

На правах рукописи

Шарыпов Константин Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА
ПАРАМЕТРОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ
С ПИКОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

01.04.13 - Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор технических наук
член-корреспондент РАН
Яландин Михаил Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

доктор физико-математических наук,
профессор
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт радиотехники и
электроники Российской академии наук,
г. Москва

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2013 г. в 15 час.00 мин. на заседании диссертационного совета Д 004.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Заверенные печатью учреждения отзывы просим направлять по адресу: Институт электрофизики УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Н.Н. Сюткин

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследования в области высоковольтной наносекундной импульсной техники [1] и эмиссионной электроники [2] привели к созданию сильноточных электронных ускорителей. Это стало основой развития экспериментальной релятивистской высокочастотной электроники (РВЭ) [3,4], нацеленной на преобразование энергии сильноточных релятивистских электронных пучков в импульсы СВЧ излучения с мощностями $10^8 \div 10^9$ Вт и более. Основные задачи РВЭ - это высокая эффективность генерации излучения, большая энергия импульсов и увеличение частоты их следования. Исследования по отмеченным направлениям в целом характеризуются **актуальностью**, так как мощные источники СВЧ востребованы в различных областях науки и практики. Для применений в задачах радиолокации, радиоэлектронного противодействия и испытаний надёжности аппаратуры принципиальное значение играет плотность потока мощности, энергия излучения и его направленность. Также требуется стабильность излучения от импульса к импульсу и умение управлять диаграммой направленности. Для практических СВЧ источников важны автономность прибора, его массо-габариты, ресурс и «к.п.д. от розетки».

Общепризнан факт, что начало экспериментальной релятивистской СВЧ электронике положил эксперимент [5] по генерации СВЧ излучения с помощью наносекундного релятивистского электронного пучка, где впервые был получен электронный к.п.д. по мощности («пучок-излучение») $\sim 10\%$. Исследованный прибор с черенковским механизмом

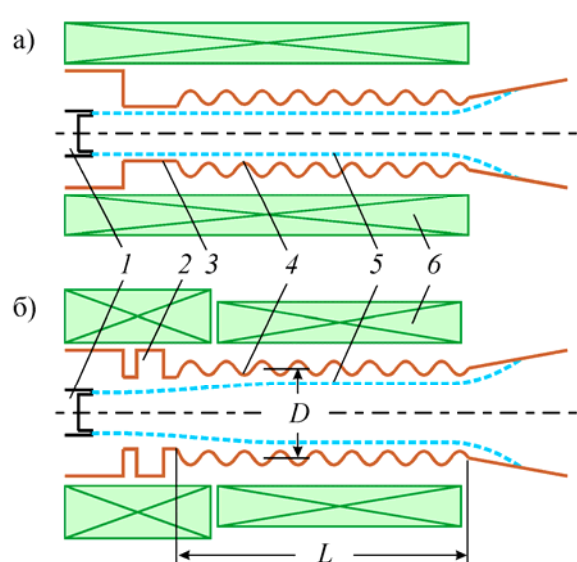


Рис.1. Релятивистские ЛОВ а) - [5] и б) - [10].
1- катод; 2- рефлектор; 3- волновод-отсечка; 4- замедляющая система; 5- пучок; 6- соленоид.

электронно-волнового взаимодействия представлял релятивистскую лампу обратной волны (ЛОВ), работавшую в квазистационарном режиме с мощностью в сотни мегаватт при рабочем токе пучка, оптимально превышающим стартовый: $I_e^{om} \approx 3I_{cm}$ [6]. Схема одномодовой релятивистской ЛОВ диапазона 3 см (рис.1,а) с диаметром поперечного сечения гофрированной замедляющей структуры (ЗС) порядка длины волны ($D \approx \lambda$) и запердельным волноводом-отражателем на катодном конце оказалась настолько удачной, что на её основе с помощью наносекундных ускорителей СИНУС [7] до

середины 1990-х был выполнен большой объём экспериментов. Были созданы специальные устройства для диагностики экспериментальных параметров [8].

Отметим ряд направлений исследований, которые продемонстрировали возможности релятивистских ЛОВ. Прежде всего, это испытание прототипа импульсного радиолокатора [9] диапазона длин волн 3 см. В контексте данной задачи были выполнены эксперименты по повышению эффективности прибора и изучению физики вакуумных диодов с взрывоэмиссионными катодами; по стабилизации амплитуды импульсов СВЧ и ускоряющего напряжения в режимах повышенной частотой повторения и анализу пробивной прочности одномодовых ЗС. Электронный к.п.д. оптимизированных наносекундных приборов достигал 25-40%, причём на гигаваттном уровне мощности это проще достигалось с помощью усовершенствованных ЗС [10] увеличенного сечения (рис.1,б). Умеренное ($D/\lambda \approx 1.5$) увеличение диаметра ЗС и применение предмодуляции пучка резонансным рефлектором [11] позволило одновременно обеспечить селективность возбуждения волны TM_{01} и снизить рабочее магнитное поле для транспортировки электронного пучка ЛОВ [12]. Последний факт очень важен, так как стало возможно обойтись «тёплыми» соленоидами постоянного тока и провести продолжительные ресурсные испытания всех систем СВЧ прибора [13].

При освоении с помощью ЛОВ коротковолнового диапазона ($\lambda \leq 8$ мм) работы были связаны с миниатюризацией ЗС и с созданием специализированных компактных сильноточных ускорителей [14]. Именно в миллиметровом диапазоне волн были начаты исследования нестационарного режима генерации релятивистских сильноточных ЛОВ. По существу, при этом изучалась начальная стадия короткого переходного процесса прибора [15]. Требуемое большое превышение тока пучка (I_e) над стартовым (I_{cm}) достигалось за счёт удлинения ЗС (L), так как $I_{cm} \propto L^{-3}$. Если длительность пучка ограничена условием $\tau_n = L \cdot (v_e^{-1} + v_{gp}^{-1})$, где v_e и v_{gp} скорость электронов и групповая скорость встречной пучку волны, то при $I_e \gg I_{cm}$ формировался один субнаносекундный пик излучения со стабильной амплитудой [16]. Впоследствии было доказано, что мощность этого ультракороткого пика не ограничена мощностью «более длинного» электронного пучка. В этом случае понятие электронного к.п.д. прибора заменяется понятием конверсии мощности пучка в излучение (K). Режимы с $K > 1$ впервые получены для ЛОВ диапазона 10 ГГц (1.2 ГВт и 3 ГВт; $K \approx 1.5$ и $K \approx 1.8$, соответственно) [17].

На рубеже 2000-х в исследованиях нестационарных релятивистских ЛОВ появилось новые возможности. Во-первых, формирование коротких ускоряющих импульсов стало реально

с «твердотельной» стабильностью на килогерцовых частотах повторения [18] после открытия в ИЭФ УрО РАН SOS-эффекта (наносекундного обрыва плотных токов в полупроводниковых диодных структурах). Вторым моментом является то, что к концу 1990-х в экспериментах с сантиметровыми и миллиметровыми ЛОВ были продемонстрированы параметры, которые, как правило, соответствовали классическим теоретическим представлениям и численным расчётам [19]. Поэтому любые дальнейшие улучшения характеристик следовало доказывать измерениями повышенной точности. В значительной мере этому способствовало появление широкополосных цифровых осциллографов. Разумеется, наличие осциллографов с полосой выше 10 ГГц сделало необходимым привести в соответствие датчики регистрируемых процессов (ускоряющие импульсы; ток пучка, огибающие СВЧ мощности). Эти новые метрологические возможности открывали перспективу анализа более тонких эффектов стабилизации излучения релятивистских ЛОВ, связанных с фиксацией и воспроизводимостью фазы излучения в отсутствие входного СВЧ сигнала, навязывающего фазу, как это происходит в усилителях. Для электронных автогенераторов и, тем более, с сильноточным пучком, это была новая задача. Работы в данном направлении были призваны подтвердить уникальные характеристики релятивистских ЛОВ и их конкурентоспособность с альтернативными методами получения коротких сверхмощных электромагнитных импульсов, такими, например, как компрессия СВЧ [20].

Цель диссертационной работы состояла в том, чтобы в измерениях с пикосекундным разрешением определить характеристики исследуемых релятивистских ЛОВ диапазона миллиметровых и сантиметровых волн субгигаваттной и гигаваттной пиковой мощности с длительностью импульса ~ 1 нс короче. Решались следующие задачи:

1. Совершенствование экспериментальных методик и разработка специализированной аппаратуры, необходимых для корректных измерений параметров коротких импульсов ускоряющего напряжения, характеристик сильноточных электронных пучков и генерируемых СВЧ импульсов.
2. Демонстрация возможности и особенностей работы короткоимпульсных релятивистских ЛОВ на больших частотах повторения с высокой конверсией мощности «пучок-излучение»; получение стабильной генерации в таких режимах.
3. Исследование синхронности эмиссии сильноточных электронных пучков независимыми катодами и фазовой стабильности генерации релятивистских ЛОВ; реализация когерентного суммирования мощности излучения нескольких таких генераторов без электродинамической связи.

Научная новизна работы

При выполнении экспериментов впервые:

1. Обнаружен эффект регенерации свойств взрывозмиссионного графитового катода с ростом частоты повторения коротких ускоряющих импульсов в килогерцовом диапазоне, что может быть обусловлено недостаточным теплоотводом на интервалах между импульсами, приводящим к нарастающему разогреву областей взрывозмиссионных центров вплоть до плавления материала.
2. Определены характеристики нестационарных ЛОВ диапазона длин волн 8 мм, генерирующих субгигаваттные и гигаваттные СВЧ импульсы с конверсией мощности электронного пучка в электромагнитную волну ($0.5 \div 1.4$).
3. Измерены рекордные пиковые и средние мощности субнаносекундных импульсов излучения нестационарных ЛОВ диапазона длин волн 3 см и 8 мм на частотах повторения 1 кГц и 3.5 кГц, соответственно.
4. Продемонстрирован эффект стабилизации фазы радиоимпульса релятивистского электронного автогенератора по отношению к фронту ускоряющего импульса напряжения, многократно превышающему по длительности период СВЧ заполнения.
5. Показано, что в релятивистских ЛОВ диапазона 10 ГГц с пиковыми мощностями (0.3-3) ГВт при длительности фронта напряжения ~ 500 пс регистрируемый рост нестабильности фазы генерации по времени $\pm(10-20)$ пс связан с нестабильностью амплитуды и скорости нарастания напряжения на катоде.
6. Доказана возможность получения пикосекундной стабильности токовых фронтов двух сильноточных электронных пучков при их инжекции независимыми взрывозмиссионными катодами, питаемыми расщеплённым ускоряющим импульсом с субнаносекундным фронтом
7. Наблюдалось синфазное сложение СВЧ импульсов двух независимых релятивистских ЛОВ диапазона 8 мм при их питании расщепленным импульсом напряжения, а также при использовании двух взаимно синхронизированных высоковольтных генераторов ускоряющего напряжения.

Практическая ценность работы

1. Разработанные в ходе выполнения работы датчики импульсов СВЧ излучения, ускоряющего напряжения и тока электронного пучка, отличающиеся пикосекундными переходными характеристиками, позволяют выполнять измерения с точностью, адекватной полосе регистрации наиболее совершенных цифровых осциллографических регистраторов реального времени.

2. Показано, что взрывоэмиссионный графитовый катод восстанавливает эмиссионные свойства на высоких частотах повторения, несмотря на использование коротких ускоряющих импульсов напряжения.
3. Продemonстрировано, что компактный (настольный) СВЧ прибор – нестационарная релятивистская ЛОВ - генерирует субнаносекундные СВЧ импульсы диапазона 8 мм с гигаваттной пиковой мощностью. При мощности излучения ~ 0.5 ГВт аналогичный генератор допускает частотный режим работы (~ 10 Гц). Источники таких СВЧ импульсов нашли применение в физических экспериментах.
4. Созданные с использованием наносекундных твердотельных SOS-драйверов нестационарные ЛОВ диапазонов длин волн 8 мм и 3 см обеспечивают в секундных пакетах уникальные характеристики: пиковую мощность излучения ~ 0.3 ГВт и ~ 3 ГВт при частотах повторения до 3.5 кГц и 1 кГц, соответственно. Сочетание стабильности, высокой мощности и частоты повторения может быть ключевым фактором в локационных применениях.
5. Зарегистрирован эффект фиксации фазы высокочастотного заполнения генерируемого радиоимпульса нестационарной ЛОВ диапазона 3 см. Доказана взаимная пикосекундная стабильность токовых фронтов параллельных сильноточных электронных пучков и фаз излучения в двухканальных ЛОВ диапазона 8 мм.
6. Созданы экспериментальные установки, с помощью которых продемонстрировано когерентное сложение СВЧ импульсов 8 мм диапазона от двух независимых релятивистских ЛОВ при соотношении времени нарастания ускоряющего напряжения и периода генерируемых СВЧ колебаний ~ 10 .
7. С помощью двухканального генератора с независимыми нестационарными ЛОВ диапазона 8 мм с мощностью в каждом канале ~ 750 МВт получена плотность потока мощности суммированного излучения, эквивалентная единичному генератору с выходной мощностью ~ 3 ГВт. Для одномодовых СВЧ источников данного частотного диапазона без применения дополнительных мер по фокусировке волнового пучка подобные параметры ранее не достигались.

Использование результатов работы Разработанные диагностические датчики, исследованные высоковольтные источники наносекундных ускоряющих импульсов и генераторы мощных субнаносекундных СВЧ импульсов применялись в совместных исследованиях и экспериментах со следующими организациями:

1. Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)
2. Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск);
3. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва).

4. ФГУП «РФЯЦ» - ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск)

Вклад автора диссертационной работы состоял в адаптации методик диагностики импульсов ускоряющего напряжения, тока электронных пучков и СВЧ излучения к специфическим условиям экспериментов в субнаносекундном диапазоне длительностей; в моделировании, создании и калибровке соответствующих специализированных датчиков с пикосекундной переходной характеристикой; в проведении измерений, подтверждающих приоритетные характеристики новых источников мощных СВЧ импульсов и устройств в их составе. Автором разработаны и применены помехоустойчивые схемы питания, блоки управления и синхронизации сложного экспериментального оборудования; выполнен комплекс тестовых измерений для анализа порогов чувствительности комплексов «датчики - регистратор реального времени», возможных ошибок, вносимых неустраняемыми шумами, температурным дрейфом датчиков и другими факторами. По результатам проведенных экспериментов и численного моделирования разработаны конструкции моноблоков субгигаваттных релятивистских ЛОВ (38 ГГц) с постоянными высокоэрцитивными магнитными фокусирующими системами. Выполнялись обработка, анализ и интерпретация экспериментальных данных.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на международных конференциях: по мощным пучкам частиц (США 2002, Германия 2012); по мощной импульсной технике (США 2007, 2009, 2011; 2013); по мощным модуляторам (США 2002, 2004, 2008); по сильноточной электронике (Россия, Томск 2008, 2010).

Материалы диссертации включают 19 научных статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах; 15 докладов, изданных в сборниках трудов международных конференций. В базе данных Web of Science зарегистрировано 16 журнальных публикаций по теме диссертации. Индекс цитирования составляет 206; индекс Хирша 8.

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется независимыми методами и подходами при определении параметров исследуемых СВЧ систем, которые выбирались соответственно задачам измерений и базировались на использовании наиболее совершенных диагностических датчиков собственной разработки и регистрирующей аппаратуры.

Положения, выносимые на защиту

На основании результатов измерений, выполненных в ходе экспериментальных исследований, утверждается следующее:

1. С повышением до ~ 3 кГц частоты следования импульсов ускоряющего напряжения с фронтом ~ 200 пс и длительностью ~ 1 нс восстанавливается эмиссионная способность

графитового катода, деградирующая при предварительной продолжительной тренировке на частотах до 1 кГц в условиях выраженного эффекта полировки микрорельефа.

2. Фаза генерации релятивистской ЛОВ по отношению к фронту ускоряющего напряжения может быть стабильна от импульса к импульсу даже при значительном (до 10 раз) превышении длительности фронта тока пучка периода ВЧ заполнения.
3. При питании двух независимых взрывоэмиссионных диодов с графитовыми катодами расщепленным высоковольтным импульсом с крутизной ~ 1 МВ/нс стандартное отклонение синхронизации субнаносекундных фронтов тока сильнотоочных электронных пучков до проявления эффекта полировки не превышает 3 пс.
4. Возможно возбуждение независимых релятивистских генераторов - ЛОВ диапазона 8 мм - с сильнотоочными электронными пучками со стандартным отклонением разности фаз 0.5 пс, что обеспечивает когерентное суммирование мощности излучения двух волновых пучков.

Содержание работы

Во введении рассмотрены основные направления предыдущих экспериментов по получению мощных коротких импульсов СВЧ излучения диапазона сантиметровых и миллиметровых волн с помощью релятивистских ЛОВ. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований, и обосновывается актуальность темы диссертации. Формулируются цели работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе систематизированы специфические требования к измерительной аппаратуре, методы и подходы измерений, а также конструкции датчиков, используемых при диагностике релятивистских ЛОВ, регистрации быстропротекающих процессов и сигналов длительности $(1 \div 0.1)$ нс с пикосекундным разрешением в реальном времени.

В разделе 1.1 приведены оценки характерных параметров импульсных сигналов, типичных для экспериментов, выполнявшихся по теме диссертации. Это длительности и фронты импульсов СВЧ излучения исследуемых релятивистских ЛОВ, амплитуды ускоряющего напряжения и токи электронных пучков. С учётом требования малоискаженного воспроизведения огибающих сигналов анализируются вопросы применимости осциллографических регистраторов реального времени по совокупности параметров «аналоговая полоса регистрации – частота дискретизации» [21]. Показано, что имеющиеся в наличии осциллографы фирмы Tektronix с полосой пропускания до 15 ГГц и дискретностью отсчётов до 25 пс вполне удовлетворяли необходимым требованиям.

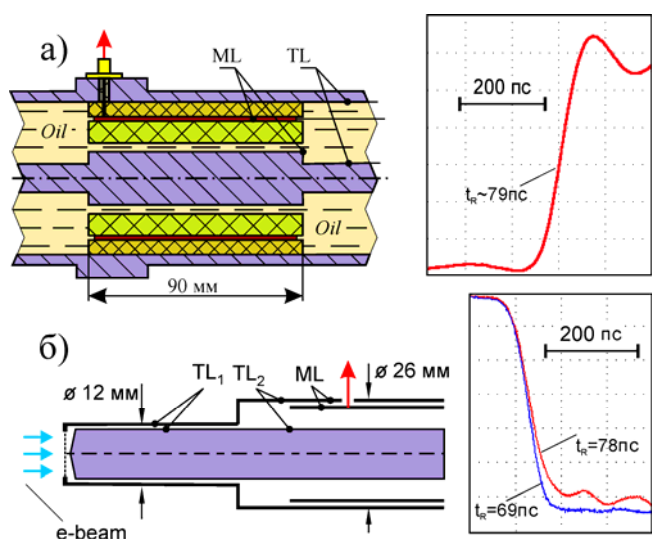


Рис.2. Конструкции делителя напряжения на связанных линиях (а) и коллекторного датчика тока килоамперного пучка (б). Показаны отклики датчиков на калибровочные сигналы напряжения с фронтом ~ 69 пс.

Разделы 1.2 и 1.3 посвящены общим вопросам метрологии импульсов ускоряющего напряжения и тока магнитоизолированных килоамперных электронных пучков с помощью емкостных делителей напряжения [1*,2*] и коллекторных датчиков пучков [3*, 4* 5*]. Приводятся методики их калибровки с разрешением не хуже десятков пикосекунд. Поясняется, почему даже при пикосекундном разрешении по времени (рис.2) с помощью независимых датчиков напряжения (рис.2, а) и тока (рис.2, б) практически невозможно получить динамическую вольтамперную характеристику (ВАХ) электронного

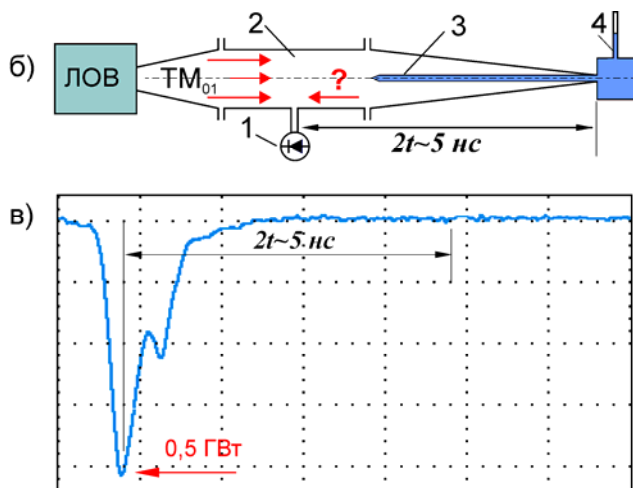
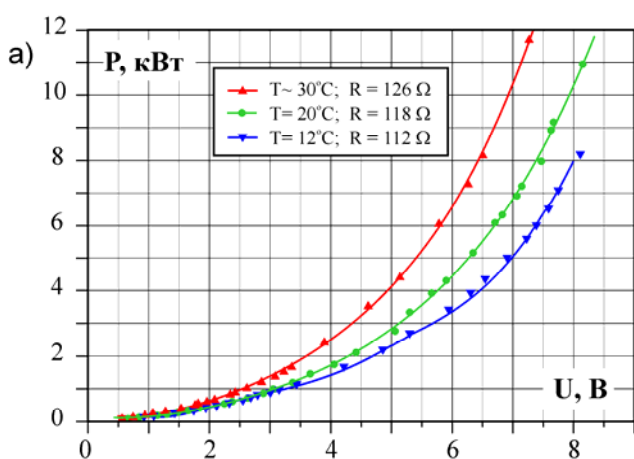


Рис.3. Вариация вольт-ваттной калибровки ДГН с изменением температуры датчика (а); Схема (б) и результат рефлектометрии жидкостного калориметра субгигаваттным СВЧ импульсом (с), показывающий отсутствие отражений излучения. 1 – ДГН; 2 – сверхразмерный волновод; 3 – поглотитель (C₂H₅OH); 4 – капиллярный измеритель уровня жидкости.

инжектора на стадии развития взрывной электронной эмиссии (ВЭЭ) на катоде. Рассмотрена рефлектометрическая методика измерений ВАХ динамической нагрузки с помощью двух емкостных датчиков напряжения с калиброванной задержкой, основанная на выделении разностного отраженного сигнала [2*]. Показано, что необходимым требованиям идентичности удовлетворяют емкостные делители на связанных коаксиальных линиях [22] с выровненными диэлектрическими постоянными изоляции (рис.2, а).

В разделе 1.4 представлены методы диагностики коротких СВЧ импульсов [6*]. Применялись «тёплые» германиевые резистивные датчики (детекторы на горячих носителях, ДГН [23]), калиброванные магнетронными генераторами. Показано, что тракт детектора с подключенным Ge-кристаллом мог передавать фронты огибающих СВЧ не хуже 150 пс. Акцентируется внимание на методике калибровки ослабления сигнальных трактов детекторов во временной области. Описаны методики измерения мощности излучения с помощью ДГН и калориметров. Приведены типичные калибровочные зависимости при различных температурах датчиков (рис.3).

Рассмотренные в первой главе методы измерений и особенности работы диагностических устройств дополнительно детализируются в последующих разделах применительно к специфике конкретных экспериментов.

Вторая глава систематизирует результаты измерений характеристик субгигаваттных и гигаваттных нестационарных релятивистских ЛОВ диапазона длин волн 8 мм. Эти генераторы

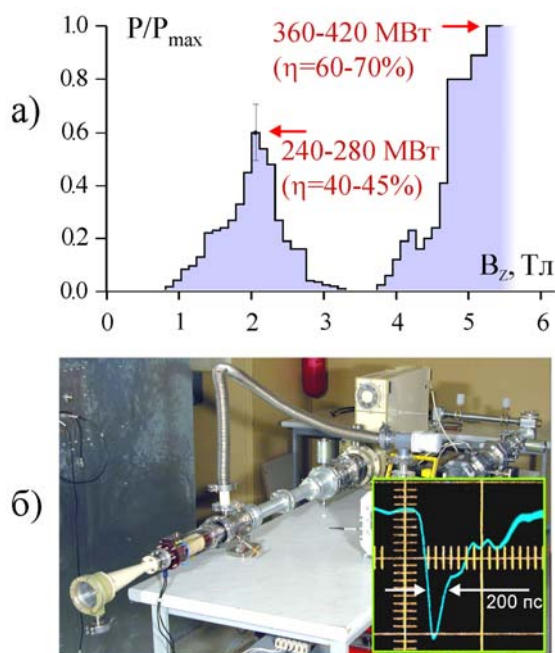


Рис.4. Зависимость мощности генерации нестационарной ЛОВ [7*] от ведущего магнитного поля (а); внешний вид гигаваттного СВЧ генератора [8*] и сигнал с детектора (б).

созданы на основе предложенной в ИСЭ СО РАН модифицированной схемы ЛОВ [10,12] с 3С увеличенного сечения $D \approx 1.4\lambda$ (рис.1,б). Уникальные характеристики коротковолновых приборов, ранее рассчитанные методом крупных частиц [19], требовали подтверждения в измерениях с пикосекундным разрешением.

Раздел 2.1 представляет результаты экспериментов [7*,8*], выполнявшихся с использованием разработанных в ИЭФ УрО РАН малогабаритных ускорителей РАДАН-303 [14]. В вакуумном диоде ускорителя формировался пучок с энергией ~ 300 кэВ, током ~ 2 кА и длительностью ~ 1 нс. В эксперименте [7*] изучена зависимость мощности генерации излучения ЛОВ от величины ведущего магнитного поля (рис.4,а). Измерения

проводились методом сканирования детектором диаграммы направленности. Поэтому была определена эффективная апертура антенны детектора. При относительно низкой индукции магнитного поля (~ 2 Тл) получена пиковая мощность 240-280 МВт. При индукции > 5 Тл мощность импульсов с длительностью 200-250 пс достигала 360-420 МВт, что в верхнем

пределе соответствует оценке конверсии мощности пучка $\sim 70\%$. В дальнейшем для получения больших значений пиковой мощности была увеличена длина ЗС нестационарной ЛОВ и применено профилирование силовой линии фокусирующего соленоида [8*]. Импульсы ускоряющего напряжения стабилизировались управляемым разрядником [24]. Для этого варианта в случае сильного магнитного поля (6.5 Тл) с помощью детектора и жидкостного калориметра был продемонстрирован режим с конверсией (1.4-1.5) при мощности излучения до 1.2 ГВт и длительности 200 пс (рис.4,б). К настоящему времени это рекордное значение для 8-мм одномодовых СВЧ генераторов. Энергетический к.п.д. «пучок - э.м. волна» составил $\sim 20\%$.

В разделе 2.2 показано, каким образом был использован опыт двух предыдущих экспериментов. Оптимизация импульсной магнитной фокусирующей системы (МФС) позволила снизить требования к величине магнитного поля и, как следствие, к источнику питания МФС, обеспечив таким образом возможность импульсно-периодического режима работы с частотой повторения до 10 Гц. Такая система (рис.5,а) позволила получать пиковые мощности субнаносекундных импульсов излучения 450-600 МВт при конверсии мощности пучка до 0.9 [9*,10*,11*]. Рабочее поле в области катода составляло 2.2 Тл. Для измерений была специально разработана детекторно-калориметрическая секция, позволяющая производить

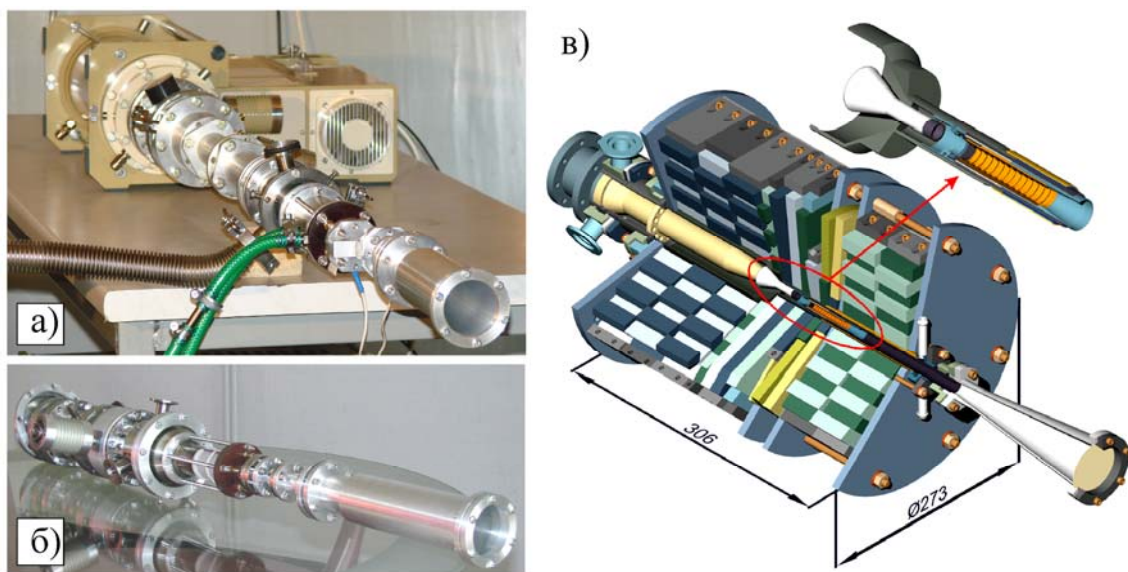


Рис.5. Импульсно-периодическая (10 Гц) нестационарная ЛОВ с импульсной мощностью до 600 МВт и конверсией до 0.9 (а); Высоковольтный блок квазистационарной ЛОВ с мощностью до 170 МВт и электронным к.п.д. $\sim 35\%$ (б); пример конструкции постоянного магнита из NdFeB (в).

одновременную регистрацию как формы СВЧ-импульса, так и его энергии. Проведены эксперименты, в которых СВЧ генератор с более коротким соленоидом и ЗС (рис.5,б) работал в режиме квазистационарной генерации. При питании 5-нс ускоряющим импульсом от формирующей линии 50 Ом, заряжавшейся до ~ 200 кВ полупроводниковым SOS модулятором

СМ-3Н, получены квазипрямоугольные СВЧ импульсы 8-мм излучения мощностью ~ 170 МВт длительностью около 4 нс [12*,13*]. Электронный к.п.д. при этом достигал 35%. В экспериментах выяснено, что снижение магнитного поля до ~ 1.7 Тл не приводит к резкому снижению мощности генерации как квазистационарной, так и нестационарной ЛОВ. На этом основании был проведён расчёт и разработаны перспективные проекты МФС с таким полем (рис.5,с) для ЛОВ 8-мм диапазона из высококоэрцитивных постоянных магнитов неодим-железо-бор (NdFeB). Прогнозируемое снижение мощности генерации этих перспективных систем меньше прототипов с импульсным соленоидом на 15-30 % [14*,15*,16*].

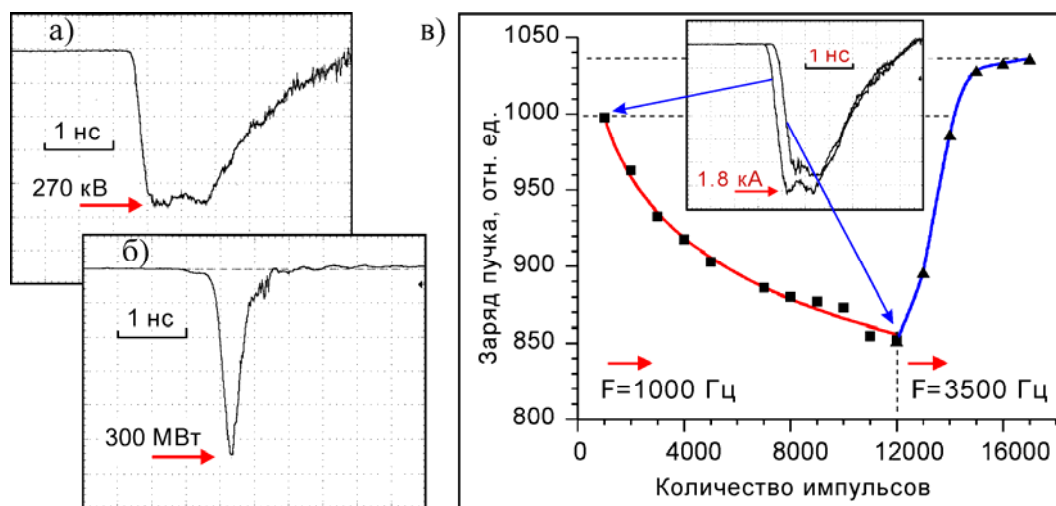


Рис.6. Стробоскопические осциллограммы ускоряющего напряжения (а) и огибающей СВЧ импульса (б), полученные на частоте повторения 1000 Гц; деградация и восстановление токового импульса пучка (показан на вставке) при тренировке катода на различных частотах повторения (в).

Раздел 2.3 представляет эксперимент [17*], где изучались характеристики нестационарной 8-мм ЛОВ, генерировавшей стабильные СВЧ импульсы с длительностью ~ 250 пс и пиковой мощностью до 300 МВт в пакетах продолжительностью 1 с на частотах повторения 1-3.5 кГц. При конверсии мощности пучка ~ 0.5 эти параметры уникальны по настоящее время. Электронный пучок инжектировался ускорителем на основе высоковольтного SOS-генератора СМ-3НС с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. На выходе генератора была установлена короткая ФЛ и обостряющий водородный разрядник под давлением 100 атмосфер [18*]. Фокусирующее пучок магнитное поле с индукцией 2 Тл обеспечивалось охлаждаемым маслом соленоидом постоянного тока с источником питания разработки ИСЭ СО РАН. Для регистрации коротких сигналов ускоряющего напряжения (рис.6,а), СВЧ (рис.6,б) и тока пучка (вставка на рис.6,в) использовался стробоскопический осциллограф Tek-TDS820 с полосой 6 ГГц, требовавший для формирования картинки минимум 512 включений. Германиевый СВЧ детектор на горячих

носителях прошел перед экспериментом специальное тестирование для определения его температурной зависимости (рис.3,а) в режиме высоких частот повторения импульсов напряжения смещения [6*].

В ходе периодических измерений тока пучка коллекторным датчиком на частотах повторения ускоряющих импульсов до 1000 Гц проявился известный эффект полировки - деградации и задержки эмиссии графитового катода [19*]. Однако, было обнаружено, что при скачкообразном повышении частоты следования до 3500 Гц эмиссия восстанавливается (вставка на рис.6,в). Было высказано предположение, что такое восстановление связано с нарастающим разогревом областей взрывной эмиссии на графитовом катоде из-за недостаточного теплоотвода на интервале между импульсами и усиления роли термоэмиссии электронов по сравнению с автоэмиссионным механизмом. В этом случае следовало ожидать эффекта привязки зон эмиссии на каждом последующем импульсе к предыдущим. Это и было показано фотографированием кромки катода при выполнении дуплетов импульсов, следовавших с интервалами 1 мс или 300 мкс [20*]. В случае интервала 300 мкс наблюдалось меньшее количество плазменных образований, что подтверждает привязку зон эмиссии.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с измерением параметров нестационарной ЛОВ диапазона длин волн 3 см и исследованием фазовой стабилизации импульсов излучения.

Раздел 3.1 посвящен эксперименту (рис.7,а), где использован гибридный модулятор ускоряющих импульсов [21*,22*], состоявший из твердотельного SOS-драйвера С-5Н и формирователя выходного импульса на основе маслонаполненной формирующей линии и искрового водородного разрядника высокого давления. Использована МФС с соленоидом

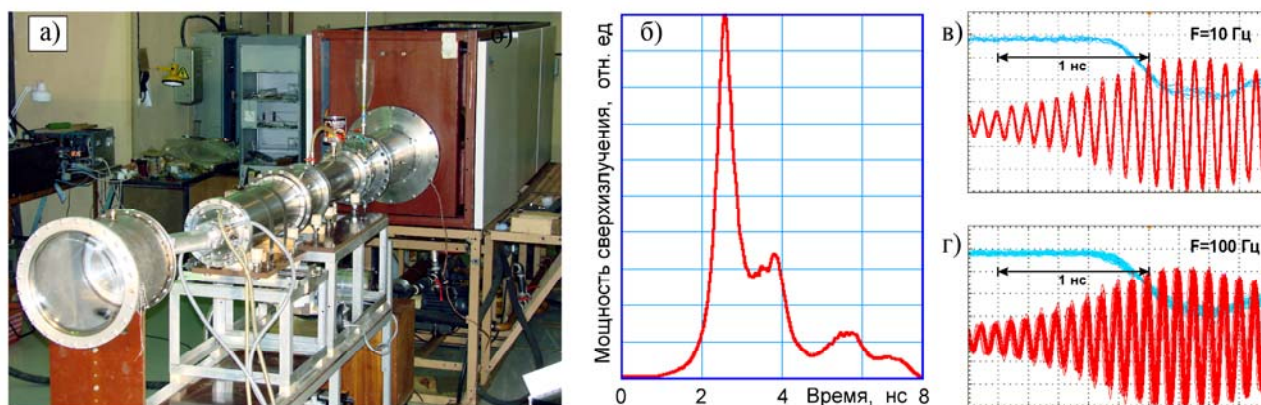


Рис.7. Экспериментальная установка с нестационарной ЛОВ (а) для генерации субнаносекундных 3-см СВЧ импульсов с мощностью до 3 ГВт и частотой повторения до 1 кГц (б) и изучения фиксации фазы несущей частоты по отношению к фронту ускоряющего импульса (в; г).

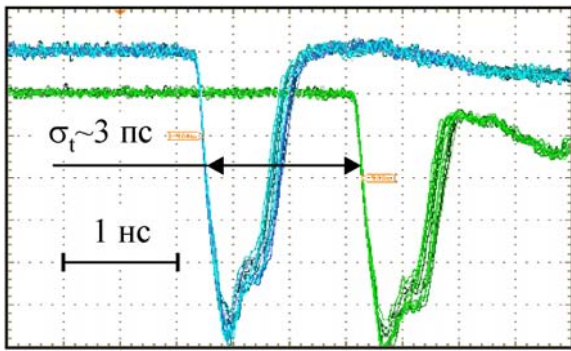


Рис.8. Измерение взаимной нестабильности фронтов тока пучков с двух независимых графитовых катодов, питаемых идентичными (расщеплёнными) импульсами напряжения - 190 кВ. Амплитуды тока ~ 150 А.

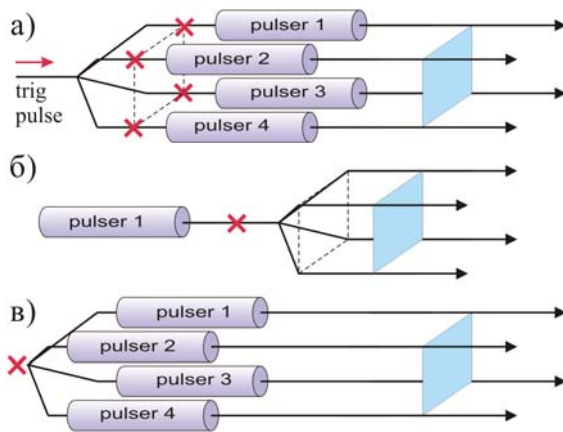


Рис.9. Возможные концепции питания электронных инжекторов многоканальных СВЧ генераторов. Идентичные модуляторы с управляемыми искровыми разрядниками (а); низкоомный модулятор с импульсом, расщепляемым на несколько каналов (б); идентичные, жестко синхронизированные модуляторы с общим кокусатором (в).

импульса с ростом частоты повторения

В разделе 3.2 представлен эксперимент [26*], направленный на обоснование возможности более точной фиксации фазы возбуждения релятивистского электронного автогенератора. При любом разумном соотношении $t_f^V / T_{СВЧ}$ очевидно, что требуется пикосекундная точность появления фронта тока электронного пучка на входе в ЗС. Было выполнено исследование взаимной временной стабильности токовых фронтов электронных пучков от двух независимых взрывоэмиссионных графитовых катодов, питаемых идентичными (расщеплёнными) ускоряющими импульсами. Показано, что взаимная среднеквадратичная дисперсия по времени токовых фронтов инжектируемых сильноточных электронных пучков с нетренированных

постоянного тока, обеспечивающим поле ~ 0.6 Тл. Это ниже поля циклотронного резонанса для 3-см ЛОВ. На первом этапе эксперимента [23*] в режиме нестационарной генерации получены СВЧ импульсы диапазона 10 ГГц с длительностью на полувывсоте 0.8 нс с пиковой мощностью ~ 2 ГВт на частоте повторения 700 Гц. В дальнейшем мощность ускоряющего импульса была увеличена с 3.5 до 3.9 ГВт и на частоте до 1000 Гц мощность излучения возросла до ~ 3 ГВт (рис.7,б) [24*]. Использовалась детекторно-калориметрическая методика измерений параметров СВЧ импульсов. С помощью осциллографа с полосой 15 ГГц радиосигнал ЛОВ на несущей частоте 10 ГГц наблюдался в реальном времени при синхронизации от фронта ускоряющего напряжения. Обнаружено, что несмотря на длительность фронта напряжения ($t_f^V \approx 500$ пс) в пять раз большую периода СВЧ ($T_{СВЧ} = 100$ пс), фаза излучения оказалась стабильной с точностью по временной шкале ± 10 пс и ± 20 пс (при частотах повторения 10 Гц и 100 Гц, соответственно, рис.7, в;г) [25*]. Увеличение разброса было обусловлено ухудшением стабильности фронта ускоряющего

катодов составляет ~ 3 пс (рис.8) и возрастает до 10 пс при тренировке катодов за 10^4 включений из-за выраженного эффекта полировки микрорельефа эмиссионной кромки.

В четвёртой главе представлены эксперименты, где изучалась синхронизация фаз излучения двух релятивистских электронных автогенераторов типа ЛОВ, не имеющих электродинамической связи. Рассмотрено несколько схем питания независимых взрывоэмиссионных катодов (рис.9). Эксперименты [27*,28*,29*] показали, что для СВЧ приборов 3-см и более длинноволновых диапазонов в принципе реально использовать прецизионную синхронизацию разрядников параллельных источников ускоряющих импульсов электронными пучками (рис.9, а). Поучена точность ± 12 пс, но для этого дополнительно требуется «запускающий» ускоритель, не менее мощный, чем ведомый. То есть, запуск пучком оказался энергетически невыгоден по сравнению со схемами на (рис.9, б;в), которые в дальнейшем и применялись. Во всех нижеприведённых случаях для обострения наносекундных фронтов напряжения до ~ 300 пс использовались нелинейные коаксиальные линии с управляемым подмагничиванием ферритового заполнения [25]. Варьируя ток в соленоидах подмагничивания можно было менять задержку фронтов, подаваемых на катоды, и с пикосекундной точностью управлять разностью фаз излучения ЛОВ в каналах.

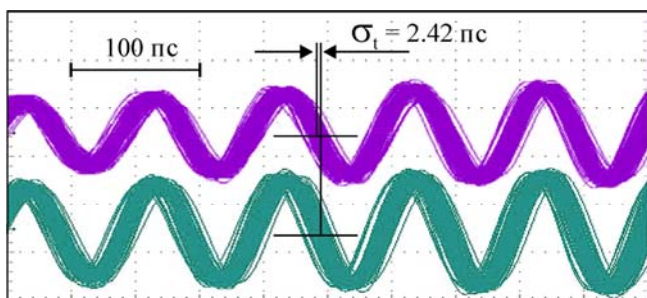


Рис.10. Измерение взаимной нестабильности фаз генерации двух релятивистских ЛОВ диапазона 10 ГГц при синхронизации осциллографа по фронту ускоряющего импульса до его расщепления по каналам.

Раздел 4.1 кратко описывает пионерский эксперимент, проведенный в ИСЭ СО РАН [30*,31*] с участием автора диссертации, где с использованием результатов [25*,26*] была впервые показана возможность создания двухканального наносекундного релятивистского СВЧ-генератора диапазона 10 ГГц со стабильностью фаз в каждом канале, достаточной для когерентного сложения их

электромагнитных полей. В этом эксперименте вакуумные диоды двух независимых нестационарных ЛОВ были подключены по схеме, показанной на (рис.9, б) к общему источнику напряжения СИНУС-200 с фронтом субнаносекундной длительности. Следует отметить, что в каждом из каналов стабильность фазы излучения по отношению к фронту ускоряющего напряжения была на уровне значений, зарегистрированных в эксперименте [25*] (рис.7, в;г). Однако измеренное несколькими способами стандартное отклонение разброса разности фаз электромагнитных колебаний между каналами составило ~ 2 пс (рис.10), то есть, всего единицы процентов от периода колебаний. Это показало возможность синхронизации фаз и для более коротковолновых независимых автогенераторов.

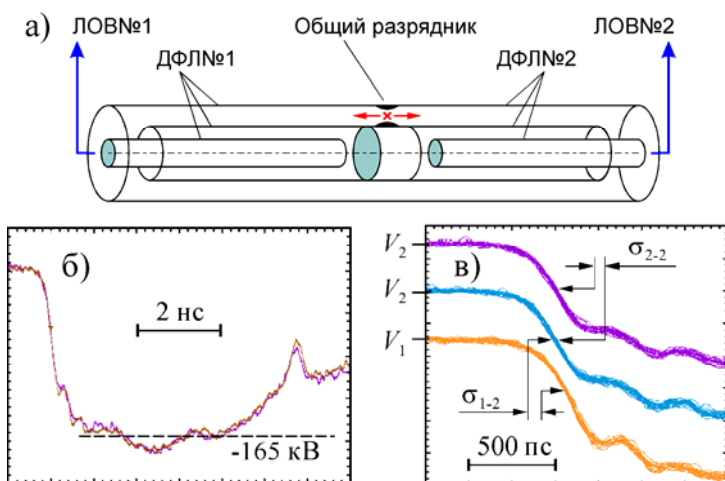


Рис.11. (а) - схема коммутации двух ДФЛ общим разрядником, позволяющая формировать равные по амплитуде ускоряющие импульсы (б); (в) - измерение реальной взаимной нестабильности фронтов $\Delta\sigma_s$ по статистически независимым разбросам между каналами (σ_{1-2}) и расщеплённого сигнала V_2 одного из каналов (σ_{2-2}) из-за шумов осциллографа.

В разделе 4.2 рассмотрен эксперимент по когерентному сложению полей 8-мм квазистационарных ЛОВ, запитанных по двухканальному варианту схемы на рис.9, в [32*,33*]. Такое включение возможно для высоковольтных источников РАДАН-303 с двойными формирующими линиями (ДФЛ), так как они могут коммутироваться одним общим искровым разрядником (рис.11, а). Установлено, что в таком варианте имеется неустраняемая причина нестабильности между фронтами напряжения (рис.11, б)

$$\sigma_s = (\sigma_{1-2}^2 - \sigma_{2-2}^2)^{0.5} \approx 2.3 \div 2.8 \text{ пс (рис.11, в)}$$

в) из-за случайного положения искры в зазоре газового разрядника (рис.11, а). На этом фоне фазовая нестабильности СВЧ между каналами могла быть ~ 1 пс. В двух каналах использовались идентичные ЛОВ с короткой ЗС, мощность излучения которых была ~ 100 МВт. Равномерная эмиссия электронов при относительно невысоком напряжении (рис.11, б) обеспечивалась сильным фокусирующим магнитным полем ~ 5 Тл. Для исключения фактора нелинейности детектора, регистрировавшего СВЧ сигнал по главному направлению двойной антенной системы, при одновременной работе каналов вводился волноводный аттенуатор, ослаблявший мощность излучения в 4 раза. В этих измерениях (рис.12) было доказано квадратичное увеличение плотности потока мощности излучения от двух ЛОВ по сравнению с одноканальным вариантом. Удержание фазы в каждом канале и когерентное суммирование полей стабильно воспроизводилось от

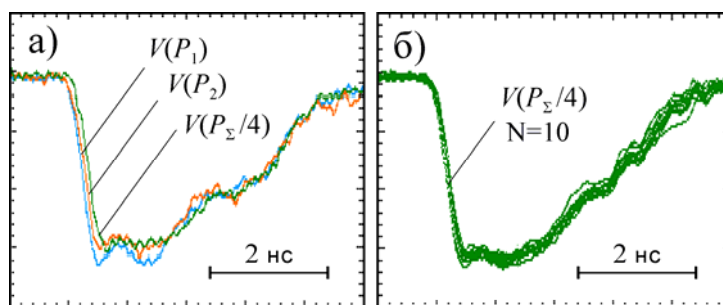


Рис.12. (а) – Сигналы $V(P_1)$ и $V(P_2)$ с детектора, регистрируемые при раздельном включении каналов СВЧ-генератора с синхронизированными ДФЛ, и суммарный сигнал от обоих СВЧ источников $V(P_\Sigma/4)$, ослабленный по мощности в 4 раза волноводным аттенуатором; б) – накопление десяти последовательных импульсов суммированного сигнала.

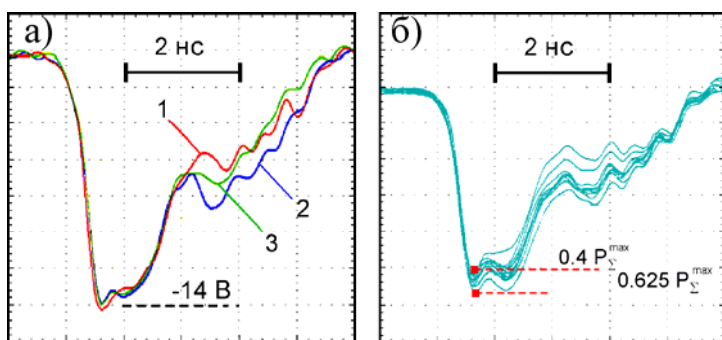


Рис.13. (а) – Сигналы детектора при работе отдельных ЛОВ, питаемых импульсом SOS модулятора (1;2) и суммарный сигнал (3), ослабленный в 4 раза; б) – измерение разброса амплитуд суммированных импульсов при начальном сдвиге фаз $\pi/2$.

импульса к импульсу на длительном интервале времени – не менее 100 периодов ВЧ поля.

Раздел 4.3 представляет результаты [34*], полученные в развитие эксперимента [31*]. Двухканальные 8-мм ЛОВ (квазистационарные или нестационарные) питались по схеме на **рис.9, б** расщеплённым импульсом от твердотельного высоковольтного SOS модулятора S500 (модификация C5-H),

имевшим высокую амплитудную стабильность (стандартное отклонение не хуже 0.5%). Увеличенное напряжение и ток пучка определили переход квазистационарной ЛОВ [31*] в режим, близкий к автомодуляционному, с выраженным пиком в начале импульса с мощностью ~ 230 МВт (**рис.13, а**). Нестационарный вариант ЛОВ при таком питании обеспечивал мощность излучения до 750 МВт (**рис.14**). Стабильное питание катодов и малый дрейф тока подмагничивания ферритовых линий - обострителей позволили провести прецизионные измерения взаимной девиации фазы СВЧ между каналами приборов в наиболее благоприятных условиях, когда начальная разность фаз между каналами искусственно устанавливалась равной $\pi/2$. Разброс амплитуд сигналов детектора, регистрирующего в свободном пространстве

суммированное излучение двух ЛОВ показал (**рис.13, б**), что стандартное отклонение фазовой синхронизации независимых автогенераторов 8-мм диапазона не превышало 0.5 пс, то есть, $\sim 2\%$ от периода СВЧ излучения.

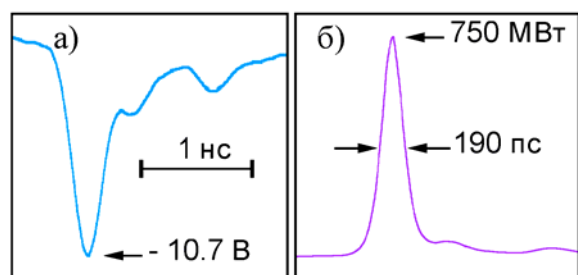


Рис.14. (а) – Сигнал детектора при работе одного из каналов нестационарного СВЧ генератора с питанием от SOS модулятора; (б) – тот же импульс в координатах «время-мощность», восстановленный с учётом нелинейной вольт-ваттной калибровки детектора и калориметрических измерений полной энергии излучения.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. На килогерцовых частотах повторения обнаружен эффект частотной границы полировки графитового катода короткими импульсами, который крайне важен для пикосекундной сильноточной электроники.

2. Зарегистрированный экспериментально разброс фаз излучения в двух независимых каналах ($\sigma_{\delta t} \sim 0.5$ пс) дает основания полагать, что стабильности фронта тока пучка по отношению к фронту ускоряющего напряжения еще выше, поскольку при возбуждении электронного прибора дисперсия фазы СВЧ генерации не может быть меньше временной дисперсии фронта возбуждающего электронного пучка. Измерить реальную величину стабильности “ускоряющий импульс – электронный пучок” не представилось возможным из-за достижения предела по точности регистратора.
3. Получены и измерены уникальные характеристики субнаносекундных импульсов нестационарных ЛОВ, работавших секундными пакетами на высоких частотах повторения: импульсная и средняя мощность ~ 300 МВт и ~ 200 Вт, соответственно, для 8-мм ЛОВ на частоте повторения 3500 Гц; импульсная и средняя мощность ~ 3 ГВт и ~ 3 кВт для 3-см ЛОВ на частоте повторения 1000 Гц.
4. Показана возможность когерентного сложения СВЧ полей двух независимых релятивистских автогенераторов (ЛОВ 8-мм диапазона длин волн) при соотношении времени нарастания ускоряющего напряжения на катоде и периода генерируемых СВЧ колебаний ~ 10 .
5. Продemonстрировано, что пикосекундная синхронизация фаз и когерентное суммирование полей двух независимых релятивистских автогенераторов стабильно воспроизводится от импульса к импульсу на длительном интервале времени – не менее 100 периодов ВЧ поля.
6. Для исследованных двухканальных СВЧ источников возможно электронное сканирование диаграммы направленности.
7. Показана перспектива увеличения количества независимых синфазных СВЧ генераторов для дальнейшего квадратичного наращивания плотности потока мощности интегральных волновых пучков излучения, суммируемого в свободном пространстве. На этом пути можно получать предельные плотности потока мощности микроволн с помощью многоканальных приборов, которые будут значительно компактнее альтернативных одноканальных источников.

Приложение содержит копии документов, подтверждающих научную новизну результатов и их использование.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г. А. Месяц. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с.
2. Mesyats G.A. Explosive Electron Emission / G.A. Mesyats. - Ekaterinburg: URO-Press, 1998. - 248 p.
3. Гапонов-Грехов А. В. Релятивистская высокочастотная электроника / А. В. Гапонов-Грехов, М. И. Петелин // Вестник АН СССР. – 1979. – №4. – С. 11-23.
4. Gold S. H. Review of high-power microwave source research / S. H. Gold, G. S. Nusinovich // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – Vol. 68, Iss. 11. – pp. 3945-3974.

5. Генерация мощных электромагнитных импульсов потоком релятивистских электронов / Н.Ф. Ковалев, М.И. Петелин, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский, Л.Э. Цопп // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – Т. 18, Вып. 4. – С. 232-235.
6. Приборы типа О, основанные на индуцированном черенковском и переходном излучениях релятивистских электронов / Н. Ф. Ковалев, М. И. Петелин, М. Д. Райзер, А. В. Сморгонский // Релятивистская высокочастотная электроника. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – С. 76 – 113.
7. Сильноточные импульсно-периодические ускорители электронов для генераторов СВЧ-излучения / А. С. Ельчанинов, Ф. Я. Загулов, С. Д. Коровин, Г. А. Месяц, В. В. Ростов //Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения – Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – С. 5-21.
8. Высокочастотные измерения в релятивистской электронике / В. И. Белоусов, В. И. Зеленцов, М. М. Офицеров, М. Д. Райзер, Л. Э Цопп // Релятивистская высокочастотная электроника. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – С. 275-289.
9. Радиолокатор на основе СВЧ-генератора с релятивистским электронным пучком / Б. В. Бункин, А. В. Гапонов-Грехов, А. С. Ельчанинов, Ф. Я. Загулов, С. Д. Коровин, Г. А. Месяц, М. Л. Осипов, Е. А. Отливанчик, М. И. Петелин, А. М. Прохоров, В. В. Ростов, И. Н. Сисакян, А. В. Сморгонский, В. А. Суворов //Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18, №9. – С.61-64.
10. Релятивистская ЛОВ с сосредоточенным резонансным рефлектором / С. Д. Коровин, И. К. Куркан, В. В. Ростов, Е. М. Тотьменинов // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №12. – С. 1189-1196.
11. Denisov G. G. Resonant reflectors for free electron masers / G. G. Denisov, D. A. Lukovnikov, Samsonov S. V. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – 1995. – Vol. 16, № 4. – pp. 745-752.
12. Куркан И. К. О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ. / И. К. Куркан, В. В. Ростов, Е. М. Тотьменинов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, №10 – С.43-47.
13. Взрывозмиссионный катод с большим временем жизни / А. В. Гунин, С. Д. Коровин, В. Ф. Ландль, Г. А. Месяц, В. В. Ростов // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 22. – С.84-94.
14. The RADAN Series of Compact Pulsed Power Generators and Their Applications / G.A.Mesyats, S.D.Korovin, V.V.Rostov, V.G.Shpak, M.I.Yalandin // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, Iss. 7. – pp.1166-1179.
15. Гинзбург Н. С. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ. / Н. С Гинзбург., С. П. Кузнецов, Т. Н. Федосеева // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1978. – Т. 21, №7. – С. 1037-1052.
16. Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime / N.S. Ginzburg, N.Yu. Novozhilova, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, N.Yu. Peskov, A.D.R. Phelps, S.M. Wiggins, A.W. Cross, K. Ronald, W. He, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, V.P.Tarakanov / Physical Review E. – 1999. – Vol. 60. – pp. 3297-3304.
17. Generation of Cherenkov superradiance pulses with a peak power exceeding the power of the driving short electron beam / S.D. Korovin, A.A. Eltchaninov, V.V. Rostov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, I.V. Zotova // Physical Review E. – 2006. – Vol. 74, №1. – pp. 016501(1-8).
18. Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока (обзор) / Рукин С.Н. // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – № 4. – С. 5 - 36.
19. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT / V. P. Tarakanov. – Berkeley Research Associates, Inc., VA, USA, 1992
20. Микроволновый источник мультигигаваттной пиковой мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора / В. Л. Братман, Г. Г. Денисов, Н. Г. Колганов, С. В. Мишакин, С.В. Самсонов, Д. И. Соболев. // ЖТФ – 2011. – Т. 81, Вып. 2. – С.113-117.

21. Котельников В. А. О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи / В. А. Котельников // В сб.: Всесоюзный энергетический комитет. Материалы к I Всесоюз. съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. По радиосекции. – М.: Управление связи РККА. – 1933. – С.1-19.
22. Ефремов А. М. Субнаносекундный делитель напряжения на связанных линиях / А. М. Ефремов, Б. М. Ковальчук // ПТЭ. – 2004. – № 1. – С. 69-70.
23. Денис В. Горячие электроны / В. Денис, Ю. Пожела. – Вильнюс: «Минтис», 1971. – 289с.
24. Яландин М.И. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона (обзор) / М.И.Яландин, В.Г.Шпак. // ПТЭ. – 2001. – № 3. – С.5-31
25. Repetitive sub-gigawatt rf source based on gyromagnetic nonlinear transmission line / I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, V.P. Gubanov, A.S. Stepchenko, A.V. Gunin, I.K. Kurkan. // Rev. of Sci. Instr. – 2012. – Vol. 83, № 7. – pp. 074705(1-6)

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1*. High-Voltage Low-Distortion Reflectometr Based on Two Voltage Dividers with a Coupled Lines / K. A. Sharypov, S. A. Shunailov, V. G. Shpak, M. R. Ul'masculov, M. I. Yalandin, // Изв. ВУЗов. Физика. – 2012. – Вып. 10/3. – С. 367-370.
- 2*. Time-domain reflectometry of high-voltage nonlinear loads with picosecond resolution / K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Ul'masculov, M. I. Yalandin // Rev. Sci. Instrum. – 2013. – Vol. 84, Iss. 5. – pp. 055110(1-8)
- 3*. Current probes for picosecond electron beams / A. G. Reutova, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin // In Proc. of 15-th Int. Sym. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2008. – pp. 111 – 114.
- 4*. Stability of Injection of a Subnanosecond High-Current Electron Beam and Dynamic Effects Within Its Risetime / M.I.Yalandin, A.G.Reutova, K.A.Sharypov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, M.R.Ulmasculov, V.V.Rostov, G.A.Mesyats // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, №. 10. – pp. 2559-2564
- 5*. Investigation of Drift Dynamics and Injection Stability of High-Current Electron Beam with Picosecond Resolution / M.I.Yalandin, A.G.Reutova, K.A.Sharypov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, M.R. Ulmasculov, G.A.Mesyats // in Digest of Technical Papers of the 17-th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC2009), Washington, D.C., USA, 2009. – pp. 971-974.
- 6*. Some peculiarities of peak power measurements of a short HPM pulses / K. A. Sharypov, M. R. Ulmaskulov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin // In: Proc. of 16-th Int. Sym. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2010. – pp. 466-469.
- 7*. Высокоэффективная генерация импульсов субнаносекундной длительности в релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона длин волн. / С.Д.Коровин, Г.А.Месяц, В.В.Ростов, М.Р.Ульмаскулов, К.А.Шарыпов, В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин. // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, Вып. 2. – С.81-89.
- 8*. Субнаносекундный источник импульсов излучения в диапазоне 38 ГГц с импульсной мощностью 1 ГВт / С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 3. – С. 68-74.
- 9*. Compact Ka-band Generator of Microwave Superradiative Pulses / M. I. Yalandin, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Ulmasculov, V. V. Rostov, G. A. Mesyats // In: Proceedings of the 34-th IEEE International Conference on Plasma Science and the 16-th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA, 2007. – pp. 772-775.
- 10*. Импульсно-периодическая нестационарная релятивистская лампа обратной волны диапазона частот 38 ГГц с низким ведущим магнитным полем / А.Е. Ермаков, С.В. Жаков, Г.А. Месяц, В.В.

Ростов, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, Вып. 18. – С. 76-82.

- 11*. Compact Ka-band Backward-Wave Generator of Superradiative Pulses Operating at Reduced Guiding Magnetic Field / M. I. Yalandin, G. A. Mesyats, V. V. Rostov, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, and M. R. Ulmaskulov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2008. – Vol. 36, № 5, Part 3. – pp. 2604-2608.
- 12*. Registration of Initial Stage of Air Breakdown in the Fields of Subgigawatt Ka-Band Microwave Pulses / M.I.Yalandin, A.G.Reutova, K.A.Sharypov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, M.R.Ulmaskulov, G.A.Mesyats, // in Digest of Technical Papers of the 17-th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC2009), Washington, D.C., USA, 2009. – pp.476-479.
- 13*. Microwave Breakdown of Air by Nanosecond and Subnanosecond Ka-Band Pulses / M.I.Yalandin, A.G.Reutova, K.A.Sharypov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, M.R.Ulmaskulov, G.A.Mesyats // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, № 6. – pp. 1398-1402
- 14*. Subgigawatt Ka-band BWO with a Permanent-Magnet-Based e-Beam Focusing System: Experiments, Simulations, and Prospects / M. I. Yalandin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, M.R. Ulmaskulov, A.E. Yermakov, S.V. Zhakov, V.V. Rostov, G.A. Mesyats; Edit. by Marshall Molen. // In Proc. of 28-th IEEE Int. Power Modulator Symposium And 2008 High Voltage Workshop, Las Vegas, NV, USA, 2008. – pp.139-142.
- 15*. Comparative characteristics of relativistic millimeter-band BWOs with a pulsed and highly-coercivity magnetic system: Simulations and experiment / K.A.Sharypov, A.E.Ermakov, S.V.Zhakov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, and M.I.Yalandin // In: Proc. of 16-th Int. Sym. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2010. – pp. 462-465.
- 16*. Simulated Parameters of Subgigawatt Relativistic BWOs with Permanent Magnetic Systems / V. V. Rostov, A. V. Gunin, E. M. Tot'meninov, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, M. I. Yalandin, A. E. Yermakov, S. V. Zhakov, G. Demol, R. Vezinet // in Conference Records Abstracts of the 18-th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC2011), Chicago, IL., USA, 2011. – pp. 56.
- 17*. Генерирование мощных субнаносекундных СВЧ импульсов диапазона 38 ГГц с частотой повторения до 3,5 кГц / Д.М.Гришин, В.П.Губанов, С.Д.Коровин, С.К.Любутин, Г.А.Месяц, А.В.Никифоров, В.В.Ростов, С.Н.Рукин, Б.Г.Словиковский, М.Р.Ульмаскулов, К.А.Шарыпов, В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, Вып. 19. – С. 24-31
- 18*. Subnanosecond hybrid modulator for UWB and HPM applications / M.I. Yalandin, S.K. Luybutin, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, B.G. Slovikovsky, M.R. Ulmaskulov. // Abstracts of Power Modulator Conference PMC'02, Hollywood, CA, USA, 2002. – p.125.
- 19*. High Peak Power and High Average Power Subnanosecond Ka-Band Relativistic BWO / V.P.Gubanov, D.M.Grishin, A.V.Gunin, S.D.Korovin, S.K.Luybutin, G.A.Mesyats, A.V.Nikiforov, V.V.Rostov, S.N.Rukin, B.G.Slovikovsky, K.A.Sharypov, V.G.Shpak, S.A.Shunailov, M.R.Ulmaskulov, M.I.Yalandin; Editors T. Mehlhorn, M. Sweeney // AIP Conference Proceedings of 14-th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, BEAMS 2002, Albuquerque, NM, USA, 2002. – New York: Melvill, 2002. – Vol. 650. – pp.263-266.
- 20*. Регенерация графитового взрывоэмиссионного катода при больших частотах повторения наносекундных ускоряющих импульсов / С.Д.Коровин, С.К.Любутин, Е.А.Литвинов, Г.А.Месяц, А.М.Мурзакаев, В.В.Ростов, С.Н.Рукин, Б.Г.Словиковский, М.Р.Ульмаскулов, К.А.Шарыпов, В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, Вып.11. – С. 88-94.
- 21*. Nanosecond Pulsewidth Hybrid Modulator / S.K. Luybutin, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, B.G. Slovikovsky, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin; Edit. by Hulya Kirkici // In Proc. of 26-th IEEE Int. Power Modulator Symposium And 2004 High Voltage Workshop, San-Francisco, CA, USA, 2004 – pp.539-542.
- 22*. Nanosecond Hybrid Modulator for the Fast-Repetitive Driving of X-Band, Gigawatt-Power Microwave Source / S.K. Luybutin, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, B.G. Slovikovsky, M.R.

Ulmaskulov, M.I. Yalandin, S.D. Korovin, V.V. Rostov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, Iss.4, Part 1. – pp.1220-1225.

- 23*. Генерирование субнаносекундных импульсов излучения диапазона 10 ГГц с высокой пиковой и средней мощностью / С.Д. Коровин, С.К. Любути́н, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, С.Н. Рукин, Б.Г. Слови́ковский, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып.17. – С. 23-32.
- 24*. Repetitive Generation of X-band Superradiation at 3-GW Peak Power / M. I. Yalandin, S. K. Luybutin, S. N. Rukin, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, B. G. Slovikovsky, S. P. Timoshenkov, M. R. Ulmaskulov, V. V. Rostov, D. M. Grishin, V. P. Gubanov, A. A. Elchaninov, A. I. Klimov, G. A. Mesyats // In: Proceedings of the 34-th IEEE International Conference on Plasma Science and the 16-th IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA, 2007. – pp. 768-771.
- 25*. Генерирование гигаваттных микроволновых импульсов диапазона 10 ГГц со стабильной фазой / Д.М. Гришин, С.К. Любути́н, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, С.Н. Рукин, Б.Г. Слови́ковский, С.П. Тимошенко́в, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, Вып. 19. – С. 14-20.
- 26*. Пикосекундная стабильность инъекции параллельных сильнотоочных электронных пучков М.И. Яландин, А.Г. Реутова, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, А.И. Климов, В.В. Ростов, Г.А. Месяц – Письма в ЖТФ. – 2009 – Т.35, Вып. 17. – С. 41-49.
- 27*. Управляемая коммутация высоковольтного газового разрядника с пикосекундной точностью / Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, Вып. 19. – С. 6-13.
- 28*. High Voltage Gas Gap Switching with Picosecond Accuracy / M. I. Yalandin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, G.A. Mesyats; Edit. by Marshall Molen // In Proc. of 28-th IEEE Int. Power Modulator Symposium And 2008 High Voltage Workshop, Las Vegas, NV, USA, 2008. – pp. 207-210.
- 29*. A Picosecond-Jitter Electron-Beam-Triggered High-Voltage Gas Spark Gap M. I. Yalandin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, G.A. Mesyats // IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – Vol. 17, № 1. – pp. 34-38
- 30*. Experimental demonstration of coherent power summation for relativistic X-band HPM generators A.A. Elchaninov, K.V. Afanas'ev, A.I. Klimov, O.B. Kovalchuk, G.A. Mesyats, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, M.I. Yalandin // In: Proc. of 16-th Int. Sym. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2010. – pp. 404-407.
- 31*. Когерентное сложение мощности наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов / А. А. Ельчанинов, А. И. Климов, О. Б. Ковальчук, Г. А. Месяц, И.В. Пегель, И. В. Романченко, В.В. Ростов, К. А. Шарыпов, М. И. Яландин // ЖТФ. – 2011. – Т.81, Вып.1. – С. 125-130.
- 32*. Синфазные наносекундные релятивистские СВЧ-генераторы обратной волны диапазона 37 ГГц без электродинамической связи / М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, В.В. Ростов, И.В. Романченко, А.А. Ельчанинов, А.И. Климов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т.38, Вып. 20. – С. 8-14.
- 33*. Power Coherent Summation of Two Independent Ka-band BWO: Installation and Experiment / S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, V. G. Shpak, M.R. U'Imaskulov, K.A. Sharypov, V.V. Rostov, A.A. El'chaninov, I.V. Romanchenko, A.I. Klimov // In Conference Proceedings 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference 19th International Conference on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany, 2012. – p.246 (1-4).
- 34*. Двухканальный релятивистский генератор встречной волны диапазона 8 мм с управляемой разностью фаз и мощностью 230 МВт в канале / А.А. Ельчанинов, А.И. Климов, И.В. Романченко, В.В. Ростов, М.С. Педос, С.Н. Рукин, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, Вып. 20. – С. 49-56.