

На правах рукописи

Винтизенко Игорь Игоревич

Исследование релятивистских магнетронных СВЧ генераторов

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.

г. Томск, 2002 г.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики
при Томском политехническом университете.

Научный консультант
доктор физико-математических наук
Рябчиков А.И.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Черепенин В.А.
ИРЭ РАН, г. Москва,

доктор технических наук
Усов Ю.П.
ТПУ, г. Томск,

доктор физико-математических наук
Медведев Ю.В.
СФТИ ТГУ, г. Томск.

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск.

Защита диссертации состоится: _____ мая 2002 года
в _____ часов на заседании диссертационного Совета Д 212.269.05
при Томском политехническом университете по адресу:
634050, г. Томск, пр. Ленина 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Томского политехнического университета.

Автореферат разослан: _____ апреля 2002 года.

Ученый секретарь
диссертационного Совета _____ В.К. Кононов.
к.ф.-м.н.

Общая характеристика работы.

Актуальность проблемы.

Интенсивное развитие в течение последних десятилетий исследований в области сильноточной электроники обусловлено широким диапазоном практических применений сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП), обладающих импульсной мощностью до 10^{12} Вт при энергии электронов 10^5 - 10^7 эВ, токе до 10^6 А длительностью 10^{-9} - 10^{-6} с [1,2]. Подобные параметры СРЭП позволяют на несколько порядков превысить существующий в традиционной СВЧ электронике уровень мощности электромагнитного излучения, что открывает принципиально новые возможности использования излучения в различных областях науки и техники [3,4].

Хорошо известные достоинства приборов со скрещенными полями предопределили к ним интерес со стороны релятивистской высокочастотной электроники (РВЭ). Частотная и фазовая стабильность генерируемых СВЧ импульсов, высокий к.п.д., небольшие весогабаритные показатели и стоимость, низкий уровень побочных колебаний и гармоник стали основой для проведения интенсивных исследований релятивистских магнетронных генераторов (РМГ). Первые эксперименты с такими приборами в США - Массачусетский Технологический Институт и СССР - ИПФ АН СССР (г. Горький), НИИ ЯФ при ТПУ (г. Томск) позволили получить уровни мощности от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при к.п.д. 10-30%. В качестве источников питания релятивистских магнетронов первоначально применялись сильноточные электронные ускорители (СЭУ). Несмотря на то, что импульсы напряжения были наносекундной длительности, обнаружились недостатки РМГ, связанные с разрушением анодных блоков в течение нескольких сотен импульсов. Данный процесс вызывается осаждением на поверхность анодного блока пучка электронов с высокой удельной мощностью и несогласованностью внутреннего сопротивления формирующей линии СЭУ (2-24 Ω) с импедансом релятивистского магнетрона (40-100 Ω).

Экспериментальные исследования РМГ проводились и при использовании СЭУ с микросекундной длительностью импульсов напряжения. Кроме процессов разрушения анодных блоков (в том числе и за счет протекания тока короткого замыкания в магнетронном диоде) наблюдались эффекты ограничения длительности СВЧ излучения в сравнении с длительностью импульса напряжения. Авторы [5] связали этот процесс с ускоренным радиальным движением катодной плазмы под действием мощных электромагнитных полей анодного блока и нарушением условий синхронизма электронного пучка и электромагнитной волны.

Впервые выполненные в НИИ ЯФ при ТПУ с участием автора эксперименты с релятивистским магнетроном в импульсно-периодическом режиме (пакет из трех импульсов с частотой следования 160 Гц) стимулировали развитие исследований в данном направлении. В этих экспериментах для питания РМГ применены линейные индукционные ускорители (ЛИУ). Причем ЛИУ, разработанные в НИИ ЯФ при ТПУ, отличаются от аналогов (Compact LIA - Physics International Company и SNOMAD - Science Research Laboratory - США) оригинальной компоновочной схемой за счет размещения в общем корпусе низкоимпедансных полосковых формирующих линий, индукционной системы, многоканальных искровых разрядников, нелинейных дросселей насыщения.

Именно импульсно-периодический режим работы РМГ представляется наиболее перспективным для практического применения приборов при условии создания компактных излучательных комплексов. Выделяются следующие направления, в которых использование СВЧ источников с высокой средней мощностью актуально: для систем СВЧ питания линейных резонансных ускорителей электронов с высоким темпом ускорения; в радиолокации, в том числе и нелинейной; в исследованиях на электромагнитную совместимость радиоэлектронного оборудования; для стерилизации. При работе релятивистского магнетрона в частотном режиме, когда большое количество импульсов набирается в течение коротких интервалов времени, особенно остро возникает необходимость проведения тепловых расчетов на поверхности резонаторной системы для определения параметров электронных пучков, допускающих длительную работоспособность прибора. Кроме того, решение данной задачи связано с разработкой: 1) источников питания по своим параметрам наиболее полно соответствующим требованиям РМГ; 2) магнитных и вакуумных систем, допускающих длительную работу РМГ с высокой частотой следования; 3) непосредственно импульсно-периодических релятивистских магнетронных генераторов с увеличенной долговечностью элементов.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что при использовании источников питания с отличающимися выходными характеристиками по мощности, длительности, частоте повторения импульсов проявляются различные факторы, ограничивающие выходные параметры релятивистских магнетронных генераторов. В связи с этим возникает необходимость разработки и исследований разнообразных магнетронных систем для выбора наиболее подходящей для того или иного типа ускорителей.

Следует отметить, что в приборах магнетронного типа в СВЧ излучение происходит преобразование не кинетической энергии электронов, а потенциальной, и таким образом релятивизм не так жестко связан с катод-анодным напряжением. Тем не менее, для ряда

приборов с малой величиной замедления электромагнитной волны необходим учет релятивистского фактора. Теоретические исследования для релятивистского магнетрона плоской геометрии, выполненные в работе [6], показывают влияние релятивистской зависимости массы электрона от его скорости на процессы СВЧ генерации. Однако, известно существенное отличие рассмотрения процессов взаимодействия электронов с СВЧ волнами в цилиндрическом магнетроне. Оно связано с тем, что в цилиндрическом случае условие синхронизма электромагнитной волны и электронного потока точно выполняется только на определенном радиусе, в то время как для плоского магнетрона электроны находятся в фазе с волной по всей высоте спицы.

В целом, релятивистские магнетронные генераторы требуют более детального исследования и определенного обобщения. Прежде всего, это касается изучения физических процессов в пространстве взаимодействия прибора, расчета выходных характеристик, разработки оригинальных конструкций релятивистских магнетронных генераторов (включая источники питания) и их экспериментального тестирования.

Цель диссертационной работы:

- определение области рабочих параметров релятивистских магнетронных генераторов на основе теоретической модели, расчетов тепловых процессов на поверхности анодного блока, компьютерного моделирования источников питания при работе на релятивистский магнетрон и широкого спектра экспериментов;
- исследование различных типов релятивистских магнетронных генераторов для выбора оптимальной конструкции в зависимости от параметров установок для получения высоких значений импульсной мощности, больших длительностей импульсов и высокой средней мощности СВЧ излучения;
- исследование и реализация импульсно-периодического режима работы РМГ;
- расчет, разработка, моделирование, конструирование и изготовление линейных индукционных ускорителей на магнитных элементах, предназначенных для питания релятивистских магнетронных генераторов с высокой частотой следования и большим количеством импульсов непрерывной серии с выходными параметрами, не приводящими к разрушениям анодных блоков;
- создание излучательных комплексов с высокими техническими характеристиками и потребительскими свойствами, определение предельных

режимов работы комплексов по частоте следования и количеству импульсов непрерывной серии;

- развитие функциональных возможностей РМГ для расширения сферы их применения.

Научная новизна работы:

- развита теоретическая модель релятивистского магнетрона для случая цилиндрической геометрии, получены аналитические выражения для расчета выходных параметров прибора: к.п.д., анодного тока, генерируемой СВЧ мощности;
- определены области параметров РМГ, позволяющие реализовать наиболее выгодные режимы работы с точки зрения получения высокой импульсной мощности, генерации СВЧ импульсов большой энергии, высокой средней мощности СВЧ излучения;
- впервые продемонстрирована возможность работы релятивистского магнетрона 10-см диапазона длин волн с высокой частотой следования импульсов – пакет из 3 импульсов мощностью 360 МВт с частотой следования 160 Гц и создан излучательный комплекс на подвижной платформе;
- впервые реализован импульсно-периодический режим работы релятивистского магнетрона (выходная мощность 200 МВт при частоте следования импульсов до 320 Гц, и выходная мощность 350 МВт при частоте следования до 200 Гц);
- созданы излучательные комплексы с высокой средней мощностью генерируемого СВЧ излучения на основе релятивистских магнетронов с питанием от секций линейных индукционных ускорителей;
- разработаны линейные индукционные ускорители на магнитных элементах, создана компьютерная модель расчета параметров ЛИУ с целью согласования его с различными нагрузками, в том числе и с релятивистским магнетроном;
- впервые исследованы релятивистские магнетроны с внешней инжекцией электронного пучка наносекундной и микросекундной длительности;
- показано, что ограничение длительности импульса напряжения в дополнительном диоде релятивистского магнетрона с внешней инжекцией электронного пучка связано с попаданием отраженных электронов в область катод-анодного промежутка при формировании виртуального катода;

- проведены экспериментальные исследования процесса переключения плазмой обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией, показана возможность увеличения длительности импульса напряжения по сравнению с диодом прямой геометрии при одинаковых значениях напряженностей электрического и магнитного полей и прочих равных условиях, измерены концентрации и температура катодной и анодной плазмы;
- экспериментально показана возможность получения мощных (сотни мегаватт) СВЧ импульсов микросекундной длительности в 10- и 3-см диапазонах длин волн с использованием обращенных релятивистских магнетронных генераторов;
- показана возможность работы релятивистского магнетрона на резонансную нагрузку типа СВЧ компрессор с увеличением в несколько раз выходной импульсной мощности;
- исследован спектр излучения релятивистского магнетрона и влияние на него параметров источника питания, геометрических размеров анодного блока и катода, показана возможность электронной перестройки частоты излучения магнетрона и реализован способ механической перестройки частоты излучения;
- экспериментально исследованы автоколебательные режимы релятивистского магнетрона при внешней взаимной связи его резонаторов. Показано, что взаимодействие колебаний в условиях модовой конкуренции повышает стабильность рабочего π -вида колебаний, улучшает спектральные характеристики излучения;
- предложены и исследованы системы для формирования потоков электромагнитного излучения с высокой плотностью мощности.

Практическая ценность работы.

Результаты, полученные в диссертации, использованы для создания установок на основе импульсно-периодических релятивистских магнетронов при питании от ЛИУ, переданных Заказчикам. Разработаны оригинальные конструкции ЛИУ на магнитных элементах. Ускорители могут применяться для формирования электронных и ионных пучков в технологических установках, для генерации и усиления электромагнитного излучения приборами РВЭ. Теоретическая модель релятивистского магнетрона развита для цилиндрической геометрии электродов. Получены формулы для расчета выходных параметров релятивистского магнетрона. Исследован спектр излучения РМГ и реализован

способ механической перестройки генерируемой частоты, измерен уровень гармонических составляющих основной частоты. Экспериментально исследован эффект сокращения длительности импульса напряжения в обращенном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией, показана перспективность применения таких диодов для генерации электромагнитного излучения приборами М- и О- типов. При наносекундной и микросекундной длительности импульса ускоряющего напряжения исследованы режимы работы релятивистских магнетронов с внешней инжекцией электронного пучка. Найдены условия для эффективной генерации СВЧ излучения такими приборами и предложены меры для устранения причин ограничения длительности импульса тока электронного пучка при формировании виртуального катода. Применение устройств СВЧ компрессии в связке с релятивистским магнетроном позволяет превысить гигаваттный уровень мощности электромагнитного излучения при работе в импульсно-периодическом режиме. Использование внешних каналов связи открывает перспективы применения РМГ с увеличенным числом резонаторов анодного блока, обладающих за счет этого более высокой эффективностью.

Апробация работы и публикации.

Основные материалы диссертации докладывались: на 3 (г. Горький, 1983г.), 4 (г. Москва, 1984г.), 5 (г. Новосибирск, 1987г.), 6 (г. Свердловск, 1989г.) Всесоюзных семинарах «Высокочастотная релятивистская электроника»; на Всероссийском семинаре «Высокочастотная вакуумная электроника» (г. Нижний Новгород, 2001г.); на 6 (г. Новосибирск, 1985г.), 7 (г. Новосибирск, 1988г.), 8 (г. Свердловск, 1990г.), 12 (г. Томск, 2000г.) «Симпозиумах по сильноточной электронике»; на Всесоюзном семинаре «Плазменная электроника» (г. Томск, 1986г.); на совещании «Диоды для генерации РЭП микросекундной длительности» (г. Новосибирск, 1985г.); на 11 Всесоюзной конференции «Электроника СВЧ» (г. Орджоникидзе, 1986г.); на 9 Всесоюзной конференции «Методы расчета ЭОС» (г. Ташкент, 1988г.); на 17 «Совещании по ускорителям заряженных частиц» (г. Протвино, 2000г.); на 6 (г. Кобе, Япония, 1986г.), 7 (г. Карлсруэ, Германия, 1988г.), 8 (г. Новосибирск, 1990г.), 12 (г. Тель-Авив, Израиль, 1998г.), 13 (г. Нагаока, Япония, 2000г.) Международных «Конференциях по мощным пучкам заряженных частиц»; на 13 Международном «Симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме» (г. Париж, Франция, 1988г.); на Международной «Конференции по мощному электромагнитному излучению в плазме» (г. Нижний Новгород, 1999г.); на 1 (г. Монтерей, США, 2000г.), 2 (г. Нордвик, Нидерланды, 2001г.) «Международных конференциях по

вакуумной электронике»; на 13 (г. Лас-Вегас, США, 2001г.) Международной конференции «Pulsed Power».

Результаты диссертации опубликованы в 51 работе, список работ помещен в конце автореферата.

Положения, выносимые на защиту:

1. На основе теоретической модели релятивистского магнетрона цилиндрической геометрии, расчетов тепловых процессов на поверхности анодных блоков, компьютерного моделирования, широкого круга экспериментальных исследований определены области рабочих параметров релятивистских магнетронных генераторов (к.п.д., анодный ток, мощность, допустимая длительность импульса напряжения, вид огибающей СВЧ импульсов) при использовании различных источников питания – линейных индукционных ускорителей или сильноточных электронных ускорителей.

2. Линейные индукционные ускорители на магнитных элементах обеспечивают частоту следования импульсов в сотни герц с высокой повторяемостью амплитуды и формы выходных импульсов. Использование оригинальной компоновочной схемы, применение эффекта перекрытия фаз, разбаланса емкости конденсатора последнего звена сжатия магнитного импульсного генератора и емкости одинарной формирующей линии позволяет значительно сократить весогабаритные показатели ускорителей в сравнении с имеющимися аналогами. Созданные на их основе импульсно-периодические релятивистские магнетронные генераторы могут надежно и эффективно работать с высокой средней мощностью СВЧ излучения, имеют большой ресурс работы, обладают высокой стабильностью генерируемых колебаний и допускают возможность работы на резонансную нагрузку типа СВЧ компрессор, что позволяет в несколько раз увеличивать импульсную мощность.

3. Применение обращенных релятивистских магнетронных генераторов перспективно для получения СВЧ импульсов микросекундного диапазона длительностей при использовании устройств вывода СВЧ излучения по оси прибора. В обращенном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией, используемом такими приборами, длительность импульса напряжения в 2-4 раза больше, чем в обычном диоде при одинаковых напряженностях электрических полей на электродах диода и прочих равных условиях. Перекрытие катод-анодного промежутка обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией вызывается радиальным движением анодной плазмы под действием развивающейся в ней центробежной неустойчивости.

4. Использование релятивистских магнетронов с внешней инжекцией электронного пучка целесообразно для получения СВЧ импульсов большой мощности, поскольку позволяет увеличивать ресурс анодного блока. Эффективная генерация СВЧ излучения в этих системах происходит при использовании стационарного состояния электронного пучка с виртуальным катодом, что достигается применением диафрагм на входе анодного блока, ограничением тока, уходящего из пространства взаимодействия прибора, увеличением отношения инжектируемого тока к предельному току транспортировки в анодном блоке.

5. Применение внешнего канала связи между резонаторами анодного блока релятивистских магнетронов в условиях модовой конкуренции повышает стабильность рабочего π - вида колебаний, улучшает спектральные характеристики излучения. С использованием релятивистских магнетронных генераторов с внешним каналом связи возможно построение источников направленного электромагнитного излучения.

6. Релятивистские магнетронные генераторы с питанием от линейных индукционных ускорителей позволяют создавать компактные излучательные установки, в том числе и на подвижной платформе.

Личный вклад автора.

Диссертация является итогом многолетних исследований, проведенных в НИИ ядерной физики при ТПУ под руководством и при непосредственном участии автора. Автор внес существенный вклад в постановку задач, выбор направлений и методов исследований, в проведение всех представленных в диссертации экспериментов, анализ, интерпретацию и обобщение полученных результатов, оформление публикаций. В постановке отдельных задач и обсуждении результатов принимали участие сотрудники НИИ ЯФ при ТПУ Диденко А.Н., Рябчиков А.И., Фоменко Г.П., Сулакшин А.С., Фурман Э.Г., сотрудники ИПФ РАН Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. Результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Структура, объем и содержание диссертации.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения и одного Приложения. Объем диссертации составляет 231 страницу, в том числе 104 рисунка, 27 таблиц и Список литературы из 228 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, выбирается направление исследований, приводятся положения, составляющие научную новизну и основные положения, представляемые к защите.

Глава 1 посвящена физическим процессам в релятивистских магнетронных генераторах. В первой части §1.1 кратко описан принцип работы, отличия подобных приборов от классических аналогов. Проведен анализ конструкций РМГ, дано описание результатов экспериментальных исследований, выполненных в различных организациях. В частности, проанализировано влияние на выходные характеристики приборов таких параметров как длина анодного блока, число резонаторов, материал, добротность и тип резонаторной системы, материал катода, способ вывода СВЧ мощности.

Рассмотрена теоретическая модель релятивистского магнетрона цилиндрической геометрии с использованием метода усреднения. Получены уравнения движения электронов, из которых следует, что в релятивистском магнетроне по сравнению с нерелятивистским действие на электроны статических электрического и магнитного полей ослаблено в γ_Φ раз, а высокочастотных электрических полей ослаблено в γ_Φ^3 раз ($\gamma_\Phi = (1 - \beta_\Phi)^{-1/2}$, β_Φ - величина замедления электромагнитной волны для рабочего вида колебаний). Аналогичный результат получен и при рассмотрении плоской модели релятивистского магнетрона, представленной в Приложении. Поскольку магнетроны эффективно работают при больших замедлениях электромагнитной волны $\beta_\Phi \sim 0,2-0,45$, релятивистские поправки составляют: $\gamma_\Phi \sim 1,02-1,09$, $\gamma_\Phi^3 \sim 1,06-1,3$.

Найдено решение уравнений движения, из которого следует, что во вращающейся системе координат орбитальное движение электронов происходит с неизменной угловой скоростью и радиусом вращения. Движение центров орбитальных траекторий описывается двумя уравнениями для радиальной и угловой скорости. Проведен анализ полученного решения. Определены области благоприятных фаз, координаты особых точек (в которых радиальные и угловые скорости электронов равны нулю). Получено дифференциальное уравнение для траектории электронов и отмечено, что оно соответствует выражению для приведенного потенциала во вращающейся системе отчета.

С использованием выражений для радиальной и угловой скоростей движения электронов выведены соотношения для анодного тока, электронного к.п.д., полного к.п.д., генерируемой мощности. Показано, что для получения высоких значений электронного к.п.д. и генерируемой мощности целесообразно выполнять РМГ с наибольшим замедлением электромагнитной волны, и для увеличения общего к.п.д. прибора

необходимо предпринимать меры для уменьшения торцевого тока. Определено, что генерируемая РМГ мощность выражается через величины, которые выгодно повышать: напряженности статического (E) и высокочастотного электрического полей ($\tilde{E}$); длина анодного блока (L) и число резонаторов РМГ (N); а также через величины - радиус катода (r_c) и анода (R), по которым мощность следует оптимизировать. Однако параметры N , L ограничены необходимостью обеспечения достаточного разделения видов колебаний по частоте и по величине замедления электромагнитной волны. Величина E зависит от энергетических возможностей источников высокого напряжения и магнитного поля, уровень $\tilde{E}$ не должен превышать пробивных значений в резонаторах и устройствах вывода мощности. Что касается R и r_c , показано, что для каждого магнитного поля существует оптимальный радиус катода, и что для заданного радиуса катода есть интервал рабочих магнитных полей.

С использованием формул для выходных параметров релятивистских магнетронов построены рабочие диаграммы конкретных приборов, из которых следует, что одинакового уровня СВЧ мощности можно достичь при одном токе, но существенно отличающихся напряжениях и соответственно разным к.п.д. Подобное поведение линий равной мощности и равного к.п.д. вызвано увеличением торцевого тока потерь при повышении напряжения.

В параграфе 1.2 представлена инженерная методика выбора размеров элементов РМГ. Точный расчет геометрии анодного блока и пространства взаимодействия осуществляется методами теории поля. В основе метода лежит нахождение входных проводимостей в пространстве взаимодействия и в пространстве резонаторов, приравнивание их на границе раздела и на основе этих данных составление дисперсионного уравнения. При частотах соседних колебаний, близких друг к другу, необходимо иметь хорошее разделение их по напряжению ΔU (по фазовой скорости $\Delta\beta$). Подбирая геометрию резонаторной структуры можно добиться того, что разделение типов волн и их гармоник по величине фазовой скорости будет приемлемым. Приведены дисперсионные характеристики колебаний 6-резонаторного релятивистского магнетрона для π -вида и соседнего с ним $(N/2-1)$ -вида по длине волны $\Delta\lambda = |\lambda_{N/2-1} - \lambda_\pi|$ и по фазовой скорости $\Delta\beta = |\beta_{N/2-1} - \beta_\pi|$. Показано, что с увеличением D_T/R разделение по длинам волн $\Delta\lambda/\lambda_\pi$ уменьшается, а разделение по фазовой скорости $\Delta\beta/\beta_\pi$ возрастает ($D_T = r_m - R$ - глубина резонатора, r_m - внешний диаметр резонаторов анодного блока). Следовательно, при работе магнетрона в области, где разделение по длинам волн $\Delta\lambda/\lambda_\pi$ слабое, стабильность генерации будет обеспечиваться хорошим разделением по фазовой скорости

и наоборот. С точки зрения подавления «паразитных» видов колебаний при работе магнетрона с импульсным источником питания лучше конструировать приборы с хорошим разделением по фазовым скоростям, т.е. выбирать $D_r/R \approx 1$, добиваясь максимально возможного r_c/R (для лучшего разделения по частоте).

Для различных применений конструировались, рассчитывались и изготавливались анодные блоки с 6, 8, 12 резонаторами лопаточного типа прямой и обращенной геометрии и с 12 резонаторами типа щель-отверстие. Для увеличения разделения частот для последнего магнетрона использована разнорезонаторная конструкция. Размеры анодных блоков представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Геометрия магнетрона	Прямая			Обращенная			
Число резонаторов	6	8	12	8	10	12	12
Диаметр анода, мм	43	43	60	60	48	90	90
Диаметр катода, мм	16-22	16-22	22-50	80	68	110	110
Глубина резонаторов, мм	21,5	21,5	----	18	14	31	31
Ширина щели, мм	7,5	5,62	7,83	11,8	7,5	15	12
Угол раскрыва резонаторов	30-40 ⁰	22,5 ⁰	----	22 ⁰ ,5	18 ⁰	20 ⁰	15 ⁰
Радиус отверстия большого, мм, малого резонаторов, мм	---	---	8,5 6,5				
Высота щелей для большого, мм, малого резонаторов, мм	---	---	13 6				

В §1.3 представлены результаты исследований тепловых процессов, протекающих на поверхности анодного блока при осаждении электронов анодного тока. Рассчитаны предельные режимы работы РМГ, не приводящие к разрушениям анодных блоков, в зависимости от удельной мощности электронного пучка, длительности импульсов, частоты следования, количества импульсов непрерывной серии. Для этих расчетов определены области осаждения электронов на боковую и цилиндрическую поверхности ламелей анодного блока, глубина проникновения электронов и равномерность прогрева. Рассмотрены процессы рассеивания тепла в течение импульса питания и в паузе между импульсами. На основе указанных исследований предложены меры по увеличению долговечности анодных блоков релятивистских магнетронов, которые сводятся к

следующему: а) для работы РМГ без разрушения анодного блока в моноимпульсном режиме необходимо снижать удельные тепловые нагрузки до значений 10^8 Вт/см² при длительности импульса менее 10^{-7} с и до 10^7 Вт/см² при длительности $\sim 10^{-6}$ с; б) импульсно-периодический режим работы РМГ возможен при плотности энергии электронного пучка не выше 10^7 Вт/см² длительностью 10^{-7} с с частотой повторения не более 100 Гц и ограничен высокими значениями как средней, так и импульсной температуры. Применение охлаждения анодного блока позволяет стабилизировать тепловое состояние поверхности для импульсно-периодического режима в паузе между импульсами; в) для изготовления анодных блоков следует использовать металлы с высокой температурой плавления, высокими значениями динамического предела текучести, малыми температурным коэффициентом линейного расширения и модулем упругости; г) необходимо развивать площадь поверхности ламелей, на которую осаждается электронный пучок, выбором соответствующих конструкций резонаторов; д) для получения больших средних мощностей СВЧ излучения целесообразно использование источников питания с увеличенной длительностью импульса τ , поскольку рост температуры поверхности анодного блока пропорционален $\sqrt{\tau}$.

В §1.4 анализируется влияние размеров отдельных элементов РМГ и параметров источника питания на амплитудные и частотные характеристики генерируемых СВЧ импульсов, и рассматривается возможность управления ими. Одновременно определяется правомерность используемых при расчете резонаторных систем магнетронов следующих допущений: отсутствие пространственного заряда, двухмерность задачи, ограниченное количество учитываемых гармоник и точность вычисления корней дисперсионного уравнения. «Холодные» измерения релятивистского 6-резонаторного магнетрона без вывода мощности и в сборе с выводом мощности показали, что расчетные (3145 МГц) и измеренные значения (3257 МГц) частот π - вида колебаний близки, свидетельствуя о применимости указанных выше допущений. Использование несимметричного волноводного вывода мощности несколько изменяет частоту π - вида колебаний (3160 МГц).

Характеристики излучения этого релятивистского магнетрона исследовались на СЭУ Тонус-1 при напряжениях 0,6-1 МВ, полном токе 6-20 кА и длительности импульса напряжения 60 нс (рис.1). Увеличение мощности электронного пучка при практически неизменном электронном к.п.д. прибора приводит к заметному росту выходной мощности. Обнаружено электронное смещение частоты (ЭСЧ) в релятивистском магнетроне, т.е.

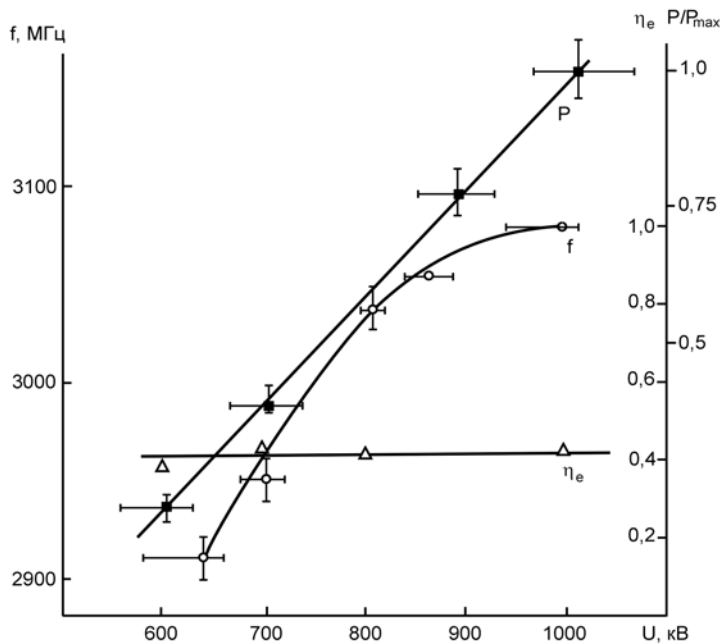


Рис.1. Зависимости несущей частоты f , мощности СВЧ импульсов P , электронного к.п.д. η_e релятивистского магнетронного генератора от величины анодного напряжения.

приближение несущей частоты генерируемого СВЧ импульса к частоте «холодной» системы. Причем, в области больших коэффициентов ЭСЧ увеличение частоты при повышении катод-анодного напряжения может быть объяснено уменьшением емкостного эффекта, создаваемого сгустком электронов у щели резонатора. В этом случае с ростом высокочастотного напряжения на резонаторе возрастают силы фазовой фокусировки, стремящиеся уменьшить угол сдвига между

максимумом СВЧ поля и положением электронной спицы Θ_1 . По мере роста напряжения и уменьшения угла Θ_1 увеличивается влияние заряда электронного облака на генерируемую частоту, что снижает величину коэффициента ЭСЧ.

Полоса генерации релятивистского магнетрона не превышала 60 МГц для всего диапазона напряжений. В пределах чувствительности используемой в экспериментах регистрирующей аппаратуры наличие гармонических составляющих не зарегистрировано (по отношению к мощности основной частоты порог обнаружения 2-й гармоники составлял -28 дБ, 3-й -35 дБ). Отмечено, что этот факт позволяет оптимистично рассматривать возможность использования релятивистских магнетронов для нелинейной радиолокации.

Выявлено влияние диаметра катода на несущую частоту излучения π - вида колебаний. Уменьшение частоты при увеличении диаметра катода объясняется повышением величины катод - анодной емкости. Заметное влияние на частоту СВЧ излучения и выходную мощность оказывает тип резонаторной системы: закрытая с обеих сторон торцевыми крышками, полуоткрытая (одна торцевая крышка) и открытая. Закрытая система отличается от остальных наличием вариации переменного электрического поля по длине анодного блока с пучностью в центре и узлами на краях, значениями ненагруженной добротности, а также резонансными частотами видов колебаний: $f_{3n} = f_{0n} \sqrt{1 + (c/f_0 2L)^2}$,

где (f_{3n}) -, (f_{0n}) - частота n-го вида колебаний для закрытого и открытого анодных блоков, c - скорость света. Для механической перестройки частоты излучения релятивистского магнетрона предложено и экспериментально апробировано устройство, основанное на применении торцевых крышек с различными внутренними радиусами. Показано, что для перестройки частоты излучения РМГ в пределах 8% целесообразно изменение внутренних радиусов у обеих торцевых крышек. В этом случае снижение уровня мощности не превышает 10%.

Вторая Глава диссертации посвящена источникам питания релятивистских магнетронных генераторов. Параграф 2.1 носит обзорный характер, в котором кратко представлены конструкции СЭУ наносекундной и микросекундной длительности НИИ ЯФ при ТПУ. С использованием СЭУ проводились работы по определению предельных возможностей и оптимизации различных конструкций РМГ.

Параграф 2.2 посвящен линейным индукционным ускорителям. Описан принцип их действия, компоновочная схема, элементная база. Отмечены преимущества ЛИУ перед сильноточными ускорителями других типов такие как: 1) напряжение на элементах конструкции не превышает напряжения возбуждения одного индуктора; 2) высокий к.п.д. преобразования энергии первичного накопителя в энергию электронного пучка; 3) увеличение кинетической энергии электронов осуществляется применением однотипных ускоряющих модулей; 4) темп ускорения может достигать 1 МэВ/м. Кроме того, энергия повторных импульсов, связанных с рассогласованием импедансов источника питания и нагрузки, рассеивается не в магнетронном диоде, а затрачивается на перемагничивание сердечников индукционной системы, что является принципиально важным для релятивистских магнетронных генераторов с большим ресурсом работы.

Приведены соотношения для оценки выходных параметров и размеров модулей ЛИУ. Применение оригинальной компоновочной схемы, заключающейся в использовании низкоимпедансных полосковых формирующих линий (ФЛ), расположенных поверх сердечников индукционной системы по спирали Архимеда [7], обеспечивает возможность значительного снижения весогабаритных показателей ускорителей.

В работе в качестве источников питания РМГ рассмотрены ЛИУ с различными коммутаторами формирующих линий: ЛИУ с многоканальными искровыми разрядниками – ЛИУ с МР (§2.2.1) и ЛИУ на магнитных элементах – ЛИУ на МЭ (§2.2.2). Параметры ЛИУ представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Тип ЛИУ	Энергия электронов, кэВ	Ток пучка, кА	Длительность импульса, нс	Частота следования импульсов в режимах, Гц		
				непрерывный	импульсно-периодический	пакетный. 3-5 импульсов
ЛИУ с МР	400	10	100	<10	50	200
ЛИУ на МЭ	450	5	180	<100	400	3300

Оба типа коммутаторов, располагаясь на торце индукционной системы, удачно вписываются в конструкцию ускорителя и образуют малоиндуктивное соединение с формирующей линией. ЛИУ с МР обладают более высокими выходными параметрами, меньшими весогабаритными показателями и ценой. В то же время, частота следования импульсов такого ЛИУ не более 50 Гц в непрерывном режиме и 200 Гц в режиме пакетов из 3-5 импульсов ограничена временем восстановления электрической прочности газового промежутка. В ЛИУ на МЭ используется магнитный коммутатор, представляющий собой дроссель насыщения. Для реализации такого коммутатора с наименьшей индуктивностью требуется осуществлять зарядку формирующих линий ускорителя за время порядка 200-300 наносекунд, что предполагает применение магнитного импульсного генератора (МИГ). Для подобного ускорителя предельная частота следования импульсов ограничивается длительностью процесса обратного перемагничивания по петле гистерезиса дросселей насыщения и сердечника импульсного трансформатора и может быть доведена в режиме пакетов импульсов до единиц килогерц. В §2.2.2 описан принцип работы ЛИУ на

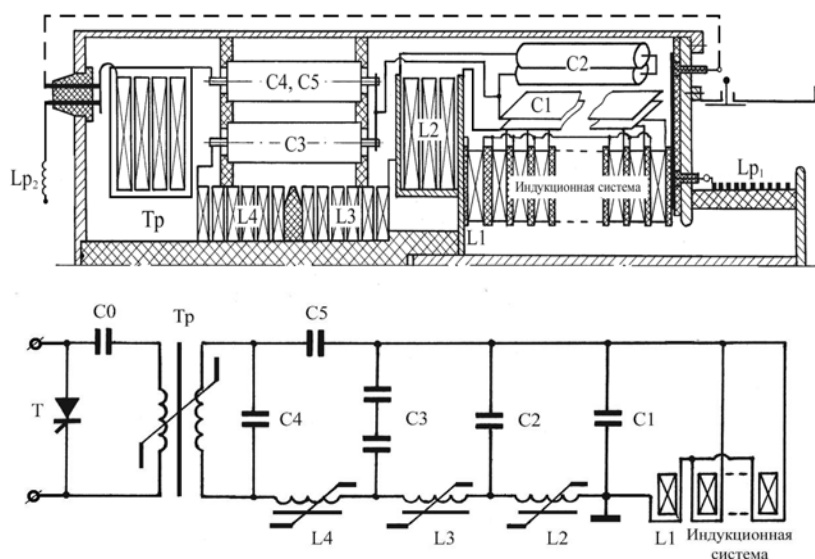


Рис.2. Компоновочная и принципиальная электрическая схемы ЛИУ 04/6.

магнитных элементах, получены соотношения для инженерного расчета элементов МИГ, индукционной системы и ФЛ, приведены компоновочные и принципиальные электрические схемы ускорителей (рис.2). Как видно из рисунка, все элементы ускорителя размещены в одном

цилиндрическом корпусе диаметром 700 мм и длиной 1600 мм. Это позволяет уменьшить индуктивности соединения элементов, повысить надежность ускорителя. Для снижения весогабаритных показателей ЛИУ использован эффект перекрытия фаз разряда конденсатора предыдущего звена сжатия МИГ и заряда конденсатора следующего звена. Для увеличения импульсной мощности ЛИУ обосновывается необходимость использования формирующей линии емкостью меньшей, чем у конденсатора последнего звена сжатия МИГ. Поскольку процессы компрессии энергии в МИГ, разряда ФЛ ускорителей на нагрузку достаточно сложны для аналитических расчетов, создана компьютерная модель ЛИУ на магнитных элементах (ЛИУ с МР и СЭУ представляют собой частные случаи модели) -

(§2.3). Модель позволяет

производить расчет выходных параметров ускорителей и настройку на экстремумы, например, по выходной мощности, к.п.д., качеству пучка и т.д. Для этого реальная электрическая схема ускорителя представлялась эквивалентной схемой, определялись параметры элементов, записывались дифференциальные уравнения для напряжений и токов, которые решались численным методом. В качестве нагрузки ЛИУ

в компьютерной модели рассматриваются различные варианты: а) линейное сопротивление; б) нелинейное сопротивление, изменяемое в соответствии с законом Чайльд-Ленгмюра; в) нелинейно-параметрическое сопротивление, которое на каждом шаге

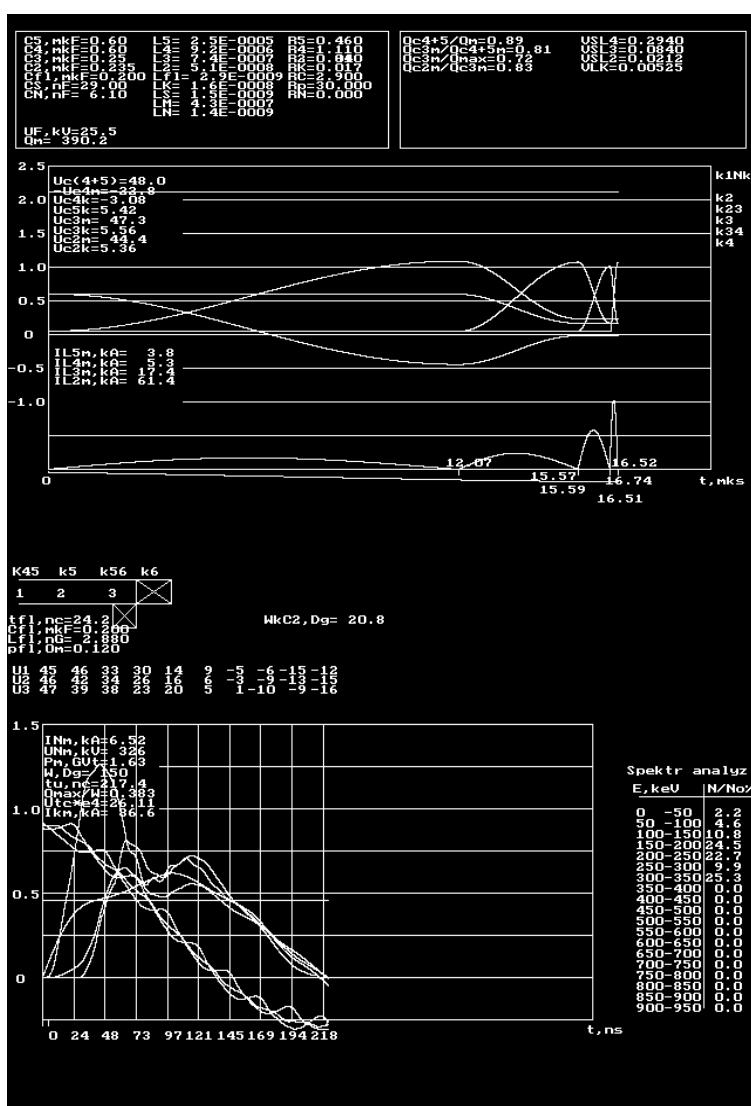


Рис.3. Результаты компьютерного моделирования РМГ и ЛИУ 04/6. Вверху – эюры напряжения и тока на элементах МИГ, характерные моменты времени, параметры расчетной схемы. Внизу – эюры напряжения и тока ЛИУ, генерируемая мощность РМГ.

интегрирования определяется как результат решения компьютерной модели релятивистского магнетрона. Компьютерная программа позволила провести: 1) оптимизацию по эффективности и выходной мощности параметров ЛИУ и РМГ; 2) расчет амплитуды и формы огибающей СВЧ импульсов релятивистского магнетрона при питании от СЭУ и ЛИУ; 3) определение оптимальных диаметров катода и анода для лучшего согласования импедансов ускорителя и магнетрона; 4) оценку влияния динамической нагрузки типа релятивистский магнетрон на разрядные процессы в формирующих линиях ускорителей. Тестирование результатов расчетов по совместной модели ускоритель - релятивистский магнетрон проводилось при сравнении с результатами экспериментов. Рассматривались и такие крайние случаи, как работа ускорителя в режимах, близких к короткому замыканию и холостому ходу (магнитное поле отсутствует или значительно выше синхронного значения). Измеренные и рассчитанные импульсы напряжения и тока (рис.3) отличались по амплитуде и длительности не более, чем на 10%. Несоответствие расчетных и измеренных значений генерируемой мощности и электронного к.п.д. релятивистского магнетрона составляло не более 20% и 10%, соответственно, что частично можно связать с неточностью измерений и учетом влияния устройства вывода СВЧ излучения из анодного блока.

Глава 3 посвящена исследованиям обращенных релятивистских магнетронных генераторов (ОРМ) и оценки возможности их применения для получения СВЧ импульсов большой энергии. Интерес к подобным системам вызван тем, что в обращенном диоде не развивается центробежная неустойчивость катодной плазмы, и можно предполагать увеличение длительности импульса напряжения, значит, длительности и энергии импульса СВЧ излучения. Поэтому §3.1 содержит описание конструкций обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией (ОКДМИ), являющегося прототипом магнетронного диода. Проведен анализ экспериментальных данных в двух режимах работы ОКДМИ: нагруженном, при котором осуществляется формирование и транспортировка электронного пучка на коллектор; и ненагруженном – без вывода пучка вследствие отсутствия коллектора. Приведены результаты исследований влияния геометрии диода (прямой или обращенный) на длительность импульса напряжения t_k . Показано, что при прочих равных условиях (материал электродов, вакуумные условия, величина межэлектродного зазора и напряжения на диоде) величина t_k в обращенном диоде в 2-4 раза больше, чем в прямом. Определяющее влияние на длительность импульса напряжения в ОКДМИ оказывает величина напряженности электрического поля на аноде и материал анода (рис.4), а именно, его адсорбционные свойства. Выполненные спектроскопические

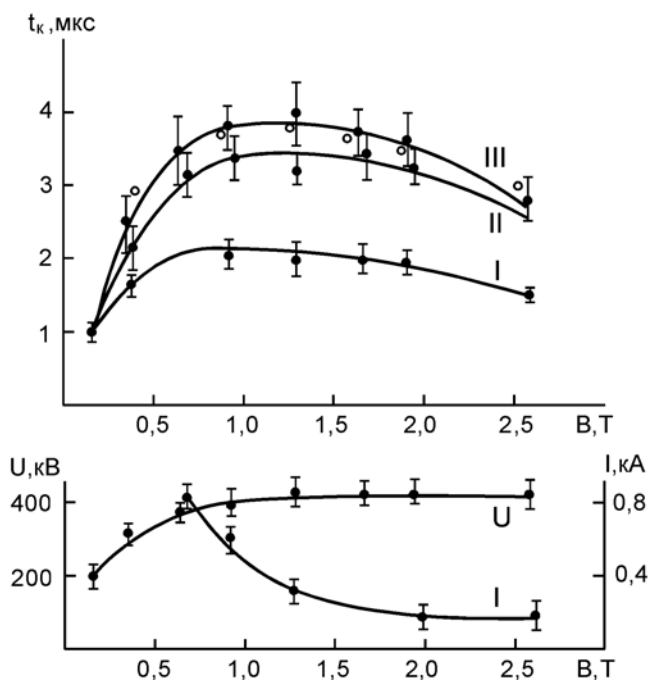


Рис.4. Зависимости а) длительности импульса напряжения, I- C, II- Cu, III- латунь, нержавеющая сталь, Al, Pb, W, Mo, W-Re. ○- расчетные значения для анодов из нержавеющей стали, б) амплитуды напряжения и анодного тока от величины индукции магнитного поля для анодов из нержавеющей стали.

исследования состава и параметров диодной плазмы в ОКДМИ показывают, что в ее состав входят в основном протоны, а также ионы материала катода и анода. Электронные концентрации плазмы, измеренные по штарковскому уширению спектральной линии H_γ , составляют в области катода $N_e \sim 4 \pm 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, анода $\sim 2 \pm 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, межэлектродном промежутке $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В предположении термодинамического равновесия плазмы по интенсивности свечения линий Fe выполнены оценки электронной температуры на аноде $T_e \sim 0,35 \pm 0,2 \text{ эВ}$.

На основе экспериментальных исследований предложена модель пробоя ОКДМИ (§3.2), связывающая процесс замыкания межэлектродного промежутка с развитием центробежной неустойчивости анодной плазмы. В соответствии с моделью t_k составляет сумму двух интервалов времени: образования замкнутого анодного плазменного слоя τ_{cl} и развития в нем центробежной неустойчивости $\tau_{цб}$. Величина τ_{cl} определяется вакуумными условиями в диоде, адсорбционными свойствами материала анода и величиной анодного тока, протекающего поперек силовых линий изолирующего магнитного поля. Время $\tau_{цб}$ зависит от напряженности электрического и магнитного полей и рассчитывается согласно [8], поскольку по своему составу, параметрам и свойствам катодная плазма в КДМИ и анодная в ОКДМИ совпадают.

В соответствии с предложенной моделью, увеличение длительности магнитной изоляции в обращенном диоде в сравнении с прямым диодом объясняется задержкой во времени образования плазмы на центральном электроде - аноде. Существенное значение в модели пробоя межэлектродного промежутка ОКДМИ приобретают исследования механизма протекания тока, вызывающего образование анодной плазмы при магнитных

полях, значительно превышающих критическое значение. Выполненные измерения параметров СВЧ излучения из ОКДМИ указывают на возможность развития в электронном слое диокотронной неустойчивости.

В §3.1 приведены также результаты численного моделирования и аналитических оценок величины тока, формируемого в ОКДМИ. Сопоставление их с данными экспериментальных измерений показывает хорошее соответствие. Отмечена перспективность применения ОКДМИ для формирования СРЭП микросекундной длительности для релятивистских генераторов О- типа.

Вторая половина Главы 3 диссертации посвящена комплексным исследованиям обращенных релятивистских магнетронных генераторов в 10- и 3-см диапазонов длин волн. В §3.3 описаны процессы конструирования, расчета дисперсионных характеристик ОРМ 10-см диапазона длин волн и обращенного коаксиального релятивистского магнетрона (ОКМ) 3-см диапазона длин волн. Поскольку традиционный вывод излучения «вбок» (через щели связи в катоде и волноводный переход) имеет такой недостаток, что при работе обращенного релятивистского магнетрона между анодным блоком и катодом находится электронное облако, приводящее к отражениям СВЧ мощности, необходимо осуществлять вывод СВЧ энергии «вперед» по оси трубы дрейфа. Приведены результаты конструирования и исследований на малом уровне мощности устройств вывода СВЧ излучения из ОРМ на волне E_{01} и H_{01} . В результате «холодных» измерений определены наиболее эффективные конструкции устройств вывода.

Во второй части §3.3 описан ОКМ 3-см диапазона длин волн. Цилиндрический стабилизирующий резонатор такого магнетрона при помощи щелей связи соединен с резонаторами анодного блока через один - («открытые» резонаторы), другая система резонаторов («закрытые») непосредственно не связана с внешним контуром. Связанные между собой через пространство взаимодействия «открытые» и «закрытые» резонаторы возбуждаются в противофазе, образуя поле π - вида. Использование внутреннего высоккодобротного цилиндрического резонатора, работающего на колебаниях вида H_{011} , позволяет эффективно стабилизировать частоту и вид колебаний в пространстве взаимодействия. Анодный блок исследуемого магнетрона содержал 48 резонаторов. Расчет спектра резонансных частот ОКМ проводился методами теории поля. В результате расчетов достигнуто разделение по напряжению возбуждения между рабочим и «паразитными» видами колебаний 24% для $(N/2-2)$ - и 3% для $(N/2-3)$ - видов колебаний. На основе расчетов изготовлен ОКМ, внешний вид которого показан на рис.5.



Рис.5. Внешний вид анодного блока ОКМ.

В процессе «холодных» измерений определялись резонансные частоты, возможность возбуждения «паразитных» видов колебаний, эффективность применения графитовых поглотителей и фильтра типов волн. Уровень выводимого излучения оптимизирован в зависимости от диаметра отверстия в кольцевой

диафрагме.

В §3.4 описана экспериментальная схема и результаты исследований 8-, 10- и 12-резонаторных ОРМ и ОКМ на ускорительном комплексе «ЛУЧ». Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3.

N	Частота, МГц	Напряжение, кВ	Ток, кА	t_k , мкс	Мощность, МВт	Тип волны	К.п.д., %	$t_{\text{СВЧ}}$, мкс
8	3330	500	6,0	1,6	120	E ₀₁	4	1,2
10	4480	600	6,0	1,3	200	E ₀₁	5	1,0
10	4480	600	6,0	1,0	34	H ₀₁	1	1,0
12	2610	400	8,5	1,0	350	E ₀₁	10	0,7
12	2610	400	8,5	1,0	40	H ₀₁	1,2	0,7
12	2610	400	8,5	1,0	300	E ₀₁	9	0,6
12	2610	400	8,5	1,0	60	H ₀₁	1,8	0,6
48	10340	400	5,5	1,0	100	H ₀₁	4,5	0,7

Зависимость мощности СВЧ колебаний ОРМ от мощности электронного пучка имеет линейно-нарастающий характер и достигает для 10-резонаторного анодного блока величины $P \sim 200$ МВт при длительности СВЧ импульса ~ 1 мкс и для 12-резонаторного $P \sim 350$ МВт при длительности $\sim 0,7$ мкс. Для 12-резонаторных ОРМ в сравнении с 8- и 10-резонаторными наблюдалось снижение длительности импульса напряжения t_k , связанное с наличием большого анодного тока за счет мощных СВЧ полей в пространстве

взаимодействия. При этом уменьшается интервал времени $\tau_{сл}$, соответственно, t_k и $t_{СВЧ}$. В сравнении с релятивистскими магнетронами прямой геометрии зарегистрировано увеличение в 2-3 раза энергосодержания СВЧ импульсов, генерируемых ОРМ, при соответствующих параметрах зарядного напряжения ГИН. На основе рассмотренной теоретической модели релятивистского магнетрона и измерений анодного тока сделано заключение, что увеличение выходных параметров ОРМ может быть достигнуто применением более эффективных устройств вывода СВЧ излучения.

Эксперименты с ОКМ 3-см диапазона длин волн показали возможность его эффективной работы с выходной мощностью $P \sim 100$ МВт при субмикросекундной длительности СВЧ излучения.

Сделан вывод, что применение обращенных магнетронных систем перспективно с источниками питания с длительностью импульса напряжения ~ 1 мкс.

Глава 4 диссертации посвящена анализу работы и результатам экспериментальных исследований магнетрона с внешней инжекцией СРЭП.

В §4.1 рассмотрены физические принципы генерации СВЧ излучения в приборе, подобном [9]. Генератор интересен тем, что в пространстве взаимодействия отсутствует взрывоэмиссионный катод, роль которого выполняет инжектированный дополнительным диодом электронный пучок. В таком приборе устраняется причина ограничения длительности СВЧ импульса, связанная с ускоренным движением катодной плазмы в мощных электромагнитных полях анодного блока, и следует ожидать увеличения ресурса анодного блока по следующим причинам. Во-первых, из-за вынесения из пространства взаимодействия прибора области замыкания плазмой при использовании импульсов напряжения микросекундной длительности и, во-вторых, вследствие отсутствия потерь энергии, вызванных неполным согласованием импедансов источника питания и СВЧ генератора.

При инжекции электронного пучка в область анодного блока его пространственный заряд создает вместе с внешним магнитным полем скрещенные поля, обеспечивающие синхронизм азимутального дрейфа электронов с высокочастотным полем. Условие синхронизма для π - вида колебаний в этом случае имеет вид: $\frac{mc^2}{eV} \cdot \frac{\gamma - \gamma_B}{d_3} \approx \frac{4\pi R}{\lambda N}$, где γ - полная энергия, γ_B - кинетическая энергия электронов, d_3 - величина межэлектродного зазора, B - индукция магнитного поля, λ - длина волны генерируемых колебаний. Механизм взаимодействия электронов с СВЧ полями анодного блока остается таким же, как и в

магнетроне с катодом в пространстве взаимодействия. В случае высокоэнергетического состояния пучка минимальное значение его кинетической энергии $\gamma_{Bmin} = \gamma^{1/3}$, и поэтому предельно возможный к.п.д. без учета энергии циклотронного вращения ограничен величиной: $\eta = 1 - \frac{\gamma_B - 1}{\gamma - 1} = \frac{\gamma - \gamma^{1/3}}{\gamma - 1}$. Высокоэнергетическое состояние позволяет избежать осаждения электронов на поверхность электродинамической системы, присущего взаимодействию М-типа, если выбрать длину системы такой, чтобы время пролета электронов вдоль нее было больше времени их дрейфа к поверхности: $L \leq V_z \int_r^R \frac{dr}{V_r}$, где V_z -, V_r - продольная и радиальная скорости электронов.

Состояние с виртуальным катодом (ВК) характеризуется минимальной кинетической энергией $\gamma_B = 1$, и максимально возможный электронный к.п.д. стремится к к.п.д. релятивистского магнетрона с катодом в пространстве взаимодействия.

В § 4.2 описана экспериментальная схема и проведен анализ результатов экспериментов, выполненных на СЭУ Тонус-1 с параметрами электронного пучка $U \sim 0,6-1,2$ МВ, ток $I \sim 10-50$ кА, длительностью ~ 60 нс. Собственное электрическое поле пучка варьировалось в процессе экспериментов изменением диаметров катода, анода, трубы дрейфа, а также установкой на входе пространства взаимодействия различных диафрагм. Максимальная мощность импульса СВЧ излучения составила $P \sim 1,3 \cdot 10^9$ Вт при формировании СРЭП с виртуальным катодом и $P \sim 5 \cdot 10^7$ Вт при высокоэнергетическом состоянии СРЭП. Зафиксирован узкий частотный спектр генерируемого СВЧ импульса ($\sim 40-50$ МГц) и зависимость его несущей частоты от величины катод-анодного напряжения. Исследовано влияние на выходные параметры прибора положения виртуального катода в пространстве взаимодействия, что осуществлялось фиксацией потенциала СРЭП на входе замедляющей системы с использованием диафрагмы. Показано, что существенное влияние на величину генерируемой прибором СВЧ мощности оказывает тип резонаторной системы, а именно, аксиальное распределение высокочастотного поля. Пространственное совпадение максимума этого распределения с положением виртуального катода обеспечивает высокий уровень генерируемой СВЧ мощности. Ограничение величины тока утечки из пространства взаимодействия (торцевого тока) использованием трубы дрейфа большого диаметра вызывает рост к.п.д. прибора. Увеличение эффективности прибора наблюдается также с повышением мощности инжектируемого СРЭП. Наличие дестабилизирующих факторов (отбор тока на анодный

блок при генерации СВЧ излучения, наличие высокочастотных полей, расширение диаметра СРЭП за время действия импульса напряжения) не приводит к исчезновению виртуального катода. Проведение спектральных измерений СВЧ излучения РМВИ и сравнение с зависимостью, представленной на рис.1, при соответствующих значениях катод-анодного напряжения подтвердило формирование в пространстве взаимодействия виртуального катода.

В § 4.3 рассмотрены вопросы формирования СРЭП микросекундной длительности с виртуальным катодом в дополнительном диоде РМВИ. Показано, что при расстоянии катод - плоскость инжекции менее 150 мм наблюдается снижение длительности импульса напряжения, связанное с попаданием электронов в катод-анодный промежуток и ростом анодного тока. Рост тока в 3 раза подтверждается регистрацией рентгеновского излучения датчиками, расположенными на наружной поверхности анода, и непосредственными измерениями шунтом. Предложены методы повышения длительности за счет уменьшения потока отраженных электронов в область катод-анодного зазора увеличением расстояния катод – виртуальный катод или использованием диафрагм, устанавливаемых в плоскости инжекции СРЭП и перехватывающих поток отраженных электронов. Предложена конструкция дополнительного диода для РМВИ микросекундной длительности.

В § 4.4 приведены результаты экспериментальных исследований магнетрона с внешней инжекцией микросекундного СРЭП. Показано, что из-за расширения диаметра электронного пучка в течение импульса напряжения увеличиваются значения предельных электронных токов транспортировки в анодном блоке и трубе дрейфа, что снижает к.п.д. Кроме того, оказалось невозможным применение диафрагм вследствие образования плазмы и ее попадания в пространство взаимодействия.

Рассмотрена возможность увеличения выходных параметров прибора за счет повышения мощности СРЭП. Превышение инжектируемого тока над предельным током транспортировки в трубе дрейфа обеспечивает в пространстве взаимодействия накопление большего пространственного заряда. Осциллограммы огибающих СВЧ импульсов при трех значениях зарядного напряжения показали увеличение эффективности работы прибора с ростом мощности инжектируемого СРЭП при сохранении длительности СВЧ колебаний. Достигнутые максимальные параметры релятивистского магнетрона с внешней инжекцией СРЭП составили: мощность СВЧ импульса ~200 МВт, длительность ~0,45 мкс, к.п.д. ~9 %. Сравнение результатов калориметрических измерений энергии СВЧ импульсов РМВИ и РМГ с катодом в пространстве взаимодействия, выполненные при равных значениях

зарядного напряжения ГИН, свидетельствуют о перспективности РМВИ для получения СВЧ импульсов увеличенного энергосодержания. На основе проведенных исследований предложены усовершенствованные модификации РМВИ, защищенные патентами на изобретение.

В Главе 5 диссертации представлены исследования по разработке, расчету, конструированию, испытанию отдельных узлов и установки в целом для генерации СВЧ излучения с высокой частотой следования импульсов. В §5.1 приведены результаты исследований релятивистских магнетронных генераторов в импульсно-периодическом режиме при использовании ЛИУ с МР. В эксперименте, выполненном на установке (рис.6), магнитное поле формировалось двумя катушками, образующими пару Гельмгольца. Схема

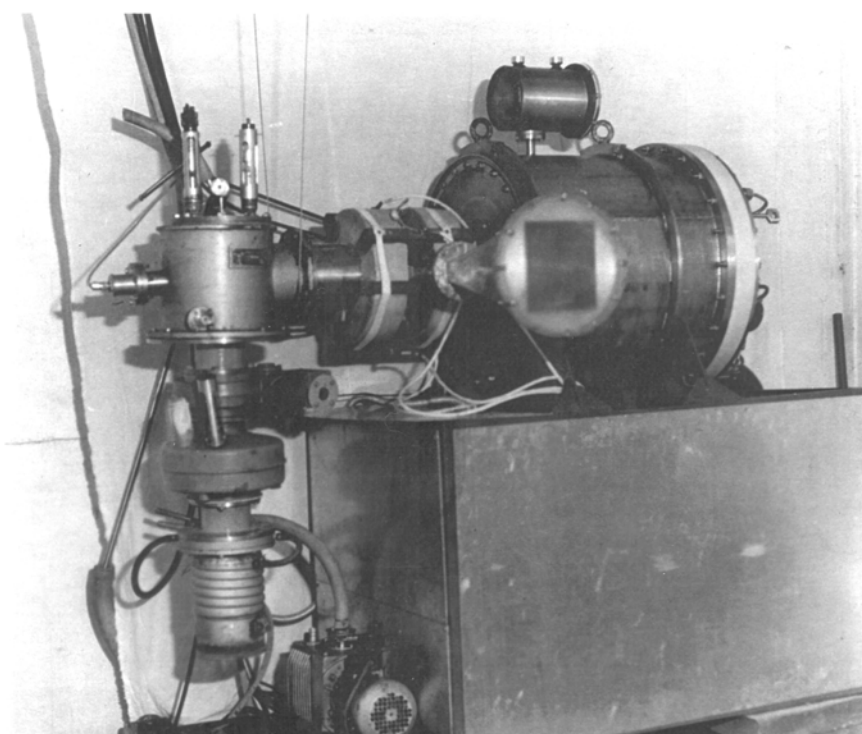


Рис.6. Внешний вид импульсно-периодического релятивистского магнетронного генератора с источником питания - ЛИУ с МР.

питания магнитной системы работала в режиме однократных импульсов, однако, большая длительность импульса тока ~ 100 мс позволяла реализовать пакет из трех 80-наносекундных импульсов напряжения магнетрона с частотой следования 160 Гц при практически постоянной величине магнитного поля. Отмечена хорошая повторяемость

амплитуды и формы импульсов тока и СВЧ сигналов. Импульсная мощность РМГ составила ~ 360 МВт.

Далее в параграфе описан импульсно-периодический релятивистский магнетрон на основе ЛИУ с МР и представлена совмещенная схема питания ускорителя и магнитной системы. Ее особенность в том, что для заряда первичного накопителя ЛИУ используется энергия, запасенная в индуктивности катушек магнитной системы. Такая схема минимизирует общие затраты электроэнергии и позволяет работать магнетрону в непрерывном режиме с частотой следования до 20 Гц и выходной мощностью ~ 200 МВт.

Данный комплекс размещался на подвижной платформе с питанием от автономного источника.

В §5.2 на основе анализа экспериментальных данных, полученных при испытаниях РМГ и ЛИУ с многоканальными разрядниками, обоснована необходимость конструктивных отличий элементов установки на основе ЛИУ на МЭ. В первую очередь они связаны с использованием магнитных систем на постоянном токе, применением мощных систем вакуумной откачки, использованием водоохлаждаемых анодных блоков.

Приведены результаты тепловых расчетов магнитных систем, выполненных по традиционной технологии из сплошной медной шинки. Показано, что такие системы даже с введением каналов охлаждения не позволяют магниту функционировать в течение длительных интервалов времени. Для импульсно-периодического релятивистского магнетрона была изготовлена магнитная система, запитываемая от источника постоянного тока (500 А). Использовалась медная шинка с внутренним отверстием для протекания охлаждающей воды. Магнитная система создает магнитное поле индукцией до 0,55 Т при аксиальной неоднородности в пространстве взаимодействия РМГ менее 5% и временными пульсациями тока менее 0,1%.

Проведен расчет и приведена конструкция вакуумной системы. Показано, что при работе РМГ с частотой следования выше 80 Гц необходимо производить откачку прибора со стороны вакуумной камеры и трубы дрейфа, а также использовать дополнительный вакуумный тракт, откачивающий пространство взаимодействия через щель связи в резонаторе анодного блока, плавный волноводный переход и антенну.

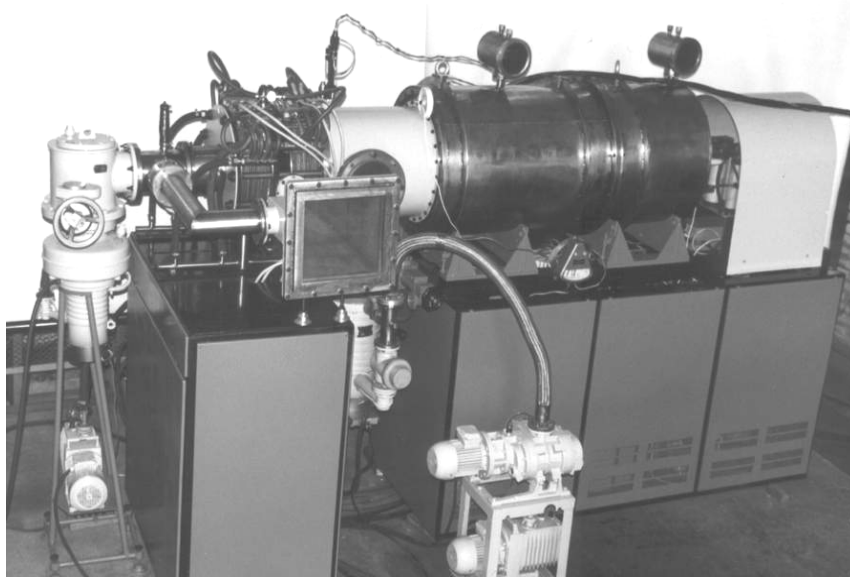
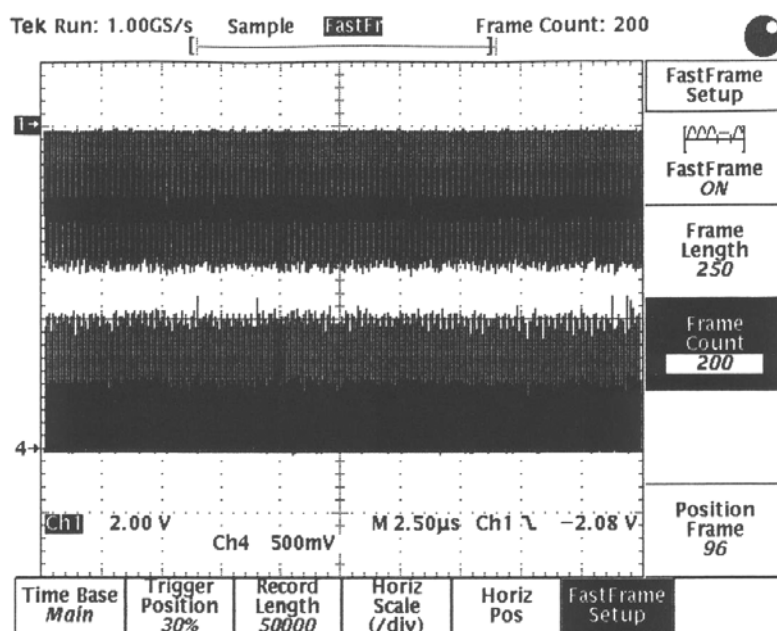


Рис.7. Внешний вид импульсно-периодического релятивистского магнетронного генератора с источником питания – ЛИУ на магнитных элементах.

Описан релятивистский магнетрон, адаптированный к импульсно-периодическому режиму работы: анодный блок имеет водяное охлаждение, скругленные углы ламелей анодного блока для снижения напряженности электрических полей с целью увеличения долговечности. Катод выполнен из графита, что

обеспечивает малое время возбуждения взрывной электронной эмиссии и возможность работы при высоких температурах.

В параграфе 5.3 представлены результаты экспериментальных исследований релятивистских магнетронных генераторов при питании от ЛИУ на МЭ (рис.7). Для повышения стабильности выходной мощности и частоты СВЧ генерации разработана схема зарядки первичного накопителя ЛИУ со стабилизацией напряжения. С использованием



**Рис.8. Серия из 200 импульсов с частотой следования 80 Гц.
Верхние осциллограммы - полный ток ЛИУ,
нижние осциллограммы – сигналы СВЧ детектора.**

описанных выше элементов установки достигнута высокая стабильность выходных импульсов (нестабильность амплитуды импульсов тока не превышала 5%, а нестability генерируемой СВЧ мощности релятивистского магнетрона была не более 12% при работе с частотой следования 80 Гц (рис.8)).

Выходные параметры 6- и 8-резонаторных РМГ при использовании ЛИУ на МЭ приведены в таблице 4.

Таблица. 4.

Параметры импульсно-периодических релятивистских магнетронов	На базе ЛИУ04/4000	На базе ЛИУ 04/6
Мощность излучения, МВт	200 (N=6)	300 (N=6) 350 (N=8)
Частота излучения, МГц	2840	2840 (N=6) 3030 (N=8)
Полоса излучения на уровне 3 дБ, МГц	40-50	50 (N=6) 60 (N=8)
Напряжение ЛИУ, кВ	300	400
Ток ЛИУ, кА	2,6	3,6
Длительность импульса тока, нс	160	170
Длительность импульса СВЧ излучения, нс	120	110
Частота следования импульсов, Гц	0,4-320	0,4-200
Средняя мощность СВЧ излучения при максимальной частоте следования импульсов, кВт	3	4,1

Экспериментальные результаты сравнивались с расчетами по аналитическим формулам, полученным в §1.1, а также с данными компьютерного моделирования (§2.3). Показано хорошее соответствие результатов, подтверждающее правомерность использованных при выводе формул допущений, адекватность компьютерной модели релятивистского магнетрона протекающим физическим процессам.

В параграфе 5.4 рассмотрены возможности РМГ для расширения сферы их применения.

Первая часть параграфа описывает исследования по резонансной компрессии СВЧ импульсов на выходе релятивистского магнетрона. Пиковая мощность излучения может быть увеличена в K раз в соответствии с соотношением $K = \eta t_1/t_2$, где η - к.п.д. устройства компрессии, t_1 - и t_2 - длительности импульсов на входе и выходе компрессора, соответственно. Вместе с тем, возможность работы компрессора в связке с релятивистским магнетроном была не очевидна, поскольку реальные СВЧ импульсы имеют амплитудную модуляцию и частотную нестабильность (в сравнении с классическими приборами), которая может выходить за пределы рабочей полосы частот резонатора компрессора.

В экспериментах релятивистский магнетрон имел мощность излучения до 180 МВт при длительности импульсов ~ 120 нс и частоте повторения 10 Гц. Устройство компрессии было создано из волноводов сечением 72×34 мм² и представляло собой двойной волноводный тройник с симметричными короткозамкнутыми боковыми плечами. Установлено, что длительность процесса накопления энергии в резонаторе зависит от длины входного волноводного тракта между магнетроном и компрессором. Эксперимент показал, что при питании компрессора от релятивистского магнетрона, как и от обычного классического магнетрона, требуется организовывать между ними определенную связь и уменьшать отраженную волну от резонатора в начальный период его возбуждения для затягивания частоты генератора высокочастотным накопительным резонатором. При использовании волноводной вставки соответствующих размеров или ферритового вентиля выходная мощность СВЧ компрессора составляла 1100 МВт при длительности 5 нс. Таким образом, впервые экспериментально продемонстрирована возможность работы релятивистского магнетронного генератора на резонансную нагрузку - СВЧ компрессор.

Вторая часть §5.4 посвящена вопросам формирования потоков СВЧ излучения высокой плотности. В диссертационной работе представлен экспериментальный образец источника направленного СВЧ излучения на основе РМГ. Вывод мощности из магнетрона организован из двух противоположных резонаторов, связанных между собой внешним

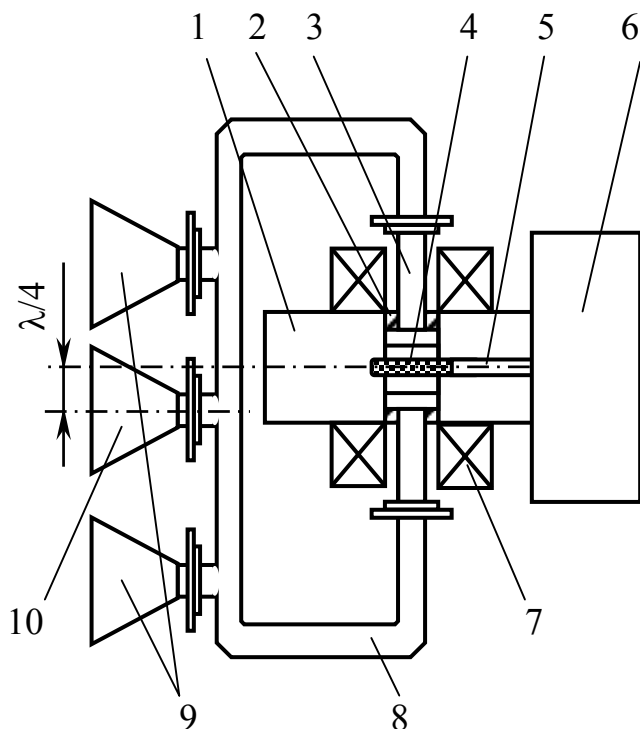


Рис.9. Релятивистский магнетронный генератор с внешним каналом связи.
 1- труба дрейфа, 2- анодный блок, 3- вывод мощности, 4- катод, 5- катододержатель, 6- ЛИУ, 7- магнитная система, 8- канал связи, 9- излучающие антенны, 10- центральная нагрузка.

каналом связи. Вывод мощности из канала связи осуществлялся либо через 3-децибельный Н-тройник с подключенной к нему пирамидальной антенной, либо с использованием системы излучателей (рис.9). В последнем случае возбуждение излучателей организуется в необходимой фазе. Экспериментально показано повышение на ~20% амплитудных и энергетических характеристик СВЧ импульсов и сужение полосы генерируемых частот в 1,5-1,7 раза для рабочего вида колебаний по сравнению с аналогичным релятивистским магнетроном без внешнего канала связи. Зафиксировано расширение области синхронных магнитных полей, для которых

устойчиво возбуждается рабочий вид колебаний.

В целом, выполненные исследования демонстрируют возможность построения источников направленного электромагнитного излучения при использовании внешнего канала связи с системой излучателей, а также позволяют применять РМГ с увеличенным числом резонаторов анодного блока, обладающих повышенным к.п.д.

В Приложении дано преобразование релятивистских уравнений движения электронов в пространстве взаимодействия РМГ плоской геометрии к виду, соответствующему уравнениям движения для нерелятивистского магнетрона. Поскольку решения подобных уравнений движения известны, проводя соответствующие нормировки для координаты (γ_Φ) и высокочастотного потенциала (γ_Φ^3), можно получить формулы, описывающие процессы в РМГ плоской геометрии.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации, которые сводятся к следующему:

■ Развита теоретическая модель магнетрона цилиндрической геометрии без учета полей пространственного заряда для релятивистского диапазона напряжений. Показано, что в РМГ действие на электроны статических электрического и магнитного полей ослаблено в γ_Φ раз, а высокочастотного электрического поля ослаблено в γ_Φ^3 раз. (Аналогичный результат получен и для релятивистского магнетрона плоской геометрии. Причем, для плоского магнетрона уравнения движения имеют вид, соответствующий нерелятивистскому случаю, если использовать соответствующую нормировку для координаты и высокочастотного потенциала). Получены формулы для радиальной и угловой скорости электронов в пространстве взаимодействия. Найдено уравнение для траектории электронов. Построены траектории движения электронов в пространстве взаимодействия прибора при различных фазах вылета с поверхности катода и в зависимости от соотношения между напряженностями статического и высокочастотного электрических полей. Получены соотношения, позволяющие рассчитать выходные параметры прибора и оценить потребляемый ток. Выведено соотношение для расчета предельного значения дополнительного ускорения, вызванного пространственным зарядом, при котором сохраняется СВЧ генерация и величины предельного тока релятивистского магнетрона. Показано, что с увеличением напряжения угол фазового рассогласования Θ_1 уменьшается и частота генерации РМГ приближается к частоте резонаторной системы без пространственного заряда.

■ Исследован тепловой режим анодного блока релятивистского магнетрона. Определены предельные плотности мощности электронного пучка в зависимости от длительности импульса напряжения, не приводящие к разрушению поверхности анодного блока под действием теплового удара. Предложены критерии выбора материала анодного блока для одиночного и импульсно-периодического режимов работы РМГ.

■ Исследовано влияние на амплитудные и частотные характеристики СВЧ излучения размеров элементов релятивистского магнетрона и параметров ускорителя.

Предложен и экспериментально апробирован способ механической перестройки частоты излучения релятивистского магнетрона в пределах 8% без заметного уменьшения генерируемой мощности.

■ Для повышения средней мощности СВЧ излучения релятивистского магнетрона за счет частоты повторения импульсов разработаны линейные индукционные ускорители на

магнитных элементах, отличающиеся компактностью за счет: оригинальной компоновочной схемы; применения эффекта перекрытия фаз; использования разбаланса емкости конденсатора последнего звена сжатия МИГ и емкости формирующей линии. Схема питания ускорителя со стабилизацией напряжения первичного накопителя позволяет формировать импульсы выходного напряжения ЛИУ с высокой воспроизводимостью амплитуды и формы (нестабильность менее 5%). Важным достоинством ЛИУ является возможность инвертирования полярности выходного напряжения и тока. Показано, что такие источники питания наиболее эффективны для реализации импульсно-периодического режима работы РМГ.

Разработана компьютерная модель для расчета выходных параметров линейных индукционных ускорителей и сильноточных электронных ускорителей при работе на различные нагрузки: линейное сопротивление, электронный диод, релятивистский магнетрон.

■ Исследован механизм пробоя межэлектродного промежутка обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией. Экспериментально показано определяющее влияние на длительность импульса напряжения в ОКДМИ величины напряженности электрического поля на аноде и адсорбционных свойств материала анода. При равных величинах напряженности электрического поля на центральном электроде длительность магнитной изоляции в ОКДМИ в 2-4 раза выше, чем в прямом диоде. Зафиксировано отсутствие влияния величины снимаемого с катода тока на t_k . Проведенные спектроскопические измерения позволили определить параметры диодной плазмы (N_e , T_e) и ее состав (протоны, ионы материала катода и анода). На основе экспериментов и опубликованных работ предложена модель пробоя ОКДМИ. Модель описывает процесс протекания анодного тока поперек изолирующего магнитного поля при развитии диокотронной неустойчивости электронного облака на катоде, которая вызывает образование анодной плазмы. В анодном плазменном слое развивается центробежная неустойчивость, приводящая к радиальному дрейфу плазмы к катоду. Выполненный расчет времени магнитной изоляции ОКДМИ, составляющий сумму двух интервалов времени: образования однородного анодного плазменного слоя и развития в нем центробежной неустойчивости, хорошо согласуется с экспериментальными данными и описывает поведение зависимости $t_k(B)$, имеющей характерный максимум.

■ Экспериментально показано, что обращенные магнетронные системы могут быть использованы для получения мощных СВЧ импульсов микросекундной длительности. Рассчитаны, сконструированы и изготовлены 8-, 10- и 12-резонаторные обращенные релятивистские магнетроны 10-см диапазона длин волн. Проведены «холодные» измерения резонаторных систем и разработаны устройства вывода СВЧ излучения по оси прибора на волне E_{01} и H_{01} . В результате экспериментальных исследований на ускорительном комплексе «ЛУЧ» получены СВЧ импульсы мощностью до 200 МВт длительностью ~ 1 мкс и 350 МВт длительностью $\sim 0,7$ мкс.

Существенное влияние на уровень генерируемой мощности ОРМ оказывает величина тока, уходящего из пространства взаимодействия, поэтому ограничение предельного тока транспортировки в области анододержателя ведет к росту эффективности ОРМ. Зависимость мощности СВЧ колебаний от мощности электронного пучка имеет линейно-нарастающий характер. В области синхронных магнитных полей наблюдается увеличение токоотбора на поверхность анодного блока, что свидетельствует о больших напряженностях СВЧ полей. Используя формулы теоретической модели, сделано заключение, что уровень мощности обращенных релятивистских магнетронов может быть увеличен при оптимизации устройств вывода СВЧ излучения.

Обнаружена обратная зависимость длительности генерируемого СВЧ импульса ОРМ от его мощности, поскольку увеличивается анодный ток на поверхность резонаторной системы за счет развития мощных СВЧ полей. Вследствие этого уменьшается интервал времени образования анодного плазменного слоя, соответственно снижаются длительности как импульса напряжения, так и СВЧ излучения. Длительность СВЧ импульса в обращенном магнетроне близка к длительности импульса напряжения, хотя импульс по форме неоднороден, что вызвано образованием анодной плазмы на ламелях анодного блока. Увеличение длительности СВЧ импульса ОРМ в сравнении с релятивистским магнетроном прямой геометрии может быть объяснено стабильным положением внешней границы катодной плазмы, и в течение интервала времени, определяемого вакуумными условиями и материалом анода, отсутствием анодной плазмы.

В 3-см диапазоне длин волн сконструирован, рассчитан и исследован на малом уровне мощности 48-резонаторный обращенный коаксиальный магнетрон. Для подавления «паразитных» видов колебаний замедляющей системы использованы кольцевые графитовые поглотители, устанавливаемые на торцах анодного блока и перекрывающие

концы щелей связи со стабилизирующим резонатором. Для возбуждения в выходном волноводе «чистой» волны H_{01} применен фильтр типов волн.

В режиме генерации СВЧ излучения получены значения импульсной мощности 100 МВт длительностью $\sim 0,7$ мкс. Отмечено, что ограничения длительности импульса СВЧ излучения в обращенном коаксиальном релятивистском магнетроне вызваны большим временем установления колебаний.

Выполнены численные и аналитические оценки величины инжектируемого тока СРЭП в ОКДМИ, проведено сравнение с данными экспериментальных измерений и показано их хорошее соответствие.

■ Показано, что сокращение длительности импульса напряжения в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией при формировании СРЭП с виртуальным катодом определяется наличием потока электронов, отраженных от виртуального катода. Длительность импульса тока пучка может быть увеличена при использовании диафрагм, устанавливаемых в плоскости инжекции СРЭП, или увеличением расстояния катод - виртуальный катод.

Показана перспективность использования релятивистских магнетронов с внешней инжекцией СРЭП для генерации СВЧ излучения субмикросекундной длительности. Получены импульсы СВЧ излучения мощностью 200 МВт, длительностью $\sim 0,45$ мкс. Эффективная генерация СВЧ излучения происходит с использованием стационарного состояния СРЭП с виртуальным катодом, потенциал которого совпадает по величине с потенциалом катода электронной пушки. Зафиксировано значительное влияние на величину генерируемой СВЧ мощности типа резонаторной системы (аксиального распределения высокочастотного поля в ней). Пространственное совпадение максимума этого распределения с положением виртуального катода обеспечивает высокие выходные параметры генератора. Причем местоположение виртуального катода может изменяться фиксацией потенциала пучка на входе в резонаторную систему. Также, как и в релятивистском магнетроне, уменьшение величины торцевого тока при использовании трубы дрейфа большого диаметра приводит к росту выходных параметров генератора. С ростом мощности инжектируемого в пространство взаимодействия электронного пучка наблюдается увеличение к.п.д. работы прибора.

Показано, что такие приборы могут быть эффективно использованы с источниками питания высокой импульсной мощности, поскольку позволяют увеличивать ресурс анодных блоков РМГ.

■ Впервые экспериментально продемонстрирована возможность работы релятивистского магнетронного генератора с высокой частотой следования импульсов – пакет из 3 импульсов мощностью 360 МВт с частотой следования 160 Гц при питании от модуля ЛИУ с многоканальным разрядником.

Впервые разработан и изготовлен мобильный вариант импульсно-периодического релятивистского магнетронного генератора с выходной мощностью излучения 200 МВт и частотой следования импульсов в непрерывном режиме 20 Гц.

Разработаны и изготовлены импульсно-периодические релятивистские магнетроны на основе ЛИУ на магнитных элементах и реализованы следующие режимы работы.

Режим работы	Параметры импульсно- периодических релятивистских магнетронов		
	Мощность, МВт	Частота следования импульсов, Гц	Число импульсов в серии
Непрерывный	300-350	0,4-8	не ограничено
Импульсно-периодический	300-350	12-80	10^5
Пакетный	200	120-320	10^3 - 10^4
	300	120-200	

■ Впервые экспериментально показана возможность работы релятивистского магнетрона на резонансную нагрузку типа СВЧ компрессор, что позволяет увеличивать выходную мощность установки от 180 МВт на выходе РМГ до 1100 МВт на выходе компрессора при частоте следования импульсов 10 Гц.

■ Предложены и экспериментально исследованы релятивистские магнетроны при внешней взаимной связи его резонаторов. Показано, что взаимодействие колебаний в условиях модовой конкуренции значительно повышает стабильность рабочего π - вида колебаний, улучшает энергетические и спектральные характеристики излучения.

■ Продемонстрирована принципиальная возможность создания антенных решеток на основе релятивистского магнетрона с внешним каналом связи между резонаторами анодного блока.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Черногалова Л.Ф., Штейн Ю.Г. Экспериментальные исследования разнорезонаторного сильноточного магнетрона.// Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 8, с. 482-485.
2. Didenko A.N., Fomenko G.P., Fourman E.G., Lukonin E.I., Sulakshin A.S., Vasil'ev V.V., Vintizenko I.I. Pulse-periodic relativistic magnetron.// Abstr. 7 Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988, p. 331.
3. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. Генерация СВЧ излучения микросекундной длительности в обращенном релятивистском магнетроне.// Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 10, с. 620-623.
4. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С. О выводе СВЧ излучения из обращенного магнетрона на волне E_{01} .// Рук. деп. в ВИНТИ, 1987, № 5983-1987, 21 с.
5. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Черногалова Л.Ф. Обращенный коаксиальный магнетрон 3-см диапазона длин волн.// Тез. докл. 7 Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988, ч.1, с. 197-199.
6. Chernogalova L.F., Sulakshin A.S., Vintizenko I.I. Generation of RF pulses by inverted relativistic magnetron.// Abstr. 7 Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988, p. 329.
7. Винтизенко И.И., Ковалев Н.Ф., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Фукс М.И. Преобразование в высокочастотное излучение энергии собственных квазистатических полей сильноточных релятивистских электронных пучков.// В сб. Релятивистская высокочастотная электроника. ИПФ АН СССР. Горький, 1988, вып. 5, с. 125-140.
8. Chernogalova L.F., Fomenko G.P., Fuks M.I., Vintizenko I.I. Experimental investigations of the magnetically insulated diodes and microwave generation in the relativistic magnetrons.// In Proc. 6 Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe, 1986, p. 573-576.
9. Васильев В.В., Винтизенко И.И., Диденко А.Н., Луконин Е.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. Релятивистский магнетрон, работающий в режиме цуга импульсов.// Письма в ЖТФ. 1987, т. 13, № 12, с. 762-766.
10. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. и др. Импульсно-периодический релятивистский магнетрон.// Письма в ЖТФ, 2000, т. 25, № 13, с. 66-71.
11. Винтизенко И.И. О возможности механической перестройки частоты излучения релятивистского магнетрона.// Письма в ЖТФ, 2000, т. 26, № 17, с. 67-70.
12. Винтизенко И.И. Магнетрон. Свидетельство на полезную модель № 13937.// Оpubл. БИ, 2000, № 16.

13. Винтизенко И.И., Фурман Э.Г. Линейные индукционные ускорители.// Известия ВУЗов. Физика, 1998, № 4, Приложение, с 111-119.
14. Фоменко Г.П., Сулакшин А.С., Филипенко Н.М., Винтизенко И.И. Исследования релятивистских СВЧ генераторов О- и М-типа.// Известия ВУЗов. Физика. 1998, №4, Приложение, с. 146-157.
15. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. Измерение параметров СВЧ импульсов, генерируемых релятивистским магнетроном.// Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 22, с. 1384-1388.
16. Vintzenko I.I. Relativistic magnetron with mechanical tuning of radiation frequency.// In Proc. 2 IEEE Int. Vacuum Electronics Conference IVEC, 2001, Noordwijk, p. 49-53.
17. Винтизенко И.И. Релятивистский магнетрон. Свидетельство на полезную модель № 13036.// Оpubл. БИ, 2000, № 16.
18. Диденко А.Н., Арзин А.П., Винтизенко И.И. и др. Ускорительный комплекс «ЛУЧ».// Тез. докл. 6 Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1986, ч. 2, с. 197-198.
19. Диденко А.Н., Арзин А.П., Винтизенко И.И. и др. Ускорительный комплекс «ЛУЧ».// Информ. листок Томского ЦНТИ, 1987, № 2, 2 с.
20. Fourman E.G., Vintzenko I.I. Linear induction accelerators for relativistic microwave oscillators.// In Proc. 12 Int. Conf. on High Power Particle Beams. 1998, Israel, Tel-Aviv, p. 107.
21. Винтизенко И.И. Линейный индукционный ускоритель. Патент на изобретение № 2178244.// Оpubл. БИ 2002, №1.
22. Vintzenko I.I., Fourman E.G., Gusel'nikov V.I. Mashchenko A.I., Mityushkina V.Yu. Repetitive linear induction accelerators for high-current microwave devices.// In Proc. 12 Int. Symposium on high current electronics. Russia, Tomsk, 2000, vol. 2, p. 255-258.
23. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Машченко А.И., Митюшкина В.Ю., Фурман Э.Г. Частотный линейный индукционный ускоритель ЛИУ 04/4000.// ПТЭ, 2000, № 3, с. 159-160.
24. Винтизенко И.И. Линейный индукционный ускоритель. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2000131818/06(033623) от 08.02.2002.
25. Винтизенко И.И., Красик Я.Е., Сулакшин А.С., Цветков В.И. Исследования времени переключения обращенного коаксиального диода.// Тез. докл. Всес. конф. «Мощные генераторы и усилители на РЭП». Москва, 1984, с. 121.

26. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Цветков В.И. О работе обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией.// Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 8, с. 449-453.
27. Винтизенко И.И., Исаков П.Я., Сулакшин А.С., Цветков В.И. Исследование обращенного диода с магнитной изоляцией.// Тез. докл. 6 Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1986, ч. 2, с. 9-11.
28. Винтизенко И.И., Исаков П.Я., Сулакшин А.С., Цветков В.И., Шлапаковский А.С. Формирование СРЭП в обращенном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией.// ЖТФ, 1988, т. 58, № 6, с. 1171-1173.
29. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Цветков В.И. К вопросу о механизме пробоя обращенного коаксиального диода с магнитной изоляцией.// ЖТФ, 1988, т. 58, № 8, с. 1584-1586.
30. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С. Пробой межэлектродного промежутка и формирование сильноточного электронного пучка в обращенном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией.// Рук. деп. в ВИНТИ № 5492-B89, 1989, 71 с.
31. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Сулакшин С.С. Спектроскопические исследования параметров диодной плазмы в обращенном коаксиальном диоде с магнитной изоляцией.// Физика плазмы, 1990, т. 16, № 4, с. 504-507.
32. Vintizenko I.I., Sulakshin A.S., Tsvetkov V.I. The breakdown of cathode-anode gap and formation of high-power relativistic electron beam in the inverted coaxial diode with magnetic insulation.// In Proc. of XIII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, France, Paris, 1988, p. 464-466.
33. Винтизенко И.И., Цветков В.И. Коаксиальный диод с взрывной эмиссией.// А.С. № 1443661.
34. Винтизенко И.И. Обращенный коаксиальный диод с магнитной изоляцией.// Патент СССР № 1741572.
35. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. Обращенный коаксиальный релятивистский магнетрон 3-сантиметрового диапазона длин волн.// Радиотехника и электроника, 1990, т. 35, № 4, с. 899-901.
36. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. Влияние числа резонаторов на характеристики обращенного релятивистского магнетрона.// Радиотехника и электроника, 1990, т. 35, № 9, с. 2004-2006.
37. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С. Обращенный релятивистский магнетронный генератор.// А.С. № 1501825.

38. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С. Обращенный релятивистский магнетрон.// А.С. № 1561742.
39. Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Цветков В.И. О работе магнито-изолированного диода при формировании виртуального катода.// Тез. докл. 6 Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1986, ч. 2, с. 29-31.
40. Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Цветков В.И. О работе магнитоизолированного диода микросекундной длительности при формировании виртуального катода.// ЖТФ, 1987, т. 57, № 3, с. 605-607.
41. Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Мельников Г.В., Цветков В.И. Влияние виртуального катода на формирование электронного пучка в магнитоизолированном диоде с магнитной изоляцией.// Физика плазмы, 1988, т. 14, № 2, с. 246-248.
42. Винтизенко И.И. Сулакшин А.С. Фоменко Г.П. Релятивистский прибор М-типа.// А.С. № 1342335.
43. Винтизенко И.И. Сулакшин А.С. Фоменко Г.П. Релятивистский магнетронный генератор.// Патент СССР № 1690507.
44. Винтизенко И.И., Луконин Е.И., Фурман Э.Г. Система электропитания линейного индукционного ускорителя.// Тез. докл. 8 Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Свердловск, 1990, ч. 3, с. 133-135.
45. Бутаков Л.Д., Васильев В.В., Винтизенко И.И., Фурман Э.Г. Линейные индукционные ускорители на магнитных элементах.// ПТЭ, 2001, № 5, с. 104-110.
46. Логинов В.С., Винтизенко И.И., Дорохов А.Р., Боберъ Е.Г., Митюшкина В.Ю. К вопросу выбора рациональной конструкции системы охлаждения катушек магнетронов.// Известия ВУЗов. Электромеханика, 1999, № 4, с. 117 – 119.
47. Винтизенко И.И., Логинов В.С., Дорохов А.Р., Боберъ Е.Г., Митюшкина В.Ю. Тепловой расчет обмотки ускорителя заряженных частиц.// Сб. научных трудов НИИ компьютерных технологий «Математическое моделирование». Хабаровск, 2000, в. 10, Изд-во ХГТУ, с. 80-86.
48. Vintizenko I.I., Butakov L.D., Fomenko G.P., Fourman E.G. Repetitively pulsed relativistic magnetron.// In Proc. 12 Symposium on high current electronics. Russia, Tomsk, 2000, v. 2, p. 399-401.
49. Augustinovich V.A., Artemenko S.N., Vintizenko et al. Resonant compression of high-power microwave pulses.// In Proc. 4 Int. Workshop "Strong microwaves in plasmas". Nizny Novgorod, IAP, 1999, v. 2, p. 915-929.

50. Диденко А.Н., Винтизенко И.И., Мащенко А.И., Рябчиков А.И., Фоменко Г.П., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Резонансная компрессия СВЧ импульсов на выходе релятивистского магнетрона.// Доклады Академии Наук, 1999, т. 366, № 5, с. 619-621.
51. Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С. Влияние внешней взаимной связи резонаторов релятивистского магнетрона на стабильность колебаний. Труды 8 Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Звенигород, 2001, с. 26-27.

Список цитированной литературы:

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов.// М.: Сов. радио, 1974, 256 с.
2. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение.// М.: Атомиздат, 1977, 153 с.
3. Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Релятивистская высокочастотная электроника.// Вестник АН СССР, 1979, №4, с.11-23.
4. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности.// М.: Энергоатомиздат, 1984, 112 с.
5. Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. и др. Релятивистский магнетрон с импульсным напряжением микросекундной длительности.// Письма в ЖТФ, 1978, т.4, № 14, с. 823-826.
6. Нечаев В.Е., Сулакшин А.С., Фукс М.И., Штейн Ю.Г. Релятивистский магнетрон.// В сб. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 114-130.
7. Фурман Э.Г. Низкоимпедансные полосковые формирующие линии линейных индукционных ускорителей.// ПТЭ, 1987, № 5, с. 26-31.
8. Бугаев С.П., Ким А.А., Кошелев В.И., Хряпов П.А. О движении эмиссионной границы катодной плазмы поперек однородного магнитного поля в диодах с взрывной эмиссией.// Известия АН СССР (серия физическая), 1982, т. 45, № 7, с. 1300-1305.
9. Ковалев Н.Ф., Офицеров М.М., Фукс М.И. Прибор М-типа. А.С. № 716430.