 1999 г.; Нижний Новгород — Пермь, 2002 г.), Рабочем совещании по генерации мощных микроволн и укорочению импульсов (Эдинбург, Великобритания, 1997 г.), Конференции по мощным модуляторам (Голливуд, США, 2002 г.), VIII Межгосударственном семинаре «Плазменная электроника и новые методы ускорения» (Харьков, Украина, 2003 г.).

Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, три приложения и список литературы из 222 наименований. Объем диссертации составляет 214 страниц, число рисунков — 115.

Краткое содержание диссертации

Во Введении приведены все сведения, изложенные выше, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Дан краткий обзор методов численного моделирования в релятивистской сильноточной электронике. Оценивается применимость метода макрочастиц для моделирования плазменных систем. Приведено краткое описание компьютерных программ, использованных в диссертационной работе: известных кодов KARAT, SuperSAM, HP HFSS, а также программ на основе PIC-метода, разработанных автором диссертации: одномерной потенциальной модели с ВЧ полем фиксированной структуры, трехмерной потенциальной модели в цилиндрической системе координат, одномерной электродинамической модели с объемным зарядом на основе уравнения возбуждения волновода.

Глава 1 посвящена численному и экспериментальному исследованию токовых характеристик сильноточных электронных диодов со взрывоэмиссионными катодами с разреженной эмиссионной поверхностью.

Во Введении к главе (п. 1.1) приведены общие сведения об импедансных характеристиках сильноточных диодов в наносекундном диапазоне длительности импульсов напряжения и проблеме падения импеданса в начальный период времени в диодах без магнитного поля. Указывается на возможную связь микроскопических процессов расширения катодной плазмы с временными изменениями импеданса вакуумного диода.

В п. 1.2 описан эксперимент с коаксиальным магнитноизолированным диодом с двойным катодом, демонстрирующий рост во времени тока одиночного эмиссионного центра при квазипостоянном релятивистском уровне напряжения (рис. 1). Приведены данные о степени дискретности эмиссионной поверхности при различных величинах напряженности электрического поля на кромке катода до развития эмиссии (рис. 2).

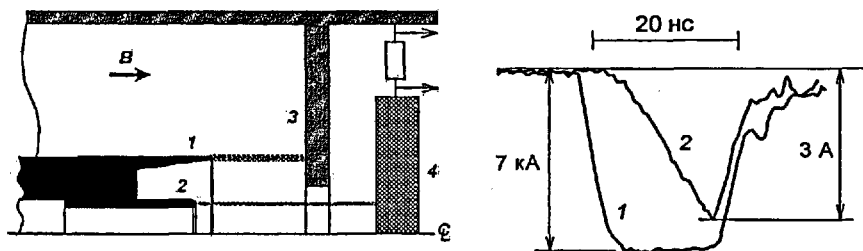


Рис. 1. Слева: схема эксперимента с двойным катодом: 1 — внешний катод, 2 — внутренний катод, 3 — диафрагма, 4 — коллектор электронов. Справа: осциллограммы полного тока в диоде (1) и тока с одиночного эмиссионного центра на внутреннем катоде (2).

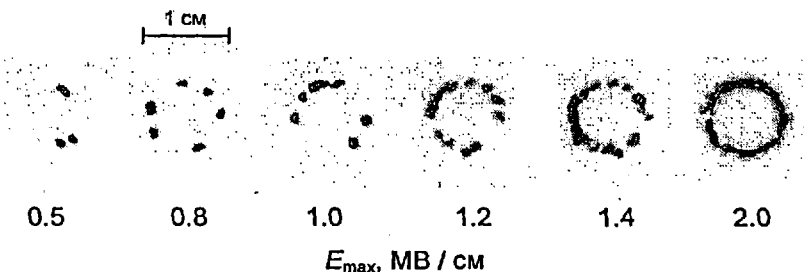


Рис. 2. Автографы электронного пучка с внутреннего катода и соответствующие расчетные величины «холодной» напряженности электрического поля на его кромке

В п. 1.3 приведены результаты приближенных расчетов тока электронного пучка в магнитно-изолированном диоде с катодом, имеющим дискретную эмиссионную поверхность, периодическую вдоль кромки катода. Расчеты выполнены в трехмерной потенциальной PIC-модели в цилиндрической системе координат. В этих упрощенных расчетах трубчатый

катод с закругленной кромкой замещен катодом в виде тонкого цилиндра в цилиндрической анодной камере. Приведены зависимости величины тока от коэффициента заполнения эмиссионной поверхности для различных напряженностей внешнего магнитного поля.

В п. 1.4 приведены результаты расчета величины тока в плоском диоде с дискретной эмиссионной поверхностью без внешнего магнитного поля. Расчеты выполнены с помощью стационарного кода SuperSAM, использующего метод конечных элементов и трубок тока. На основании результатов расчета получены полумпирические выражения для тока диода с малыми одиночными эмиттерами полусферической и полуцилиндрической формы: ток полусферического эмиттера $I \approx 0.47 \sqrt{e/m} (RU/D)^{3/2}$, ток на единицу длины полуцилиндрического эмиттера $dI/dl \approx 0.08 (e/m)^{1/2} R^{1/2} (U/D)^{3/2}$, здесь R — радиус эмиттера, U и D — величина напряжения и зазор в диоде. Показано, что нерелятивистская зависимость тока от напряжения распространяется и в область релятивистских ускоряющих напряжений в диоде при условии, что энергия электронов в окрестности эмиттера (имеющей размер порядка его радиуса) является нерелятивистской. Приведено сравнение результата, полученного для полусферического эмиттера, с результатами других авторов, ранее получивших квадратичную¹³ и линейную¹⁴ зависимости $I(R)$ в пределе малого размера эмиттера.

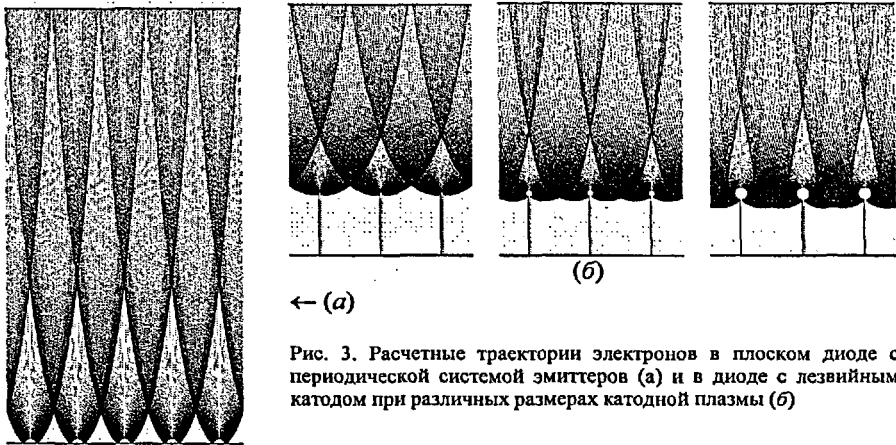


Рис. 3. Расчетные траектории электронов в плоском диоде с периодической системой эмиттеров (а) и в диоде с лезвийным катодом при различных размерах катодной плазмы (б)

В п. 1.5 изложены результаты моделирования электронного диода с эмиссионной поверхностью в виде периодической структуры полусферических эмиттеров (рис. 3, а). Ячейка шестигранной формы аппроксимирована цилиндрической ячейкой и выполнен расчет в приближении осевой симметрии. Определен приближенный вид весовой

¹³ Шубин А. Ф., Юрике Я. Я. // Изв. вузов. Физика, 1975, 6, 134.

¹⁴ Djogo G., Cross J. D. // IEEE Trans. Plasma. Sci., 1997, 25, 4, 617.

функции, входящей в интерполяционное выражение, описывающее ток диода с дискретной эмиссионной поверхностью с произвольным коэффициентом заполнения в пределах от нуля до единицы.

В п. 1.6 приведены результаты расчета электронного диода с периодической лезвийной катодной структурой (рис. 3, б). Подтверждено теоретическое утверждение С. Я. Беломытцева [4а] о том, что катоды такого типа обеспечивают минимальную зависимость импеданса диода от размера катодной плазмы. Описывается разработанная с участием автора конструкция катода с металл-диэлектрическими лезвиями, использованная для генерации сильноточного электронного пучка сплошного сечения в СВЧ-генераторах с виртуальным катодом.

В Заключении к главе (п. 1.7) подведены итоги проведенного исследования, обсуждается возможность проведения эксперимента для проверки полученного выражения для тока одиночного эмиттера.

Глава 2 посвящена численному и теоретическому исследованию механизма ограничения длительности микроволнового импульса релятивистской ЛОВ гигаваттного уровня мощности.

Во Введении к главе (п. 2.1) дан краткий обзор экспериментальных данных об ограничении длительности и энергии импульсов излучения мощных СВЧ-генераторов, а также существующих объяснений этого явления — в частности, данные, свидетельствующие о связи укорочения импульса гигаваттной релятивистской ЛОВ с развитием взрывной эмиссии на поверхности ее электродинамической системы.

В п. 2.2 высказывается и анализируется предположение о том, что срыв генерации в релятивистской ЛОВ может быть вызван затуханием рабочей волны вследствие ее поглощения потоками заряженных частиц из поверхностной плазмы. Зависимость стартового тока ЛОВ от декремента затухания волны, полученная аналитически, сравнивается с результатом расчетов в нестационарной PIC-модели. Расчеты выполнены для случаев распределенного затухания волны и ее сосредоточенного ослабления.

В п. 2.3 в одномерной нестационарной модели исследовано влияние мгновенно включающегося сосредоточенного волнового поглотителя на установившийся процесс генерации в ЛОВ. Определена величина критического поглощения, вызывающего прекращение генерации. Приведен результат расчета зависимости стартового тока ЛОВ с попутной волной от фазы отражения волны на коллекторном конце прибора.

П. 2.4 посвящен особенностям поглощения электромагнитной волны электронной нагрузкой в условиях ограничения тока эмиссии объемным зарядом. Даны оценки поглощаемой мощности в случае нерелятивистского и ультрарелятивистского движения эмитированных электронов в поле волны. Сделан вывод о невозможности прекращения генерации ЛОВ под действием чисто электронной волновой нагрузки вследствие ее нелинейного характера. Отмечается влияние собственного кулоновского поля рабочего сильноточного пучка на величину электрического поля на поверхности электродинамической системы.

В п. 2.5 исследуется роль положительно заряженных ионов, эмитированных из поверхностной плазмы в ВЧ поле, в процессе поглощения волны. Предлагается сценарий процесса, согласно которому в результате накопления ионов в объеме электродинамической системы происходит нейтрализация ионами объемного заряда рабочего электронного пучка, и образование в пространстве между гофрами «синтезированной» плазмы, состоящей из эмитированных ионов и электронов. Присутствие ионов снижает ограничение по объемному заряду с величины тока эмитируемых электронов, в результате чего происходит возрастание волновой нагрузки до величины, достаточной для срыва генерации (рис. 4). Приведены результаты одномерного расчета, иллюстрирующего рост мощности электронной бомбардировки в плоском промежутке с ВЧ полем при эмиссии положительно заряженных ионов.

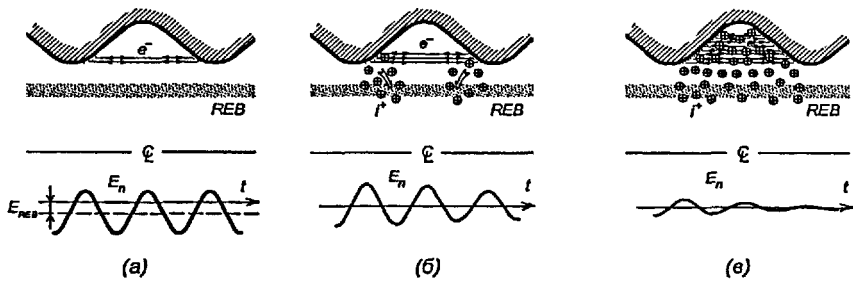


Рис. 4. Эволюция движения заряженных частиц и напряженности электрического поля на поверхности замедляющей системы: (а) развитие взрывной эмиссии на поверхности замедляющей системы, (б) появление ионного тока и нейтрализация объемного заряда рабочего электронного пучка, (в) формирование «синтезированной» плазмы между гофрами замедляющей системы и затухание рабочей волны.

В п. 2.6 оценивается максимальная величина декремента затухания волны E_{01} в волноводе с пристеночным поглощающим слоем фиксированной толщины, имитирующим «синтезированную» плазму между гофрами. Приведен результат расчета с помощью кода KARAT. Оценивается количество вещества, однократная ионизация которого необходима для образования эффективной волновой нагрузки.

В п. 2.7 излагаются результаты численного эксперимента с релятивистской ЛОВ гигаваттного уровня мощности, выполненного с помощью осесимметричной версии кода KARAT (рис. 5). Получены критические величины токов электронной и ионной эмиссии с поверхности электродинамической системы, приводящие к срыву генерации. Приведены результаты моделирования при различном расположении области эмиссии внутри лампы.

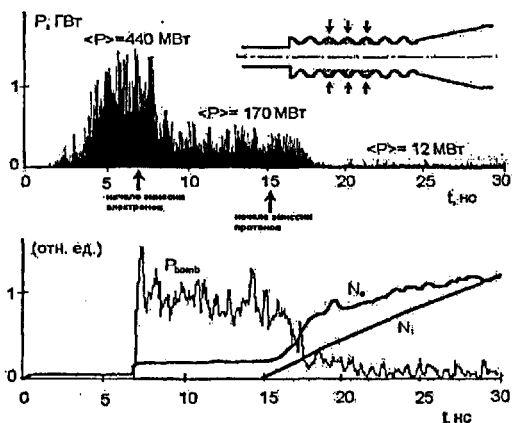


Рис. 5. Расчетные временные зависимости выходной мощности ЛОВ (P), мощности электронной бомбардировки замедляющей системы (P_{bomb}) и число электронов (N_e) и протонов (N_p) в ее объеме (код KARAT)

В Заключение к главе (п. 2.8) окончательно сформулирован механизм ограничения параметров излучения релятивистской ЛОВ за счет эмиссии заряженных частиц с поверхности электродинамической системы, а также упомянуты экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности увеличения энергии импульса излучения за счет увеличения электрической прочности замедляющей системы ЛОВ.

В Главе 3 излагаются результаты численного моделирования процессов

генерации СВЧ-излучения в системах с виртуальным катодом.

Во Введении к главе (п. 3.1) дается классификация СВЧ-приборов с виртуальным катодом. Приведен краткий обзор современных исследований виркаторов. Формулируется постановка задачи по разработке эффективного СВЧ-генератора с виртуальным катодом и основные требования к нему. Кратко описывается концепция двухсекционного виркатора с предмодуляцией электронного пучка.

В п. 3.2 излагаются основные известные закономерности надкритического токопротекания в одномерном эквипотенциальном промежутке, иллюстрируемые результатами численных расчетов в одномерной PIC-модели. Результаты расчета времени жизни пролетных и отраженных частиц соотносятся с известными аналитическими выражениями.

Далее в одномерной модели исследованы релаксационные колебания объемного заряда в одномерном промежутке с виртуальным катодом, приведена оценка частоты этих колебаний. Определена величина разброса электронов по энергии в инжектируемом пучке, вызывающая подавление автоколебаний. Показано, что токовый резонанс в электронном потоке (по отношению к внешнему модулирующему воздействию) определяется и при отсутствии автоколебаний.

Обсуждается роль виртуального катода как фазового сепаратора электронного пучка в СВЧ-приборе, основанная на зависимости величин проходящего и отраженного токов от кинетической энергии частиц. Утверждается, что наличие кулоновских автоколебаний объемного заряда в пучке не является принципиальным для эффективной работы виркатора. Приводятся результаты расчетов, количественно характеризующие

виртуальный катод в плоском зазоре как модулятор для отраженного и проходящего токов, в случаях низкой и высокой надкритичности тока инжекции. Делается вывод о принципиальной возможности использовать для генерации СВЧ-колебаний отраженный ток (при высокой надкритичности тока инжекции) либо отраженный и/или проходящий токи (при низкой надкритичности). Продемонстрировано существенное уменьшение резонансной частоты электронного потока с виртуальным катодом при росте амплитуды внешней модуляции.

Приводится ряд схем (в том числе, известных) построения генераторов с виртуальным катодом, основанных на использовании токомодулирующих свойств виртуального катода.

В п. 3.3 приведены результаты численных расчетов процесса взаимодействия электронного пучка с виртуальным катодом с электрическим ВЧ полем большой амплитуды в одноззорной и двухззорной системах. Расчеты выполнены в одномерной нестационарной PIC-модели.

Для одноззорной системы при $\gamma_{in} \approx 2$ при умеренной надкритичности тока инжекции построены зависимости величины электронного КПД и фазы ВЧ тока относительно ВЧ поля от ускорительного параметра и пролетного угла. Показано, что максимальная величина КПД ($\approx 12\%$) достигается вне области резонанса с релаксационными колебаниями объемного заряда.

Двухззорная схема (рис. 6) исследована в двух основных вариантах.

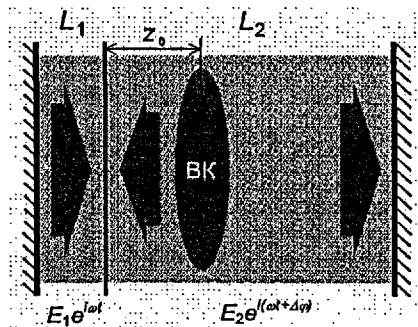


Рис. 6. Двухззорная система с виртуальным катодом

В генераторе на отраженном потоке с высокой надкритичностью тока инжекции (модуляция инжектируемого пучка и энергоотбор от отраженного от виртуального катода пучка происходят в первой, узкой, секции, а ВЧ поле в области виртуального катода отсутствует) возможна генерация колебаний с эффективностью до 20% при отношении ширины первой секции к ширине второй секции ~ 0.1 и величине ускорительного параметра первой секции ≈ 0.5 .

В двухсекционном генераторе для случая малой надкритичности тока инжекции определена оптимальная величина сдвига фаз между колебаниями ВЧ поля в секциях. Построены зависимости электронного КПД от величин ускорительных параметров в секциях для оптимального сдвига фаз и для синфазных полей при двух различных условиях прохождения электронов через разделяющую фольгу. Показано, что максимальная величина КПД в условиях резонанса с релаксационными колебаниями объемного заряда может достигать 40%. Показано, что наличие энергетического разброса в электронном пучке в довольно больших пределах не оказывает критического влияния на

величину КПД (рис. 7). Определена ширина рабочей полосы частот в окрестности релаксационного резонанса. Показано, что режим с противофазными ВЧ полями в секциях не является эффективным. В режиме с высоким КПД рассмотрена динамика волн объемного заряда, определен вклад в энергообмен пролетных и отраженных частиц.

П. 3.4 посвящен расчетам рабочих параметров двухсекционного виркатора дециметрового диапазона длин волн с синфазными полями в секциях в трехмерном численном эксперименте.

Изложены общие соображения, касающиеся выбора геометрических размеров электродинамической системы и параметров электронного пучка. Приведены результаты расчета полей в электродинамической системе в случае ее возбуждения заданным источником ВЧ тока, выполненных с помощью программы HP HFSS.

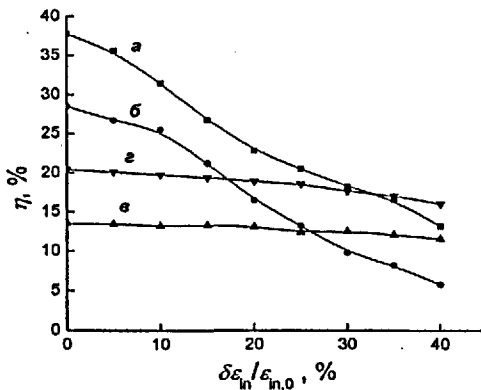


Рис. 7. Зависимость максимальной эффективности генерации в двухззорной системе от разброса энергии в инжектируемом пучке при $\Delta\varphi=70^\circ$ (а, б), $\Delta\varphi=0^\circ$ (в, г), при отсечении отраженных частиц на фольге (а, в) и без него (б, г). $\epsilon_n=1.0$ МэВ, $j_{in} \approx 2.5 j_{\alpha,1}$, $L_1=1$ см, $L_2=5$ см, $f=4.0$ ГГц.

пучка, энергии электронов, настроечных параметров резонатора.

Приведены результаты моделирования виркатора в совокупности с электронным диодом (рис. 8). Определена оптимальная величина импеданса диода, продемонстрирована стабильность величины КПД (около 10 %) в широком диапазоне мощностей электронного пучка.

Исследована возможность управления частотой генерации виркатора при неизменных параметрах электронного пучка, за счет изменения геометрических размеров резонатора: его длины (на рис. 8, вдоль x) или размера широкой стенки (вдоль y). Показано, что ширина полосы перестройки частоты может достигать 15—20 %.

Самосогласованные расчеты виркатора с сильноточным электронным пучком выполнены с помощью декартовой трехмерной версии кода KARAT. Приведены результаты моделирования виркатора в режиме инжекции электронного пучка (без вакуумного диода). Определено время установления колебаний (15—30 ВЧ периодов в зависимости от числа вариаций поля в первой секции), продемонстрирован одномодовый, одночастотный характер генерации с КПД до 15 %. Построены расчетные зависимости КПД от величины тока электронного

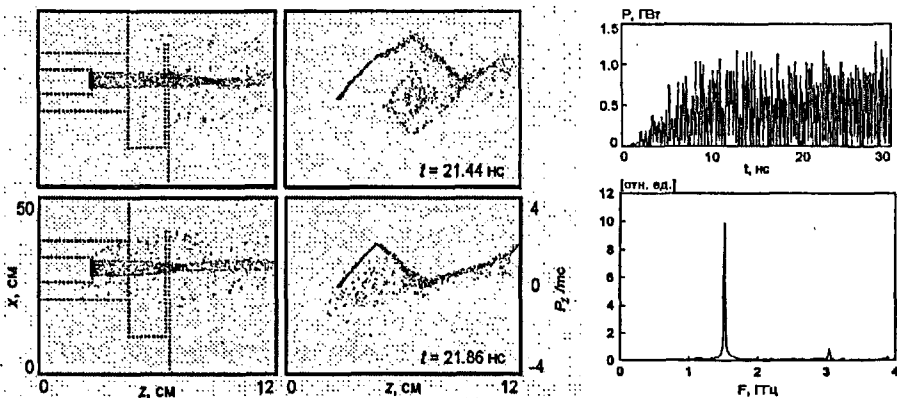


Рис. 8. Расчет виркатора 1.5-ГГц диапазона. Слева: конфигурация и фазовый портрет системы. Справа: осциллограмма выходной мощности и спектр генерации.

Приведены результаты расчета электронного диода для экспериментального макета виркатора, выполненного с помощью программы SuperSAM.

В п. 3.5 дана краткая сводка результатов экспериментальных исследований разработанных на основе проведенных расчетов виркаторов на базе сильноточного ускорителя электронов СИНУС-7. Максимальная мощность генерации была получена в 2.65-ГГц системе и составила ~ 1 ГВт при длительности импульса до 25 нс. Эффективность генерации, рассчитанная по полной величине тока в вакуумном диоде, составила 5—6%. С учетом потерь тока в вакуумном диоде эффективность прибора составила 8—10%, что близко к значениям, полученных в численном эксперименте.

П. 3.6 посвящен численному исследованию механизмов ограничения длительности и энергии СВЧ-импульсов двухсекционного виркатора. В трехмерных модельных расчетах показано, что падение мощности СВЧ-излучения виркатора в течение импульса, наблюдавшееся в экспериментах с использованием субмикросекундных высоковольтных генераторов, не может быть в полной мере объяснено потерями электронного тока и падением мощности рабочей части электронного пучка. Показано, что установившийся процесс генерации в оптимизированном двухсекционном виркаторе мало чувствителен к появлению положительно заряженных ионов в объеме электродинамической системы. Продемонстрировано критическое влияние на генерацию в виркаторе (как и в релятивистской ЛОВ — см. Главу 2) комбинированной эмиссии электронов и положительно заряженных ионов со стенок электродинамической системы, приводящей к образованию «синтезированной» плазмы и, в конечном итоге, срыву генерации или изменению ее характеристик (в частности, радикальной смене частоты).

В Заключении к главе (п. 3.7) подводится итог исследования, подчеркиваются достоинства двухсекционной виркаторной системы. Констатируется, что решение проблемы увеличения эффективности СВЧ-генераторов с виртуальным катодом невозможно без совершенствования свойств электродинамических систем, в частности, повышения их электропрочности.

Глава 4 посвящена теоретическому, численному и экспериментальному исследованию процессов генерации сверхкоротких мощных импульсов СВЧ-излучения в режиме пространственного накопления электромагнитной энергии.

Во Введении к главе (п. 4.1) дана краткая историческая справка по теоретическим и экспериментальным работам в области генерирования мощных СВЧ-импульсов предельно малой длительности в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Формулируется задача исследования: анализ и реализация в эксперименте физических условий, позволяющих максимально эффективно генерировать короткие (в несколько ВЧ периодов) импульсы СВЧ-излучения гигаваттного уровня мощности с использованием электронных пучков сравнительно большой длительности.

П. 4.2 посвящен теоретическому исследованию вопроса. Формулируются общие условия, необходимые для аккумуляции энергии в коротких импульсах излучения в протяженных системах с длительными электронными пучками. Приводится нестрогая аналогия из физики лазеров.

В одномерной аналитической модели найдены условия, необходимые для пространственного накопления энергии в коротком СВЧ-импульсе в полубесконечной системе с обратной волной (типа ЛОВ). Необходимым условием реализации данного режима является нарастание сопротивления связи пучка с синхронной гармоникой волны вдоль траектории электронов по гиперболическому закону:

$$Z(\xi) = \frac{Z_d}{\xi_{\max} - \xi},$$

здесь ξ_{\max} — приведенная координата правого края системы. При этом выполняется автомодельность условий взаимодействия электронов с бегущим СВЧ-импульсом и синфазность высокочастотного тока и высокочастотного поля на большей части длины замедляющей системы. Энергия в СВЧ-импульсе увеличивается линейно с пройденным им расстоянием. Таким образом, при достаточной длине системы (которая может существенно превышать электрическую длину генерируемого импульса) и длительности электронного пучка пиковая мощность формируемого СВЧ-импульса не ограничена мощностью электронного пучка.

Получено аналитическое выражение для электронного КПД процесса.

На основе линеаризованных уравнений движения электронов в системе координат, сопровождающей бегущий СВЧ-импульс, дополненных условием синфазности ВЧ тока и ВЧ поля, найдено решение экспоненциального вида, описывающее линейную часть фронта импульса.

Сделана аналитическая оценка длительности СВЧ-импульса и величины ускорительного параметра, оптимальных по КПД. Полученные зависимости этих величин от энергии электронов аналогичны известным зависимостям для оптимальной длины и ускорительного параметра в СВЧ-приборах с длительной инерционной группировкой в квазистационарном режиме генерации:

$$\tau_p \sim \frac{T}{2} \gamma_0 (\gamma_0 + 1) \frac{\beta_0 + \beta_{gr}}{\beta_{gr}}, \quad a \approx \frac{eE_s \lambda}{mc^2 (\gamma_0 - 1)} \sim \frac{2}{(\gamma_0 + 1) \sqrt{\gamma_0^2 - 1}}.$$

Минимально возможная длительность импульса определяется расстоянием, необходимым для группировки электронов, и составляет

$$\tau_{p, \min} \sim T \frac{1 + \beta_{gr}}{\beta_{gr}}.$$

П. 4.3 посвящен результатам численного моделирования одномерной системы.

Нелинейные решения для бегущего импульса, полученные в одномерной PIC-модели при наложении условия синфазности ВЧ тока и ВЧ поля, сравниваются с результатами линейного анализа. Для различных энергий электронов построены зависимости величин электронного КПД и ширины импульса от дифференциального параметра усиления. Получены зависимости электронного КПД от энергии электронов для импульсов оптимальной и минимальной ширины (рис. 9). Показано, что величина электронного КПД, соответствующая основному импульсу, может достигать 40 %.

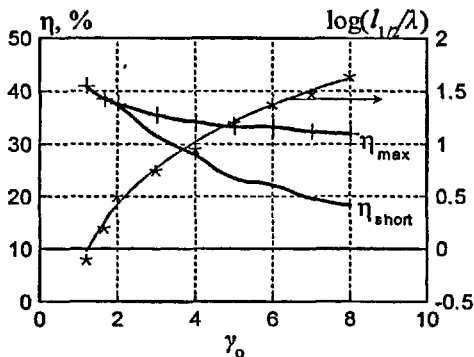


Рис. 9. Электронный КПД (η_{\max} соответствует оптимальной ширине импульса, η_{short} соответствует ширине импульса $l_v = \lambda$), и оптимальная ширина импульса (звездочки — численный расчет, кривая соответствует асимптотике $l_{v2} \propto \gamma_0^2$) как функции релятивистского фактора электронов пучка

Приведены результаты расчетов формирования СВЧ-импульса в самосогласованной одномерной PIC-модели (рис. 10). Показано, что в ситуации, когда импульс излучения формируется в результате подачи малого начального сигнала на коллекторный край системы, пронизываемой нешумящим электронным пучком, установление формы генерируемого бегущего СВЧ-импульса происходит на длине, близкой к его протяженности. В самосогласованном случае продемонстрирована синфазность ВЧ тока и ВЧ поля на большей части длины системы.

При самовозбуждении генератора в результате прохождения фронта электронного пучка, при энергии электронов 300—700 кэВ и наносекундной длительности фронта тока, локальное возбуждение импульса возможно при длине системы до $\sim 25 \lambda$. При этом коэффициент преобразования мощности

пучка в мощность СВЧ-излучения может достигать 15, а электронный КПД, отнесенный к ширине основного импульса — 40 %. Минимальная длительность импульса составила в расчетах около трех ВЧ периодов.

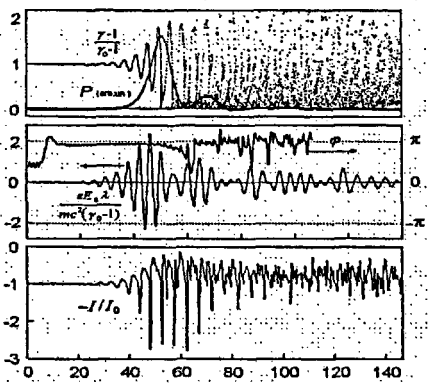


Рис. 10. Режим пространственного накопления энергии в бегущем волновом импульсе: форма импульса микроволновой мощности (P), фазовый портрет пучка, и зависимости ускорительного параметра для синхронной гармоника, фазы ВЧ тока относительно ВЧ поля (φ) и тока электронного пучка (I) от продольной координаты.

Обсуждаются условия эффективной работы генератора в двухпроходном варианте (морфологически подобном «обычной» релятивистской ЛОВ).

Продемонстрирована возможность генерирования повторных СВЧ-импульсов в однопроходной системе в том случае, если созданы условия для удаления из замедляющей системы заторможенных электронов, потерявших энергию в предыдущем акте взаимодействия.

В п. 4.5 перечислены физические факторы, вызывающие ограничивающие на энергию и мощность СВЧ-импульсов, генерируемых в режиме пространственной аккумуляции энергии. Такими факторами являются: досрочное самовозбуждение слабосвязанной части замедляющей системы; несинхронные взаимодействия (в первую очередь, с нулевой гармоникой волны); накачка поперечной скорости электронов в интенсивном ВЧ поле и осаждение пучка на гофры при недостаточной величине транспортирующего магнитного поля; а для повторных импульсов — также влияние оставшихся в системе замедленных электронов.

П. 4.6 содержит описание результатов эксперимента по генерации коротких СВЧ-импульсов (рис. 11). Описывается конструкция макета однопроходного СВЧ-генератора с обратной волной на основе компактного ускорителя электронов СИНУС-200 (напряжение в импульсе до 330 кВ, ток до 6 кА, длительность импульса 9 нс). В эксперименте использован ввод электронного пучка в замедляющую систему в сильном сходящемся

П. 4.4 посвящен моделированию процесса формирования СВЧ-импульса в замедляющей системе реальной конфигурации в помощью осесимметричной версии кода KARAT.

Для однопроходного генератора показано, что в системе длиной $\sim 20 \lambda$ с профилированной связью, при величине импеданса электронного диода 50—100 Ом, коэффициент преобразования мощности электронного пучка в мощность излучения может достигать 3.5 при КПД до 25 %. При длительности импульса электронного пучка 8 нс, энергии электронов 300—350 кэВ, токе 6—7 кА и напряженности магнитного поля 45 кЭ в расчете были получены СВЧ-импульсы с центральной частотой 9.3 ГГц, пиковой мощностью 5—6 ГВт и энергией 4—5 Дж.

магнитном поле, достигающем величины 50 кЭ. Дано описание средств микроволновой диагностики. Приведены результаты измерений, демонстрирующие возможность генерации импульсов 3-см диапазона длин волн с длительностью 0,65 нс, энергией 2—2,4 Дж при величине коэффициента преобразования мощности пучка в мощность излучения до 180 %. Меньшая, по сравнению с расчетной, величина конверсии объясняется развитием в пучке неустойчивости диокотронной, не учтенной при осесимметричном моделировании.

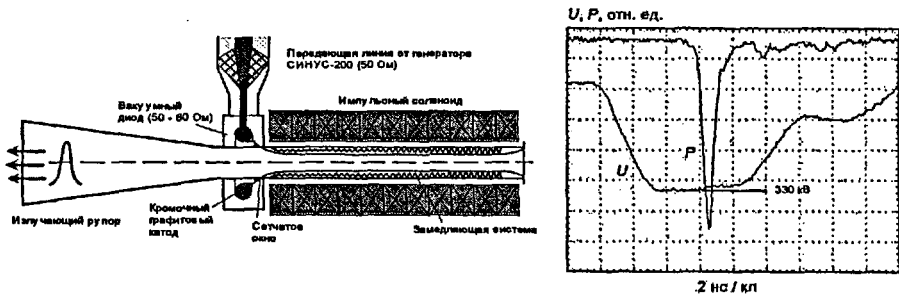


Рис. 11. Слева: схема эксперимента по генерации сверхкоротких СВЧ-импульсов. Справа: осциллограммы импульса напряжения в вакуумном диоде и сигнала с микроволнового детектора

В Заключение к главе (п. 4.7) подводятся итоги исследования, обсуждаются перспективы работ по генерации сверхмощных коротких СВЧ-импульсов.

Глава 5 посвящена решению методом численного эксперимента двух прикладных задач, касающихся формирования и излучения электромагнитных импульсов. Нестационарные расчеты, описываемые в данной главе, выполнены с помощью осесимметричной версии кода KARAT.

В п. 5.1 описываются результаты численного моделирования процесса формирования высоковольтного импульса в генераторах на основе коаксиальной формирующей линии. Эта задача была поставлена в рамках работ по совершенствованию импульсно-периодических сильноточных электронных ускорителей СИМУС, в которых зарядка формирующей линии производится в помощью встроенного в линию импульсного трансформатора Тесла с разомкнутым ферромагнитным сердечником. В ряде последних разработок ускорителей используется формирующая линия комбинированного типа, содержащая секцию с внутренним проводником спирального типа.

Выполнено моделирование распространения волн в линии с внутренним проводником, выполненным в виде спирально проводящего цилиндра. Полученные частотные зависимости для коэффициента замедления основной волны сравниваются с известными аналитическими зависимостями. Продемонстрировано дисперсионное искажение фронта прямоугольного импульса при распространении через спиральную линию.

Исследованы характеристики импульсов, формируемых при разряде комбинированных линий простейшего вида с различными соотношениями между волновыми сопротивлениями обычной и спиральной секций. Дано объяснение появлению выброса напряжения на генерируемом импульсе.

Приведен результат расчета формирования импульса в высоковольтном генераторе СИЛУС-130, содержащем формирующую линию комбинированного типа, расчетная форма импульса сопоставляется с экспериментально измеренной (рис. 12).

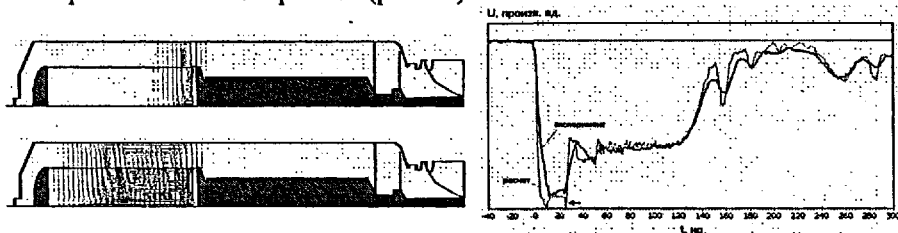


Рис. 12. Расчет формирования импульса в высоковольтном генераторе СИЛУС-130. Слева: магнитное поле в плоскости продольного сечения генератора в начале процесса разрядки комбинированной формирующей линии и через 32 нс. Справа: сравнение расчетной формы импульса напряжения на согласованной нагрузке с измеренной в эксперименте.

П. 5.2 посвящен результатам численного моделирования излучения электромагнитных импульсов в свободное пространство с помощью коаксиальной ТЕМ-антенны. Конечная практическая цель данного исследования состояла в создании источника сверхширокополосных импульсов субгигаваттного уровня мощности на основе компактного высоковольтного генератора семейства СИЛУС.

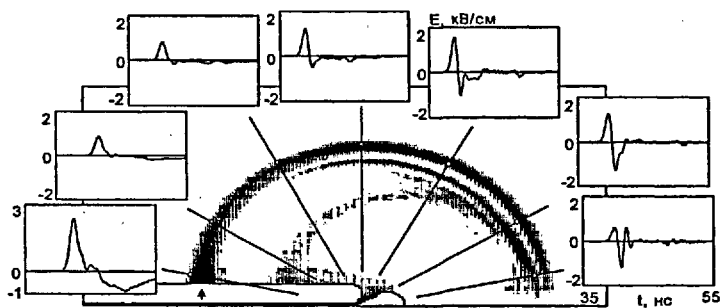


Рис. 13. Расчетная картина излучения импульса и осциллограммы электрического поля (нормального к направлению наблюдения) сигналов, излученных под различными углами. Контрольные точки расположены на дуге окружности радиусом 3.3 м. Амплитуда падающего импульса напряжения в коаксиальном фидере 1 МВ, длительность $\tau=2$ нс. Волновое сопротивление фидера 55 Ом.

Расчеты проводились для замкнутой области с поглощающим приграничным слоем. Определена оптимальная конфигурация антенны,

имеющей внутренний электрод с окончанием в форме «луковицы», получены ее «переходные характеристики» (формы импульсов, излучаемых под различными углами антенной, запитанной перепадом напряжения).

Приведены результаты моделирования излучения из антенны, запитываемой монополярным импульсом напряжения трапецевидной формы (рис. 13). Определена форма импульсов, излучаемых под различными углами к оси системы. Построена зависимость энергетической эффективности излучения от длительности питающего импульса. Определена доля энергии, сосредоточенной в обратной ТЕМ-волне, распространяющейся вдоль корпуса внешнего электрода.

Кратко описан разработанный с использованием результатов численного моделирования экспериментальный макет излучателя сверхширокополосных импульсов субгигаваттной мощности на основе компактного высоковольтного генератора СИЛУС-120.

В Заключении к главе (п. 5.3) обсуждаются потенциальные возможности электромагнитных кодов в части комплексного моделирования импульсных генераторов электромагнитного излучения.

В общем Заключении перечислены главные результаты диссертационной работы.

В Приложении 1 описан метод решения уравнения Пуассона в цилиндрической системе координат, использованный в трехмерной потенциальной РС-модели.

В Приложении 2 дано описание одномерной РС-модели релятивистской лампы обратной волны. Формулируется постановка задачи, приводится конечно-разностная схема решения нестационарного уравнения возбуждения волновода, обсуждаются особенности реализации РС-метода представления электронного пучка. Описываются два метода решения уравнения Пуассона для поля объемного заряда: метод преобразований Фурье и метод функций Грина. Приведены сведения о программной реализации модели.

В Приложении 3 приведен вывод соотношений подобия для электронного диода, и выражения для тока диода с малым одиночным эмиттером (С. Я. Беломытцев, С. Д. Коровин).

В Приложении 4 в численном расчете показана возможность для осуществления режима приближенно синфазных ВЧ поля и ВЧ тока в квазистационарном режиме генерации в системе с распределенными потерями на излучение и получения генерации СВЧ излучения с высоким КПД (более 60 % в одномерной модели с учетом объемного заряда). Данный случай пока представляет гипотетический интерес.

Библиографический список включает цитированные источники и авторские публикации по теме диссертации.

Защищаемые научные положения

1. Развита методика численного моделирования применительно к задачам релятивистской сильноточной электроники, позволяющие анализировать физические процессы в генераторах мощных импульсов электромагнитного излучения, а также выполнять проектирование экспериментальных конструкций таких устройств и их компонентов. Эффективность данных методов подтверждена созданием СВЧ-генераторов (черенковского типа и виркаторов), уникальность параметров которых предсказывалась расчетом.

2. Ток планарного вакуумного диода с эмиссионной поверхностью на катоде, представляющей собой совокупность идентичных, имеющих неограниченную эмиссионную способность, полусферических эмиттеров с радиусом, малым по сравнению с расстоянием между эмиттерами и с зазором диода, пропорционален радиусу эмиттера в степени $3/2$ и величине напряжения в степени $3/2$ и обратно пропорционален величине диодного зазора в степени $3/2$. Это справедливо и при релятивистском уровне напряжения в диоде при том условии, что величина кинетической энергии, приобретаемой электронами в окрестности эмиттера (имеющей размер порядка его радиуса), является нерелятивистской.

3. В релятивистской лампе обратной волны эмиссия с поверхности электродинамической системы электронов и положительно заряженных ионов с токами, ограниченными объемным зарядом, приводит к прекращению процесса генерации СВЧ-излучения. При этом критическая диссипация энергии рабочей электромагнитной волны электронами эмиссии становится возможной благодаря нейтрализации их объемного заряда ионной компонентой эмиссии. В этих условиях длительность импульса излучения релятивистской ЛОВ ограничена временем накопления положительно заряженных ионов в объеме ее электродинамической системы.

4. Модуляция проходящего и отраженного токов электронного пучка с виртуальным катодом, возникающая в результате изменения кинетической энергии частиц под действием высокочастотного электромагнитного поля, способна обеспечить эффективную фазовую сепарацию электронов относительно ВЧ поля. В одномерной модели двухсекционной системы с однородными ВЧ полями эффективность отбора энергии ВЧ полем от электронного пучка в диапазоне энергий электронов до 1 МэВ достигает 40 % при сдвиге фаз ВЧ колебаний между секциями вблизи $\pi/2$ и до 20 % в случае синфазных полей. В трехмерной модели двухсекционной системы на основе волноводов прямоугольного сечения с синфазными ВЧ полями, имеющими поперечную структуру H_{10} , эффективность генерации СВЧ-излучения достигает 15 %.

5. В одномерной модели электронного пучка, взаимодействующего со встречной электромагнитной волной в полубесконечной замедляющей системе, при условии гиперболического нарастания сопротивления связи пучка с синхронной гармоникой волны по координате в направлении движения пучка, возможен такой режим генерации короткого (с длительностью в единицы периодов высокочастотного колебания) волнового

импульса, распространяющегося навстречу электронному пучку, когда форма огибающей импульса неизменна, а его энергия линейно увеличивается с проходимым расстоянием; при этом высокочастотный ток и высокочастотное поле синфазны. При возбуждении колебаний фронтом электронного пучка коэффициент преобразования мощности электронного пучка в мощность электромагнитной волны составляет более 10 в одномерной модели и более 3 в двумерной модели. В эксперименте с использованием сильноточного пучка, генерируемого компактным ускорителем электронов, в 3-см диапазоне длин волн получена мощность излучения 3 ГВт при коэффициенте преобразования мощности до 1.8.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработан и реализован в виде компьютерных программ ряд специализированных нестационарных релятивистских численных моделей на основе метода макрочастиц, предназначенных для расчетов собственной динамики сильноточных потоков заряженных частиц и их взаимодействия с электромагнитными полями:

(а) Одномерная PIC-модель для исследования динамики сильноточных электронных и ионных потоков в секционированных планарных системах в заданном ВЧ поле и поле собственного объемного заряда, учитываемого в потенциальном приближении;

(б) Трехмерная потенциальная PIC-модель в цилиндрической системе координат, предназначенная для нестационарного моделирования собственной динамики сильноточного электронного потока в магнетронном диоде.

(в) Одномерная PIC-модель на основе уравнения возбуждения волновода, предназначенная для моделирования динамических процессов в одномодовых СВЧ-приборах с инерционной группировкой электронов в сильном продольном магнитном поле, с учетом собственного объемного заряда электронного пучка;

2. Экспериментально зарегистрирован импульс электронного тока одиночного взрывоэмиссионного центра в вакуумном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией при релятивистском уровне напряжения. Обнаружено, что, несмотря на постоянство напряжения в течение импульса, ток монотонно во времени нарастает и, не испытывая насыщения, достигает величины 3—5 А за время ~ 20 нс.

3. В численных расчетах с использованием кода SuperSAM получено выражение для тока электронного пучка в планарном вакуумном диоде с расположенным на катоде уединенным эмиттером полусферической или полуцилиндрической формы, имеющим неограниченную эмиссионную способность и радиус R , малый по сравнению с диодным зазором D . Ток полусферического эмиттера $I \approx 0.47(e/m)^{1/2}(RU/D)^{3/2}$, ток на единицу длины полуцилиндрического эмиттера $dI/dl \approx 0.08(e/m)^{1/2}R^2(U/D)^{3/2}$, здесь U — величина напряжения в диоде.

Получено полуэмпирическое выражение для тока планарного диода с эмиссионной поверхностью в виде периодически расположенных эмиттеров полусферической формы. Показано, что в этом случае, при условии малости размера эмиттеров по сравнению с расстоянием между ними нерелятивистский характер зависимости тока от напряжения распространяется в область релятивистских максимальных энергий частиц в диоде при условии, что кинетическая энергия, приобретаемая электронами в окрестности эмиттера (с размером порядка его радиуса), является нерелятивистской.

4. Численно подтверждена возможность повышения стабильности импеданса сильнооточного вакуумного диода без магнитного поля в течение импульса наносекундной длительности (ослабления зависимости величины импеданса от размеров катодной плазмы) путем использования планарного катода с эмиссионной поверхностью в виде тонких лезвий, установленных на основании катода перпендикулярно к нему с интервалом, обеспечивающим электростатическую экранировку основания.

5. В численном эксперименте исследован механизм ограничения длительности импульса СВЧ-излучения релятивистской лампы обратной волны гигаваттного уровня мощности.

Аналитически решена задача о собственных числах стартового режима ЛОВ при условии линейного пространственного затухания рабочей волны в замедляющей системе. В нелинейной численной модели исследовано влияние быстро «включающегося» волнового поглотителя (распределенного и сосредоточенного) на процесс генерации ЛОВ. Определена критическая величина поглощения, приводящая к срыву генерации.

Показано, что чисто электронная волновая нагрузка (с током эмиссии, ограниченным объемным зарядом) не может приводить к срыву генерации в релятивистской ЛОВ.

Дана аналитическая и численная оценка максимального декремента затухания волны E_{01} в круглом гофрированном волноводе при заданной толщине поглощающего слоя.

Предложен сценарий ограничения длительности импульса излучения мощной релятивистской ЛОВ, согласно которому срыв генерации наступает вследствие диссипации энергии рабочей электромагнитной волны электронами, эмитированными из плотной (взрывоэмиссионной) плазмы на поверхности электродинамической системы в интенсивных ВЧ полях. При этом достижение критической диссипации становится возможной благодаря нейтрализации объемного заряда эмитируемых электронов ионной компонентой эмиссии. В этих условиях длительность импульса излучения генератора определяется временем накопления ионов в объеме его электродинамической системы. Сценарий подтвержден результатами нестационарного моделирования, выполненного с помощью кода KARAT.

6. Численно, с использованием нестационарных моделей на основе PIC-метода, исследован процесс взаимодействия между электронным потоком с виртуальным катодом и интенсивным ВЧ полем. Показано, что модуляция проходящего и отраженного токов, возникающая в результате изменения

кинетической энергии частиц под действием ВЧ поля, способна обеспечить эффективную фазовую сепарацию электронов. Продемонстрировано, что использование двухсекционной электродинамической системы с определенным сдвигом фаз ВЧ поля, при малой надкритичности тока, позволяет за счет эффекта предмодуляции электронного пучка и благоприятного распределения ВЧ поля на траектории электрона достичь более высокой эффективности энергообмена по сравнению с однозонарным случаем (более чем втрое в области напряжений до 1 МВ). Найдены оптимальные величины амплитуд полей в секциях и сдвига фаз. Проанализирован вклад пролетных и отраженных частиц в процесс энергообмена. Показана возможность эффективной генерации в генераторе на отраженном потоке.

7. В численном эксперименте с использованием трехмерной декартовой версии кода KARAT выполнен поиск рабочих параметров конструкций двухсекционных виркаторов с электродинамической обратной связью. Показано, что использование резонансной электродинамической системы позволяет обеспечить постоянство частоты генерации в широком диапазоне токов электронного пучка. Предложен способ управления частотой генерации виркатора в пределах 20 % за счет варьирования фазовой скорости электромагнитной волны в волноводном резонаторе с изменяемой шириной.

Полученные результаты позволили с использованием сильноточных электронных ускорителей реализовать ряд виркаторов дециметрового диапазона длин волн (частота генерации 1.4, 2.1 и 2.6 ГГц) без внешнего магнитного поля, с пиковой мощностью до 1 ГВт при эффективности генерации до 10 %, с возможностью управления частотой генерации в пределах 15 %.

8. Численными методами исследованы возможные причины ограничения длительности и энергии импульса излучения двухсекционного виркатора (дрейф параметров электронного пучка в течение импульса, эмиссия заряженных частиц с поверхностей электродинамической системы).

9. Предложен, теоретически обоснован и реализован в эксперименте способ генерирования коротких, в несколько ВЧ периодов, мощных импульсов СВЧ-излучения, основанный на эффекте пространственного накопления энергии в бегущем СВЧ-импульсе при его взаимодействии с длительным встречным сильноточным электронным пучком в существенно неоднородной замедляющей системе, длина которой значительно превышает длину СВЧ-импульса. Показано, что при этом пиковая мощность излучения не ограничена мощностью электронного пучка.

Сформулированы физические условия, необходимые для реализации режима пространственного накопления электромагнитной энергии в солетоноподобном волновом импульсе. Установлено, что необходимая зависимость сопротивления связи пучка с синхронной гармоникой волны от продольной координаты является гиперболической. Показано, что в данном режиме реализуется точный синхронизм между электронным пучком и электромагнитной волной (ВЧ ток сфазирован по центру тормозящей фазы ВЧ поля), что соответствует постоянной, действительной и отрицательной

ВЧ проводимости электронного потока. Получено выражение для электрического поля на фронте бегущего импульса в полуограниченной системе.

Дана оценка минимальной длительности формируемого ВЧ импульса, а в численном расчете подтверждено, что она может составлять несколько ВЧ периодов. В идеализированной одномерной нестационарной модели исследована зависимость величины электронного КПД (отнесенной к основному импульсу излучения) от длительности импульса и показано, что она может достигать 40 %.

В численном эксперименте с использованием одномерной нестационарной модели, а также осесимметричной версии кода KARAT, определены основные физические факторы, ограничивающие энергию формируемого СВЧ-импульса в системах конечной длины. Показано, что в случае одномерного движения частиц пучка и отсутствии взаимодействия с несинхронными гармониками коэффициент конверсии по мощности может достигать 15, а в условиях реальных электродинамических систем, для трубчатых пучков в конечном ведущем магнитном поле достижима величина конверсии 3—3.5.

В численном эксперименте продемонстрирована возможность и определены условия для генерации последовательности коротких мощных СВЧ-импульсов сильноточным пучком достаточной длительности.

На основе результатов численной оптимизации разработана экспериментальная конструкция генератора с однократным проходом СВЧ-импульса в длинной неоднородной электродинамической системе.

С использованием компактного сильноточного ускорителя электронов получены импульсы СВЧ-излучения 3-см диапазона длин волн с пиковой мощностью ~3 ГВт и длительностью ~0.65 нс, при коэффициенте преобразования мощности электронного пучка в мощность излучения до 180 %.

10. Разработана методика нестационарного численного моделирования процессов генерирования высоковольтных импульсов в генераторах на основе коаксиальных формирующих линий с использованием полностью электромагнитного PIC-кода KARAT. Выполнен расчет дисперсионной характеристики электромагнитной волны в коаксиальной передающей линии с внутренним проводником в виде спирально проводящего цилиндра. С использованием разработанной методики проведены расчет высоковольтного генератора СИНУС-130 с комбинированной линией.

11. Показано, что в генераторе с комбинированной формирующей линией (с центральным проводником, составленным из обычной и спиральной секций) даже при условии согласования волновых сопротивлений обычного и спирального участков линии на формируемом импульсе напряжения наблюдается короткий интенсивный выброс, появление которого связано с локальной неоднородностью волнового сопротивления в месте перехода секций.

12. С использованием осесимметричной версии кода KARAT выполнено численное моделирование процесса излучения монополярных электромагнитных импульсов в открытое пространство с использованием осесимметричной антенны ТЕМ-типа. Определена форма электродов и размеры излучающей антенны, позволяющей излучать импульсы наносекундной длительности с эффективностью по энергии до 80 %. Показано, что для антенны оптимальных размеров, при трапецеидальной форме питающего импульса, форма импульса, излученного вблизи максимума кольцевой диаграммы направленности, является биполярной с длительностью около одного цикла. Результаты расчетов позволили на основе компактного импульсно-периодического высоковольтного генератора реализовать источник сверхширокополосных электромагнитных импульсов.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Губанов В. П., Коровин С. Д., Пегель И. В., Степченко А. С. Исследование генерации мощного широкополосного излучения / в кн.: Физика микроволн. – Нижний Новгород, ИПФ РАН: 1996. – Т. 1. – С. 49—56.
2. Губанов В. П., Коровин С. Д., Пегель И. В., Степченко А. С. Исследование генерации мощного широкополосного излучения. 2. Генератор мощных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения / в кн.: Физика микроволн: сборник отчетов по научным проектам МНТП России. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. – Т. 1. – С. 47—50.
3. Беломытцев С. Я., Коровин С. Д., Пегель И. В. Ток в сильноточном планарном диоде с дискретной эмиссионной поверхностью // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – Вып. 6. – С. 97—101.
4. Беломытцев С. Я., Коровин С. Д., Пегель И. В. Условие постоянства тока во времени в сильноточном планарном диоде // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 5. – С. 63—69.
5. Гапоненко А. М., 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. – В. 4. – С. 39—46.
6. Губанов В. П., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., Степченко А. С., Тараканов В. П. Генерация мощных сверхширокополосных электромагнитных импульсов наносекундной длительности в системе с коаксиальным ТЕМ-рупором // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 12. – С. 110—118.
7. 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.

8. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., Рукин С. Н., Шпак В. Г., Яландин М. И. Сверхизлучательный режим релятивистской ЛОВ с высокой пиковой мощностью микроволновых импульсов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2003. – Т. 46. – В. 3–4. – С. 55–65.
9. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В. Генерирование коротких мощных СВЧ-импульсов в режиме пространственного накопления электромагнитной энергии // Вопросы атомной науки и техники. Серия 3. Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2003. – № 4. – С. 20–25.
10. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Пегель И. В., Ростов В. В., Яландин М. И. Генерация мощных сверхкоротких импульсов СВЧ-излучения // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – № 8–9. – С. 1–9.
11. Ельчанинов А. А., Коровин С. Д., Ростов В. В., Пегель И. В., Месяц Г. А., Яландин М. И., Гинзбург Н. С. Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного потока // Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т. 77. – № 6. – С. 266–269.
12. 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. – В. 7. – С. 57–63.
13. 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 // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – В. 5. – С. 82–90.
14. Кицанов С. А., Климов А. И., Коровин С. Д., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д. Релятивистская резонансная ЛОВ дециметрового диапазона длин волн // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – № 10. – С. 891–896.
15. 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. – В. 6. – С. 87–94.
16. Коровин С. Д., Гунин А. В., Губанов В. П., Климов А. И., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ройтман А. М., Ростов В. В., Тотъменинов Е. М. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей / в кн.: Физика микроволн. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – Т. 1. – С. 43–48.
17. Коровин С. Д., Гунин А. В., Губанов В. П., Климов А. И., Куркан И. К., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В., Тотъменинов Е. М. Разработка, создание и исследование мощных эффективных источников СВЧ-излучения на базе сильноточных импульсно-периодических ускорителей // в кн.: Физика микроволн: сборник отчетов по научным

- проектам МНТП России. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. – Т. 1. – С. 41–44.
18. 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. – В. 6. – С. 27–36.
 19. Коровин С. Д., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В. Виркаторы / в кн.: Вакуумная СВЧ электроника (сборник обзоров). – Нижний Новгород, 2002. – С. 149–152.
 20. Коровин С. Д., Пегель И. В., Полевин С. Д., Ростов В. В. Импульсно-периодические микроволновые генераторы с релятивистскими электронными пучками / в кн.: Вакуумная СВЧ электроника (сборник обзоров). – Нижний Новгород, 2002. – С. 144–148.
 21. Пегель И. В. Влияние объемного заряда на процессы формирования сильноточных электронных пучков и их взаимодействия с электромагнитными полями / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1995. – 171 с.
 22. Пегель И. В. Исследование нестационарных процессов при формировании сильноточных электронных пучков наносекундной длительности // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 12. – С. 31–48.
 23. Пегель И. В. Моделирование нестационарных процессов в релятивистской лампе обратной волны методом макрочастиц // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 12. – С. 62–83.
 24. Шпак В. Г., Шунайлов С. А., Ульмаскулов М. Р., Яландин М. И., Пегель И. В. Экспериментальное исследование динамики сильноточного наносекундного сгустка субнаносекундной длительности // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22. – В. 7. – С. 65–69.
 25. Belomytsev S. Ya., Korovin S. D., Pegel' I. V. Time dependence of high-current vacuum diode impedance resulting from cathode plasma expansion / Proc. 12th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'98), Haifa, Israel, 7–12 June 1998. – V. 1. – PP. 424–427.
 26. Belomytsev S. Ya., Korovin S. D., Pegel' I. V. Time dependence of high-current vacuum diode impedance resulting from cathode plasma expansion // IEEE Trans. Plasma Sci., Dec 1999, V. 27, No. 6, PP. 1572–1577.
 27. Elchaninov A. A., Korovin S. D., Pegel I. V., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I. Highly efficient generation of subnanosecond microwave pulses in Ka-band and nanosecond pulses in X-band / Proc. 14th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'02), Albuquerque, NM, 23–28 June 2002. – PP. 279–282.
 28. Eltchaninov A. A., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I. Review of studies of superradiative microwave generation in X-band and Ka-band relativistic BWO's // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2004. – V. 32. – No. 3. – Part 1. – PP. 1093–1099.
 29. Eltchaninov A. A., Korovin S. D., Rostov V. V., Pegel I. V., Mesyats G. A., Rukin S. N., Shpak V. G., Yalandin M. I., Ginzburg N. S. Production of short microwave pulses with a peak power exceeding the driving electron beam

- power // *Laser and Particle Beams*. – 2003. – V. 21. – Issue 02. – PP. 187—196.
30. Gaponenko A. M., Karlik K. V., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Kononov I. N., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., Proskurovsky D. I., Sukhov M. Yu. **Lengthening of microwave pulse in a 3-GW relativistic BWO** / Proc. 13th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'2000), Nagaoka, Japan, June 25—30, 2000. – PP. 730—733.
 31. Ginzburg N. S., Korovin S. D., Pegel I. V., Rostov V. V., Yalandin M. I. **Production of ultra-short high-power microwave pulses in Čerenkov backward-wave systems (Review)** // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – No. 1. – P. 79—88.
 32. Gubanov V. P., Korovin S. D., Pegel I. V., Roitman A. M., Rostov V. V., Stepchenko A. S. **Compact 1000 pps high-voltage nanosecond pulse generator** // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1997. – V. 25. – No. 2. – PP. 258—265.
 33. Gubanov V. P., Korovin S. D., Pegel I. V., Rostov V. V., Stepchenko A. S., Totmeninov E. M. **Compact source of high power microwaves** / Proc. SPIE “Intense Microwave Pulses IV”, Denver, Colorado, 1996. – V. 2843. – PP. 228—237.
 34. Gunin A. V., Gubanov V. P., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Stepchenko A. S. **High-current periodically-pulsed electron accelerators and their application for high-power microwave production** / Proc. Int. Conf. on Pulsed Power Applications. Gelsenkirchen, March 29—30, 2001. – PP. G04/1—G04/6.
 35. 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., Totmeninov E. M. **X-band 3 GW relativistic BWO based on high-current repetitively-pulsed accelerator** / Proc. 11th Int. Pulsed Power Conf. – Baltimore, June 29 — July 2, 1997. – PP. 141—146.
 36. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., Stepchenko A. S. **Relativistic X-band BWO with 3 GW pulse power** / Proc. Int. Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening. Edinburgh, UK, 10—12 June 1997, pp. 173—177.
 37. Gunin A. V., Klimov A. I., Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Roitman A. M., Rostov V. V., Stepchenko A. S. **Relativistic X-band BWO with 3-GW output power** // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1998. – V. 26. – No. 3. – PP. 326—331.
 38. Gunin A. V., Landl V. F., Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Rostov V. V. **Experimental studies of long-lifetime cold cathodes for high power microwave oscillators** // *IEEE Trans. Plasma. Sci.* – 2000. – V. 28. – No. 3. – PP. 537—541.
 39. 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.

40. 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., Wioland R. **Tunable L-band and S-band gigawatt vircators with feedback** / Proc. 1st Int'l Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 24—29 Sept 2000. — V. 2. — PP. 423—428.
41. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Kutenkov O. P., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P., Wioland R. **Tunable L-band and S-band gigawatt vircators with feedback** / Proc. 13th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'2000), Nagaoka, Japan, June 25—30, 2000. — PP. 726—729.
42. Kitsanov S. A., Klimov A. I., Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., 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.
43. 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. 14th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'02), Albuquerque, NM, 23—28 June 2002. — PP. 255—258.
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. 14th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'02), Albuquerque, NM, 23—28 June 2002. — PP. 259—262.
45. Korovin S., Kurkan I., Pegel I., Polevin S., Rostov V., Totmeninov E. **Gigawatt S-band frequency-tunable sources of high-power microwave pulses** / Proc. 4th Int. Symp. Pulsed Power and Plasma Applications and Int. Workshop on Applications of Pulsed Power to Nanosized Materials. Nagaoka, Japan, 19—22 October 2003. — PP. 70—75.
46. Korovin S. D., Gubanov V. P., Gunin A. V., Pegel I. V., Stepchenko A. S. **Repetitive nanosecond high-voltage generator based on spiral forming line** / Proc. Int. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. (PPPS—2001), Las Vegas, 2001. — PP. 1249—1251.
47. Korovin S. D., Kitsanov S. A., Klimov A. I., Kurkan I. K., Pegel I. V., Polevin S. D., Rostov V. V., Tarakanov V. P. **Tunable vircators with e-beam premodulation** / Proc. Int. IEEE Conf. Pulsed Power Plasma Science (PPPS—2001), Las Vegas, 2001. — PP. 495—499.
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. Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., 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.
50. Korovin S. D., Kurkan I. K., Pegel I. V., 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.
51. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., 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, May 24—28, 1999. — PP. 229—232.
 52. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P. **Study of spontaneous microwave pulse shortening in the relativistic BWO** / Proc. 4th Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas" (Nizhny Novgorod — Saratov, Russia, 1—8 August, 1999). — V. 2.— Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2000. — PP. 839—844.
 53. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., 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.
 54. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., 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.
 55. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P. **Pulse width limitation in the relativistic backward wave oscillator** // IEEE Trans. Plasma. Sci. —2000. — V. 28. — No. 3. — PP. 485—495.
 56. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., 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.
 57. Korovin S. D., Pegel I. V., Tarakanov V. P. **Numerical experiment with the relativistic BWO using KARAT code** / Proc. 3rd Int. Workshop "Strong Microwaves in Plasmas" (Moscow — St. Petersburg, Russia, 7—14 August 1996). — Nizhny Novgorod: IAP RAS, 1997. — V. 2. — PP. 835—840.
 58. S. D. Korovin, V. V. Rostov, S. D. Polevin, I. V. Pegel, E. Schamiloglu, M. I. Fuks, R. J. Barker. **Pulsed power-driven high-power microwave sources** // Proc. IEEE. — 2004. — V. 92. — No. 7. — PP. 1082—1095.
 59. Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Krokhhmal A., Felsteiner J., Gunin A. V., Pegel I. V., Korovin S. D. **Emission properties of different cathodes at $E \leq 10^5$ V/cm** // J. Appl. Phys. — 2001. — V. 89. — No. 4. — PP. 2379—2399.
 60. Pegel I. V., Moreland L. D., Roitman A. M., Schamiloglu E., Gubanov V. P., Gunin A. V., Korovin S. D., Rostov V. V., Tarakanov V. P. **Numerical simulation and experimental measurement of pulse generation in coaxial forming lines** / Abstr. IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS'94). — Santa Fe, NM, U.S.A. — P. 197.
 61. 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., Pegel I. V. **S-band vircator with electron beam premodulation based on compact inductive energy storage generator** / Proc. Int. IEEE Pulsed Power Plasma Science Conf. (PPPS-2001), Las Vegas, 2001. — PP. 1642—1645.

62. Polevin S.D., Kitsanov S.A., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kurkan I.K., Loginov S.V., Pegel I.V., Volkov S.N., Zherlitsyn A.A. **Spontaneous pulse width limitation in S-band two-sectional vircator** / Proc. 15th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'04), St.-Petersburg, 2004. – PP. 483—486.
63. Polevin S. D., Korovin S. D., Kovalchuk B. M., Karlik K. V., Kurkan I. K., Ozur G. E., Pegel I. V., Proskurovsky D. I., Sukhov M. Yu., Volkov S. N. **Pulse lengthening of S-band resonant relativistic BWO** / Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 25—30 July 2004. – PP. 246—249.
64. Shpak V. G., Shunailov S. A., Ulmaskulov M. R., Yalandin M. I., Pegel I. V., Tarakanov V. P. **Compact high-current, subnanosecond electron accelerator** / Proc. 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'96), Prague. – 1996. – P. 913—916.



И. В. Пегель

