

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ШУНАЙЛОВ Сергей Афанасьевич

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПИКОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ
БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ

Специальность: 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук
в виде научного доклада

Екатеринбург, 2024

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

Научный консультант: Яландин Михаил Иванович д.т.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории электронных ускорителей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Защита состоится " _____ " месяца 202__ г. в _____ час. на заседании специализированного совета Д _____ при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электрофизики УрО РАН

Диссертация в форме научного доклада разослана

" _____ " _____ 202__ г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета _____

доктор физико-математических наук

М. В. Медведев

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	5
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	
1. Компактные высоковольтные нано- и субнаносекундные источники	12
2. Инициирование и управление эмиссией в сильноточных диодах	17
3. Характеристики КДМИ и эффекты на фронте пучка	23
4. Источники мощных наносекундных СВЧ импульсов	29
5. Микроволновое сверхизлучение электронных пучков	34
6. Стабильная по фазе СВЧ генерация в диапазоне миллиметровых волн	42
7. Убегающие электроны в атмосферных разрядных промежутках	46
8. Применение коротких импульсов напряжения, пучков и СВЧ излучения	
8.1. Источники пучков для исследований импульсной катодолюминесценции	56
8.2. Излучение полупроводниковых лазерных мишеней	58
8.3. Высокоградиентное ускорение электронов полем микроволнового сверхизлучения	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	66
СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	70
СПИСОК РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	79

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЭЭ – автоэлектронная эмиссия
ВД – вакуумный диод
ВЧ – высокочастотный
ВЭЭ – взрывная электронная эмиссия
ГД – газовый диод
ГНЛ – гиромагнитная нелинейная линия
ДН – диаграмма направленности
ДФЛ – двойная формирующая линия
ДР – динамическая рефлектометрия
ЗС – замедляющая система
ИКЛ – импульсная катодолюминесценция
КДМИ – коаксиальный диод с магнитной изоляцией
КЗ – короткое замыкание (короткозамкнутый)
ЛБВ – лампа бегущей волны
ЛОВ – лампа обратной волны
ЛСЭ – лазер на свободных электронах
ПЛ – передающая линия
ПЛМ – полупроводниковая лазерная мишень
ПМ – плазменный мазер
ПУЭ – пробой на убегающих электронах
РАДАН[®] – Рентгеновский Аппарат Диагностический. Академия Наук
СВЧ – сверхвысокочастотный
СИ – сверхизлучение
СИНУС – Сильноточный Импульсный Наносекундный УСкоритель
ТТ - трансформатор Тесла
УТС – управляемый термоядерный синтез
УЭ – убегающие электроны
ФЛ – формирующая линия
ЭМ – электромагнитный
ЭОП – электронно–оптический преобразователь
УС – ускоряющая структура
FFT – Fast Fourier Transform (быстрое преобразование Фурье)
SOS – Semiconductor Opening Switch (полупроводниковый прерыватель)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение, актуальность темы диссертации

История развития малогабаритной высоковольтной импульсной и ускорительной техники (включая её использование в физических экспериментах и для практических задач) насчитывает около ста лет. Достаточно привести пример реализации Видероз компактной схемы ускорителя протонов на основе дрейфовой трубки с биполярным питанием [1]. Если иметь в виду «сильноточную» составляющую этого направления (от словосочетания «большой ток»), то здесь принципиальными этапами можно считать работы академика Г.А. Месяца по становлению техники генерирования высоковольтных наносекундных импульсов [2, 3] и открытие им явления взрывной электронной эмиссии [4]. Этот эффект стал основой при создании источников коротких вспышек тормозного излучения [5], а также получения магнитоизолированных релятивистских сильноточных электронных пучков [6-8], которым трудами коллектива академика А.В. Гапонова-Грехова [9] была открыта перспектива применений для генерации мощных СВЧ импульсов наносекундной длительности [10]. Объединённые в сложные стационарные экспериментальные установки, мощные импульсные высоковольтные источники, инжекторы пучков и электродинамические системы СВЧ генераторов позволили в 1980-х получить мультигигаваттные микроволновые импульсы [11], рекордные по мощности и энергосодержанию до настоящего момента.

В период 1970-80-х, наряду с мегавольтными системами специального назначения (задачи УТС [12], генерация электромагнитных импульсов различных спектральных диапазонов [13, 14], эффекты радиационного воздействия на объекты и среды [15]) развивались и малогабаритные устройства с выходными импульсами длительностью до единиц наносекунд и амплитудами от сотни киловольт до мегавольта. Здесь следует выделить работы по формированию субнаносекундных высоковольтных импульсов и электронных пучков [16, 17], в основе которых лежали представления о физике ВЭЭ, процессах быстрой коммутации искровых промежутков [18], разработки газовых разрядников высокого давления [19] и вакуумных рентгеновских и электронных диодов с ВЭЭ-катодами [20, 21].

Отпаянные версии упомянутых разрядников и диодов создавались для комплектации востребованных промышленностью серийных наносекундных рентгенаппаратов [22], к которым не предъявлялось жестких требований к уровню помех, форме и стабильности ускоряющих импульсов. Однако эти факторы оказались весьма критическими в «неожиданных» лабораторных применениях высоковольтных блоков рентгенаппаратов, далёких от промышленной дефектоскопии. К тому времени в ИСЭ СО АН СССР были разработаны высоковольтные генераторы «среднего класса» типа СИНУС [23] (энергозапас импульса десятки-сотни джоулей). Здесь зарядка формирующей линии трансформатором Тесла с разомкнутым ферромагнитным сердечником [24] и применение азотных разрядников с циркуляцией газа [25] решали проблемы снижения помех, получения трапецеидальной формы и стабильности импульсов, а также их частотный режим до 1000 Гц. Учёт этих возможностей дал основание разработкам на основе ТТ и ФЛ первых модификаций более компактных наносекундных источников и ускорителей семейства РАДАН [26]. Генераторы этого типа удовлетворяли требованиям к их применениям не только в виде переносных

рентгенаппаратов. Они широко использовались и для решения лабораторных задач, где требовалась микросекундная синхронизация с исследуемыми процессами, электромагнитная совместимость с чувствительной регистрирующей аппаратурой. Вместе с тем, применение упомянутых серийных отпаянных разрядников и вакуумных диодов не давало возможности регулировать параметры генерируемого электронного пучка.

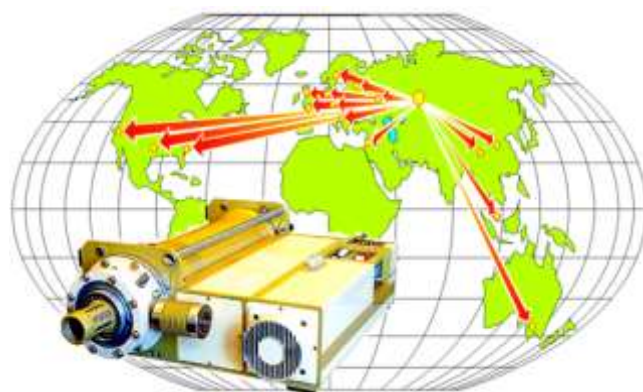


Рис. 1. «Ареал распространения» РАДАН-303

Автор настоящей квалификационной работы начал свои разработки и исследования в конце 1980-х, когда определились отмеченные проблемы, и стала очевидной актуальность создания многофункциональных высоковольтных источников с энергозапасом ФЛ до 5 Дж. Это значение являлось «пограничным» между системами СИНУС и РАДАН-303 – наиболее мощной и распространённой моделью (рис. 1) приборов этого типа. Итогом решения поставленных задач явилась кандидатская диссертация соискателя [27]. Задачи этой работы формулировались следующим образом: разработка, создание и исследование параметров многоцелевых компактных высоковольтных генераторов и сильноточных импульсно-периодических ускорителей электронов нано- и субнаносекундного диапазонов длительностей; применение этих приборов для решения различных исследовательских и технологических задач. Перечислим конспективно основные, полученные в [27] результаты, так как они явились основой последующих работ соискателя и, соответственно, представляемой диссертации:

- Созданы малогабаритные многоцелевые импульсно-периодические генераторы (РАДАН-303 [28**], РАДАН-ЭКСПЕРТ [29**], РАДАН-Н110 [30**]) с длительностью импульсов 2-4 нс, напряжением до $-(100\div 300)$ кВ и частотой повторения до 1 кГц (пакетный режим).
- Предложена схема на основе ФЛ и газового разрядника со специальной электродной системой [31**], кратно увеличившая крутизну фронта наносекундного импульса. Разработана конструкция преобразователя с обостряющим и срезающим газовыми разрядниками [32**], обеспечившая плавную перестройку и достаточную стабильность выходных субнаносекундных импульсов, в том числе при частотах повторения до 100 Гц.
- Проведены исследования управляемых высоковольтных разрядников с субнаносекундной точностью включения при минимальной энергии пусковых импульсов [33**]. Показана возможность синхронизации нескольких ДФЛ - источников РАДАН-303.
- Выполнена разработка вакуумного диода с протяженной электродной системой большой емкости, где катод питался высоковольтным импульсом в режиме бегущей волны [34**]. Обеспечены условия формирования ленточного электронного пучка с однородным распределением энергии, выводимой за фольговое окно.

- Создан ускоритель сильноточного субнаносекундного трубчатого электронного пучка (≈ 300 пс; ≈ 300 кэВ), формируемого в КДМИ [35**]. Показана роль предимпульса напряжения в инициировании ВЭЭ на катоде. Пучок использован для генерации микроволнового сверхизлучения (СИ).

Следует отметить, что только ранние эксперименты из последней области [36-39**] упоминались в кандидатской диссертации соискателя. Они не вошли в перечень основных публикаций, отражающих полученные результаты.

Продолжение и развитие отмеченных направлений исследований представлялось **актуальным**. Действительно, разрабатываемая техника, ожидаемые результаты и методики экспериментов соответствовали задачам, сформулированным позднее в Программе фундаментальных научных исследований (ПФНИ) государственных академий наук РФ на 2013 - 2020 годы. Пункт №13: «Фундаментальные проблемы физической электроники, в том числе, разработка методов генерации, приема и преобразования электромагнитных волн с помощью твердотельных и вакуумных устройств, акустоэлектроника, релятивистская СВЧ-электроника больших мощностей, физика мощных пучков заряженных частиц». В настоящее время, аналогичные задачи содержатся в разделах 1.3.2.11, 1.3.3.5, 1.3.4.4, 1.3.6.1 и 1.3.6.6 действующей ПФНИ РФ на период 2021 – 2030 годы.

Цели диссертационной работы: Общей целью работы являлось развитие техники, методик экспериментов и получение приоритетных результатов мирового уровня в области нано-субнано- и пикосекундной электроники больших мощностей. **Основные задачи** следующие:

1. Развитие компактной техники формирования, методов и устройств диагностики высоковольтных нано- и субнаносекундных импульсов; их применение для исследований инициирования ВЭЭ и её стабильности в вакуумных диодах.
2. Анализ режимов формирования и характеристик нано- и субнаносекундных электронных пучков в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией (КДМИ); пикосекундных кинематических и излучательных процессов на фронте тока. Применение таких пучков в экспериментах по релятивистской СВЧ электронике больших мощностей.
3. Демонстрация использования сильноточных пучков с субнаносекундным фронтом (или полной длительностью) для генерации СИ релятивистских электронных потоков в миллиметровом диапазоне длин волн при различных механизмах электронно-волнового взаимодействия.
4. Выяснение условий пикосекундной стабилизации фазы СВЧ генерации в черенковском приборе диапазона миллиметровых волн с сильноточным пучком, в том числе, в режиме СИ. Определение пороговых условий навязки фазы вакуумного автогенератора СВЧ с сильноточным пучком внешним электромагнитным сигналом.
5. Формирование и изучение с предельным разрешением по времени характеристик пикосекундных потоков убегających электронов (УЭ) в атмосферных промежутках с неоднородным полем. Демонстрация методик стабилизации, управления характеристиками и определения порогов их эмиссии. Получение и радиальная компрессия направленных сгустков УЭ в магнитном поле.

6. Применение результатов по перечисленным выше направлениям для решения практических задач, а также для экспериментов с целью достижения рекордных характеристик электронных потоков и микроволновых импульсов на более высоковольтных установках.

Научная новизна работы состоит в представленных в диссертации результатах разработок и исследований, на момент публикаций имевших мировой приоритет. Практически все результаты были получены впервые. Особо отметим, что экспериментальные исследования выполнялись с использованием новейшей осциллографической аппаратуры и измерительных датчиков собственной разработки с максимально возможным разрешением по времени, что в основном и определяло уникальность полученных данных.

Научная и практическая ценность работы подтверждается тем, что значительная часть основных результатов, начиная с 2001 года, более 15 раз входила в раздел важнейших научных достижений российских ученых по физике в ежегодных докладах РАН Правительству РФ. Некоторые примеры применений полученных результатов и разработок для междисциплинарных исследований приведены в Разделе 8.

Вклад автора в представленной квалификационной работе состоит в постановке задач экспериментальных исследований, выполнении расчетов электрической прочности высоковольтных блоков установок, моделировании их согласования с нагрузками различных типов, разработке конструкций и проектировании ключевых элементов экспериментальной техники и отработке технологии их изготовления. Соискатель лично изготавливал и калибровал измерительные датчики, руководил ресурсными испытаниями разработанной аппаратуры, проведением пусконаладочных работ и экспериментов, обработкой и анализом полученных данных. Примерно 40% докладов на научных мероприятиях, подготовленных в соавторстве, представлялись им лично.

Реализация результатов работы

Более двадцати приборов РАДАН нескольких модификаций с дополнительными устройствами были поставлены по коммерческим контрактам в РФ и 11 стран мира (США, Великобритания, КНР, Швеция, Австралия, Бельгия, Израиль, Эстония, Республика Корея, Сингапур, ФРГ), где эксплуатируются в лабораториях различных научных центров и университетов для междисциплинарных исследований.

Апробация работы и публикации

После защиты соискателем кандидатской диссертации в 1999 г. им в соавторстве в рецензируемых журналах опубликовано 146 работ. Основными по теме данной диссертации квалифицировано 89 статей (при цитировании помечены*), из них 51 работа – за последние 10 лет, начиная с ноября 2014 г. **Все** основные публикации соответствуют категории K1 из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК, индексируются базой данных RSCI, или имеют категорию Q1 и Q2 (Scopus). Таким образом, соблюдены требования к публикациям, определяющие возможность представления диссертации в виде научного доклада. В конце перечня основных публикаций соискателя представлен список из 6 патентов и авторских свидетельств.

Дополнительные публикации соискателя (помечены**) приведены в общем списке цитированных источников. Это работы, выполненные в период подготовки кандидатской диссертации [27], упомянутые ранее в диссертациях соавторов, где соискатель не был научным руководителем, а также представленные в трудах некоторых конференций.

С 2000 г. по настоящий момент соискателем в соавторстве представлены и опубликованы в трудах конференций 92 доклада, отражающих результаты диссертационной работы. Из них 44 доклада на конференциях, проводившихся в Японии, США, Великобритании, КНР, Турции, Республике Корея, ФРГ, Португалии. Это следующие научные мероприятия:

- Int. Conf. on High-Power Particle Beams,
- Int. Conf. on Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics,
- Int. Pulsed Power Plasma Science Conf.,
- Int. Pulsed Power Conf.,
- Int. Conf. on Plasma Science,
- Int. Power Modulator Symp.,
- Euro-Asian Pulsed Power Conf. and Int. Conf. on High-Power Particle Beams,
- Int. Vacuum Electronics Conf.,
- Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves.

Российские научные мероприятия, где представлено 48 докладов, как правило, имели статус международных или с зарубежным участием:

- Int. Symposium on High Current Electronics,
- Межд. Конф. «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование»,
- Симпозиум «Лазеры на парах металлов»,
- Межд. научно-техн. конф. "Современное телевидение",
- Int. Conf. «Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration»,
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн,
- Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects,
- Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications»,
- Int. Conf. «Gas Discharge Plasmas and their Applications»,
- Int. Conf. «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications».

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется современными методиками регистрации исследуемых процессов, воспроизводимыми результатами и калибровкой диагностических датчиков. Измерения проводились дублирующими способами; применялась высокочувствительная осциллографическая аппаратура с максимально-доступной полосой регистрации (вплоть до 70 ГГц) и её надёжная экранировка для подавления помех. При наличии естественных нестабильностей сигналов, использовался метод дискриминации – выборка реализаций при совпадении параметров наблюдаемого сигнала с референтным, полученным усреднением по большому количеству включений. Для анализа девиации временной стабильности наиболее коротких сигналов применялась регистрация с автонормированием импульсов. Как правило, преобразование формы

импульсов напряжения, результаты коллекторных измерений тока пучка и огибающие сигналов с детекторов СВЧ излучения сравнивались с расчётами в полномасштабных численных моделях процессов и устройств реальной геометрии с помощью полностью электромагнитного кода КАРАТ [40], куда транслировались начальные условия в виде сигналов питающего напряжения, полученные в контрольных экспериментах.

Положения, выносимые на защиту

Утверждается следующее:

1. Преобразователь с обостряющим и срезающим азотными разрядниками высокого давления обеспечивает получение из наносекундных импульсов напряжения более коротких с плавно регулируемой длительностью $0.1 \div 2$ нс и амплитудой – $(20 \div 250)$ кВ при темпе нарастания фронта до 1.6×10^{15} В/с. Разрядники преобразователя с водородным заполнением под давлением 100 атм. допускают стабильный пакетный режим работы (1 с) на частоте повторения до 3.5 кГц без циркуляции газа. При амплитуде исходного 2-нс импульса -120 кВ с фронтом ~ 200 пс срезающий разрядник атмосферного давления формирует задний фронт короче 400 пс в режиме пробоя с участием убегающих электронов. Оперативная перестройка параметров высоковольтных импульсов малогабаритных сильноточных устройств позволила получить приоритетные результаты в исследованиях эмиссионных и электроразрядных процессов в вакуумных и газовых промежутках, при генерации электронных пучков и электромагнитного излучения.
2. Увеличение тока субнаносекундного трубчатого пучка в вакуумном диоде возможно либо при подаче на катод короткого импульса напряжения с опережением короче 1 нс, либо при наличии наносекундного предимпульса за счёт ранней автоэмиссионной подготовки катода и наработки взрывоэмиссионной плазмы. В свою очередь, инициирование взрывной эмиссии на катоде с опережением более 300 нс кратно (до 4-х раз) увеличивает электронный ток и скорость нарастания его фронта до 55 кА/нс за счёт зарядовой нейтрализации пучка в плазменном канале остаточного газа. В процессе ускорения происходит кинематическое обострение субнаносекундного фронта тока пучка, а при дальнейшем его дрейфе в магнитном поле формируется лидирующий всплеск.
3. Время переходного процесса и режим генерации релятивистской ЛОВ диапазона 38 ГГц меняются при вариации диаметра трубчатого пучка в зоне энергообмена с СВЧ волной из-за различия времени диффузии импульсного магнитного поля сквозь стальной корпус диода и медную стенку замедляющей системы (ЗС). Такая же настройка проводки пучка в сверхразмерных ЗС генераторов поверхностной волны с 1D и 2D гофрировкой стенок позволила получить рекордные мощности субнаносекундных пиков сверхизлучения (СИ) до 70 и 150 МВт на частотах 140 и 90 ГГц. В умеренно-сверхразмерных ЗС релятивистских ЛОВ диапазонов 38 и 30 ГГц достигнуты наибольшие мощности субнаносекундных пиков СИ в 1 и 3 ГВт в условиях запаздывания СВЧ пробоев. Аналогичное запаздывание обеспечило возможность накачки полуволнового резонатора импульсом СИ (1 ГВт; 38 ГГц; 300 пс), где параксиальный пучок электронов был ускорен от 250 кэВ до 1.25 МэВ с рекордным градиентом ≈ 250 МВ/м.

4. При скорости роста напряжения на катоде $> 10^{15}$ В/с с обострённым фронтом тока пучка связано формирование электромагнитного импульса, спектральные компоненты которого лежат в полосе усиления релятивистских ЛОВ диапазонов 29-38 ГГц. Так как взрывная эмиссия с графита воспроизводится с разбросом в единицы пикосекунд, то при достаточной мощности электромагнитного импульса реализуется стабильное по фазе возбуждение СВЧ прибора от включения к включению или синфазная генерация в нескольких каналах, питаемых расщеплённым импульсом напряжения. Фаза генерации ЛОВ задаётся внешним СВЧ сигналом, даже смещённым по частоте на 3-6%, если его мощность больше мощности электромагнитного импульса от фронта пучка.

5. В воздушном промежутке с игольчатым катодом и градиентным экраном, снижающим неоднородность электрического поля, эмиссия убегающих электронов (УЭ) обеспечивается при повышенном напряжении. В результате, в остаточном поле после фронта волны ионизации формируется интенсивный вторичный поток УЭ, а при подаче импульса с длительностью ≈ 100 пс и амплитудой ~ 900 кВ наблюдается фракция УЭ с максимальной энергией ≈ 1.4 МэВ. Длительность параксиальной фракции УЭ ≤ 10 пс в промежутке с резко неоднородным электрическим полем определяется нарушением условий убегания на плазменной границе у вершины конического катода. Плотность тока такого сгустка на аноде управляется однородным магнитным полем и при индукции > 4 Тл достигает рекордной величины > 0.6 кА/см² при характерной энергии ≈ 200 кэВ. В случае длинной кромки катода и сильного магнитного поля поток УЭ представляет набор дискретных сгустков. Дисковые потоки формируются при синхронной эмиссии УЭ от соосных острокромочных катодов. Кратное сжатие таких потоков УЭ по радиусу возможно в нарастающем магнитном поле, но ограничено эффектом магнитного зеркала.

Структура диссертации

Диссертация в виде научного доклада содержит Общую характеристику работы, включающую Введение и формальные пункты, Основное содержание, изложенное в восьми Разделах, Заключение с описанием результатов, список цитированных источников (120 пунктов) и перечень основных публикаций соискателя в журналах по теме диссертации (89 пунктов*) и 6 патентов. Объем диссертации составляет 86 страниц, включая 57 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Ниже, к «субнаносекундным» и «пикосекундным» будем относить импульсы и процессы с длительностями $< 10^{-9}$ и $< 10^{-10}$ с, соответственно. Аналогичные определения будем применять и к коротким фронтам при большей полной длительности импульса.

1. Компактные высоковольтные нано- и субнаносекундные источники

В продолжение исследований и разработок [28**-30**] получили развитие источники семейства РАДАН, дополнительные устройства преобразования формы выходных наносекундных импульсов, обеспечивающие, в отличие от [31**, 32**], не только их обострение и укорочение, но также компрессию или ВЧ модуляцию при высокой амплитудной стабильности, в том числе, на килогерцовых частотах повторения. Усовершенствована также методика синхронизации ДФЛ-драйвера [33**] с целью увеличения на порядок точности его включения.

Конструкция и характеристики наиболее распространённого высоковольтного наносекундного источника РАДАН-303 (рис. 1) детально представлены в [27]. Главной особенностью генератора является использование высоковольтного накопителя энергии в виде коаксиальной ДФЛ с выходным волновым сопротивлением 45 Ом (рис. 2а). Инвертированная зарядка промежуточного электрода ДФЛ с помощью трансформатора Тесла напряжением положительной полярности до ≈ 200 кВ позволяет получить отрицательный выходной импульс для питания электронных инжекторов. Искровой азотный коммутатор размещен между внешним и промежуточным электродами ДФЛ. Поэтому

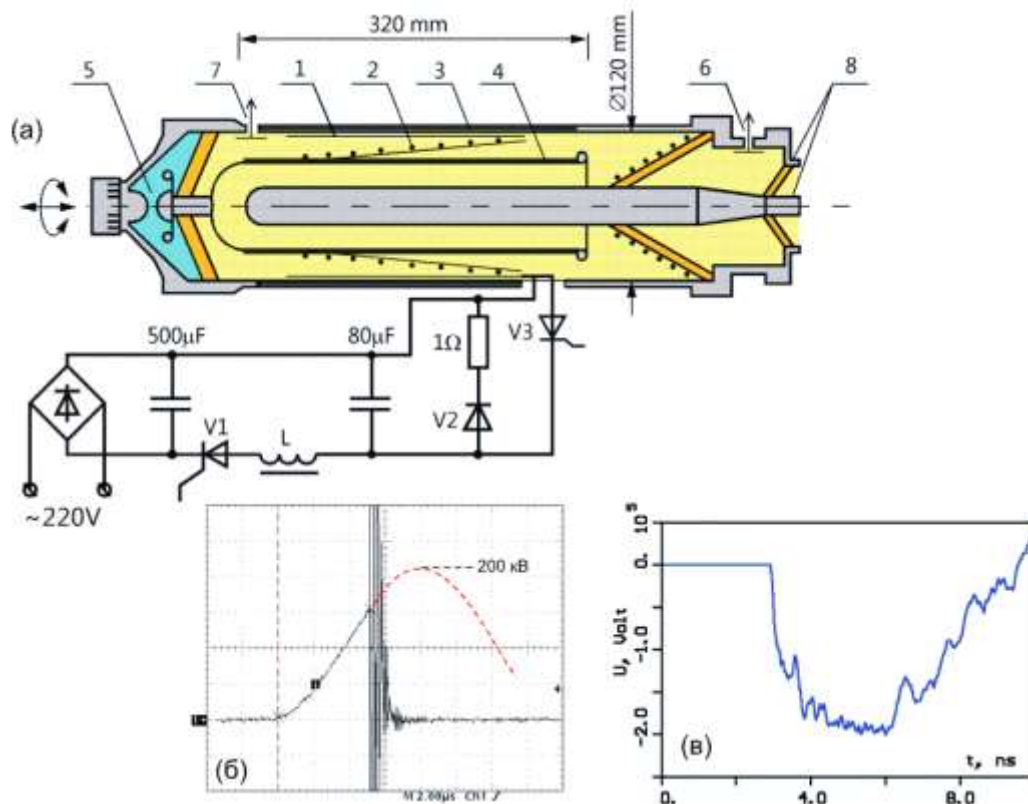


Рис. 2. (а) Схема ДФЛ-драйвера РАДАН-303: 1,2 – обмотки ТТ; 3,4 – магнитопроводы; 5 – азотный разрядник; 6,7 – датчики напряжения; 8 – коаксиальный выход 45 Ом. (б) Зарядная кривая ДФЛ. (в) Расчётный [40] импульс ДФЛ с «идеальным» ключом.

имеется возможность с помощью герметичного механического привода через заземлённый катод регулировать зазор разрядника без снятия давления азота (до 60 атм.), и таким образом изменять напряжение его пробоя (рис. 2б) и амплитуду выходного импульса (рис. 2в).

Конструктивной спецификой ДФЛ является различная длина внешней и внутренней коаксиальных линий. Поэтому выходной импульс имеет сложную форму и затянутый фронт даже при быстродействующем коммутаторе (100 пс в расчёте [40], рис. 2в). Отмеченная особенность ДФЛ, а скорее – её недостаток, стимулировали разработку дополнительных устройств-преобразователей, обеспечивающих формирование выходного квази-трапецеидального импульса с наносекундной полкой и более коротким передним фронтом. К заднему фронту требования обычно менее жесткие. Такой преобразователь (рис. 3а) в целом описывается C_1 - L - C_2 схемой зарядки емкостного накопителя, в качестве которого выступает обычная ФЛ, имеющая кратно меньшую длину и емкость C_2 , чем у ДФЛ драйвера (C_1). Известно, что в предельном случае $C_2 \ll C_1$ на емкости C_2 достигается удвоенное напряжение. Как показано в расчётах [41**], при равенстве волновых сопротивлений ДФЛ РАДАН-303 и ФЛ, за счёт подбора соотношения их емкостей после коммутации обостряющего разрядника преобразователя в максимуме зарядного напряжения C_2 на выходе ФЛ формируется импульс с длительностью ≈ 1 нс [1*]. Амплитуда выходного импульса увеличивается в зависимости от времени зарядки на 32-45% по отношению к импульсу, поступающему от ДФЛ. Это время задаётся количеством циклов отражений зарядного импульса в кольцевой цепи, образованной индуктивностью L (спиральной линией), участком ФЛ и разомкнутым обостряющим разрядником. Меняя длину ФЛ, можно получать трапецеидальные импульсы различной длительности (2 и 3 на рис. 3б). Когда длина ФЛ фиксирована, конструкция преобразователя с обостряющим разрядником даёт альтернативные возможности для получения квазитрапецеидальных выходных импульсов различной длительности. Для этого дополнительный электрод, образующий короткую разомкнутую передающую полосковую линию (шлейф), подключается параллельно к ФЛ на её входе или выходе - в масле или газе, соответственно. В этом варианте, однако, полка импульса нерегулярная.



Рис. 3. (а) Конструкция субнаносекундного преобразователя-компрессора импульсов с ФЛ и азотными разрядниками. (б) Выходные импульсы напряжения: 1 – при выключенных разрядниках; 2, 3 – при различной длине ФЛ и выключенном срезающем разряднике; 4, 5 – при срабатывании обоих разрядников.

Наносекундные импульсы с обострённым фронтом могут быть укорочены с помощью срезающего разрядника (4, 5 на [рис. 3б](#)), электрод которого представляет заземлённый диск. Его перемещение вдоль оси меняет искровой зазор до конического (в общем случае) выходного электрода обостряющего промежутка. Тем самым меняется момент включения разрядника и длительность выходного импульса. Отметим, что радиальный срезающий промежуток значительно меньше обостряющего, так как здесь допустимо большее перенапряжение при прохождении субнаносекундного фронта. Кроме того, этот промежуток подсвечивается ультрафиолетовым излучением от искры в обостряющем разряде. В результате, пробой в срезающем промежутке многоканальный («низкоиндуктивный») и задний фронт формируемого субнаносекундного импульса короче переднего.

Конструктивно оба искровых зазора преобразователя расположены в общем газовом объёме. Для получения фронта длительностью ~ 150 пс (здесь и ниже – по уровням 0.1-0.9), обычно используется азот (под давлением до 60 атм.). Примерно такую же длительность фронта можно получить в случае водородного заполнения преобразователя под давлением до 100 атм. Водород имеет высокую скорость восстановления электрической прочности после пробоя [42] и повышенную теплопроводность. Поэтому преобразователь с водородными разрядниками сверхвысокого давления даже без циркуляции (продувки) газа в зазорах допускает в секундных пакетах частоту повторения импульсов вплоть до 3.5 кГц [1*, 43**]. В этом случае в качестве наносекундного драйвера, заряжающего ФЛ преобразователя, взамен РАДАН-303 применялся SOS-генератор СМ-ЗНС с полностью твердотельной системой коммутации.

Перед субнаносекундным фронтом выходного импульса представленного выше преобразователя из-за проходной емкости обостряющего разрядника возникает наносекундный предимпульс напряжения ([рис. 3б](#)). Его амплитуда и длительность определяются величиной искрового промежутка и моментом пробоя на фронте зарядного импульса ФЛ, а форма соответствует производной от напряжения на этом участке. В том случае, когда в экспериментах наличие предимпульса по каким-либо причинам нежелательно [2*, 3*], может использоваться альтернативная схема обострения наносекундного фронта импульса драйвера с помощью передающей ГНЛ с ферритовым заполнением изоляционного зазора ([рис. 4а](#)) [44]. В режиме без подмагничивания феррита формируется относительно плавный обострённый фронт ([рис. 4б](#)) и амплитуда импульса не

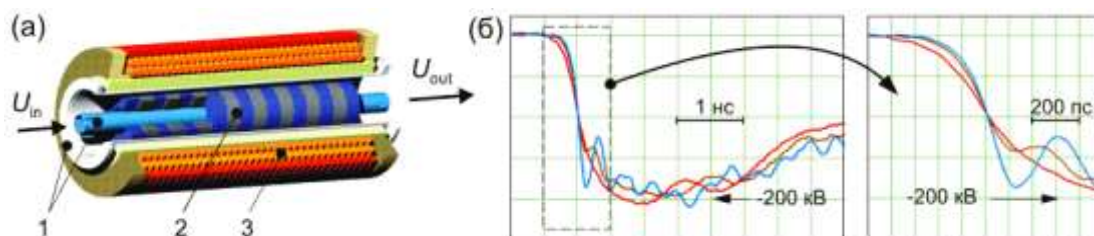


Рис. 4. (а) Конструкция гиромагнитной нелинейной линии: 1 – электроды коаксиальной передающей линии; 2 – ферритовые кольца; 3 – соленоид постоянного тока. (б) Обострение фронта выходного импульса с увеличением поля подмагничивания, начиная с нулевого (красный сигнал).

увеличивается. Когда феррит насыщается внешним продольным магнитным полем, с учётом азимутального магнитного поля волны напряжения возникает прецессия вектора намагниченности, и на частоте гиромангнитного резонанса раскачиваются осцилляции, модулирующие амплитуду волны напряжения. При большом поле подмагничивания пики осцилляций гигагерцового диапазона превышают амплитуду входного импульса.

Обострение фронта с помощью ГНЛ может применяться не только для импульсов наносекундных драйверов (РАДАН-303, SOS-модуляторы, и т.д.), но и для более коротких импульсов (2 и 3 на [рис. 3б](#)), формируемых преобразователем с ФЛ и разрядником [45**]. Однако, при этом отсутствует жесткая стабилизация обострённого фронта по отношению к фронту импульса драйвера. Причина связана с временным разбросом срабатывания обостряющего разрядника в диапазоне от десятков до сотен пикосекунд. Тем не менее, даже в этом случае выходной импульс наносекундного ДФЛ драйвера, дополненного любым из перечисленных вариантов систем обострения фронта, может быть синхронизирован с внешним устройством/процессом или с импульсом аналогичного драйвера с точностью лучше 1 нс. Такой режим детально представлен в [27], где описан эксперимент [33**] по изучению диапазона управления и точности включения трёхэлектродного варианта азотного разрядника генератора РАДАН-303.

В случае применения ДФЛ ([рис. 2а](#)), через канал в заземлённом катоде разрядника по приосевому дополнительному игольчатому электроду ([рис. 5а](#)) удобно ввести запускающий импульс напряжения, искажающий распределение электрического поля в зазоре. Тогда при относительно медленном нарастании импульса реализуется «тригatronный» механизм управления разрядником, что обеспечивает наносекундный разброс включения, стабилизирующий амплитуду выходного импульса ДФЛ при времени её зарядки до

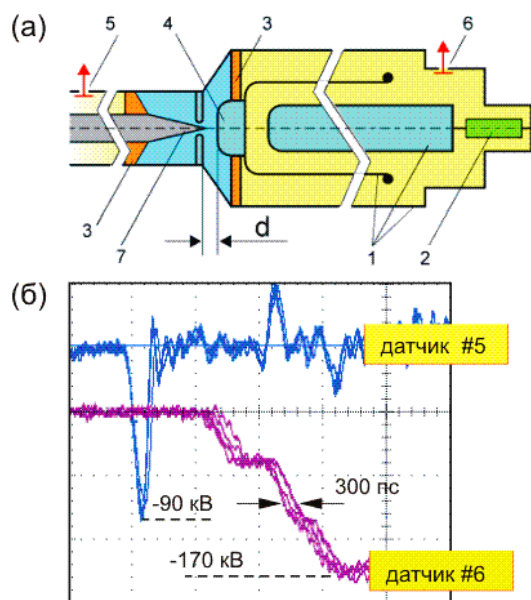


Рис. 5. (а) Схема ДФЛ с управляемым разрядником: 1 – Электроды ДФЛ; 2 – нагрузка; 3 – изолятор; 4 – анод разрядника; 5,6 – датчики напряжения; 7 – пусковой электрод. (б) Разброс синхронизации по отношению к запуску.

максимума за ~ 8 мкс ([рис. 2б](#)). Если использовать отрицательный пусковой импульс короче 10^{-9} с, то из-за быстрого роста поля у острия пускового электрода опережающий пробой инициируется между ним и анодным электродом разрядника. Тогда по отношению к пусковому импульсу достигается точность включения, сравнимая с его длительностью τ_s или менее ([рис. 5б](#)), то есть, субнаносекундная. В этом варианте амплитудная стабильность импульса ДФЛ определяется точностью, с которой подан пусковой импульс с амплитудой от десятков до сотни киловольт по отношению к моменту включения коммутатора первичного контура ТТ. При расщеплении пускового импульса достаточной амплитуды, несколько ДФЛ включаются с относительным разбросом по времени $\delta t \approx \tau_s$, что на порядок меньше

длительности 5-ти наносекундного импульса ДФЛ. Синхронизация подобного типа в двухканальных установках с драйверами РАДАН-303 неоднократно применялась в описываемых ниже экспериментах.

Задача кардинального увеличения точности включения разрядника ДФЛ (т.е., снижения разброса δt до уровня $\ll 10^{-10}$ с) стала актуальной после экспериментов [46, 47**], где в диапазонах 3.7 и 10 ГГц в сериях включений была продемонстрирована СВЧ генерация сверхизлучательных ЛОВ с фазой, стабильной относительно фронта ускоряющего импульса на катоде. Первоначально считалось [46], что стабилизация фазы связана с обострением фронта ускоряющего напряжения на катоде и тока взрывозмиссионного пучка до десятых долей наносекунды, то есть, до длительности, сравнимой с периодом несущей частоты СВЧ генерации ($T = 270$ пс для 3.7 ГГц). Как известно, стабильные по фазе одночастотные волновые пучки (СВЧ импульсы) допускают когерентное суммирование с увеличением интенсивности излучения квадратично количеству источников (принцип фазированной антенной решетки). Нарушения закона сохранения энергии здесь нет, так как СВЧ поля складываются линейно, а суммарная картина интенсивности имеет интерференционный квадратичный максимум (выделенный или периодический в пространстве). Чтобы такой режим осуществить, в любом случае требуется запуск коммутаторов нескольких высоковольтных драйверов, питающих ВЭЭ-катоде стабильных по фазе СВЧ генераторов, с точностью $\ll T$, то есть, порядка 10^{-11} с. Мы предположили, что подобный режим запуска газоразрядного коммутатора высокого давления возможен при электроинжекционном управлении [48], при вводе в газ достаточно мощного электронного пучка подходящей энергии с субнаносекундным фронтом. Конструкция такого коммутатора [49**] показана на рис. 6а. Ввод пучка (рис. 6б) в газ осуществляется через перфорированное окно из 50-мкм фольги (Al-Be). Требование устойчивости фольги при давлении до 40 атм. определяет невысокую прозрачность окна (рис. 6в). Тем не менее, при электронном токе ≈ 130 А был получен эффект включения разрядника с полным управлением (в течении длительности пучка), и с полным разбросом фронта импульса на выходе ДФЛ по времени < 25 пс (рис. 6г). Это соответствовало уровню джиттера фронта ускоряющего импульса, питающего катод взрывозмиссионного инжектора. В приведённом выше примере обратим внимание на две

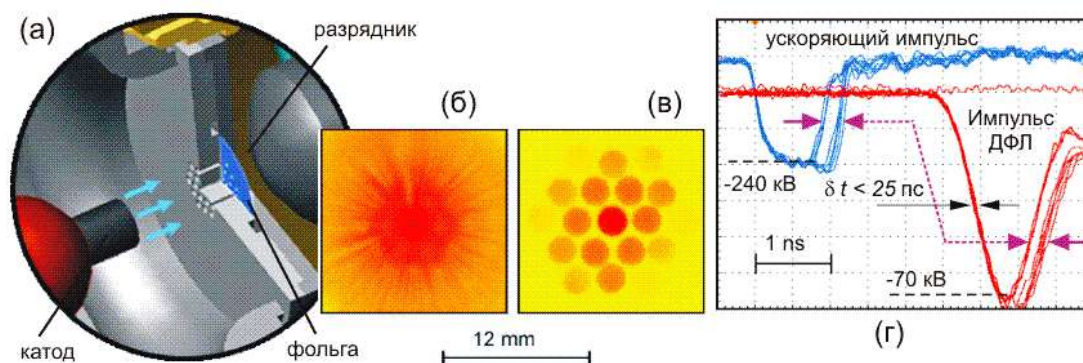


Рис. 6. (а) Конструкция азотного разрядника ДФЛ-драйвера с электроинжекционным управлением и фольговое окно. (б, в) Отпечаток управляющего пучка до- и после окна, соответственно. (г) Ускоряющий импульс, питающий ВЭЭ-катод электронного инжектора и выходной импульс ДФЛ-драйвера.

особенности. Во-первых, формирование управляющего пучка требует применение наносекундного ускоряющего импульса с коротким фронтом и плоской вершиной, генерируемого преобразователем. Во-вторых, синхронизированный выходной импульс имеет значительно более протяженный фронт из-за отмеченной выше конструктивной особенности ДФЛ. На [рис. 6г](#) этот импульс выключается, не достигая амплитудного значения, и содержит, фактически, фронт и спад в силу ограниченной длительности управляющего пучка. Продemonстрированная методика управления разрядника сильноточным пучком может быть транслирована для запуска нескольких ДФЛ с пикосекундной относительной точностью. Для этого нужны «не менее синхронные» электронные пучки, которые, как показал эксперимент [\[50**\]](#), могут быть получены с независимых ВЭЭ-катодов, питаемых расщеплённым высоковольтным импульсом с субнаносекундным фронтом, причём с небольшой расстройкой синхронизации из-за деградации эмиссионной способности при тренировке на частоте повторения [\[4*\]](#).

2. Инициирование и управление эмиссией в сильноточных диодах

После пионерского эксперимента по получению субнаносекундного сильноточного пучка в вакуумном диоде с холодным катодом [\[16\]](#) стал актуален вопрос о возможности инициирования ВЭЭ и динамике перехода к ней от автоэлектронной эмиссии на временных интервалах < 1 нс. В диссертации соискателя [\[27\]](#) были представлены экспериментальные результаты [\[51**\]](#), где установлено, что режим генерации сильноточного электронного пучка с длительностью ≤ 200 пс в значительной степени определяется процессом предварительного АЭЭ-инициирования взрывоэмиссионного катода за время воздействия предимпульса напряжения в десятки доли- единицы наносекунд. Применение описанных выше систем синхронизации драйверов, формирования субнаносекундных высоковольтных импульсов, а также широкополосных датчиков напряжения, тока пучка и цифровых осциллографов с пикосекундным разрешением позволило подойти к вопросам инициирования и развития ВЭЭ процессов [\[52\]](#) на качественно новом уровне. В экспериментах использовалась одноканальная установка или два синхронизированных драйвера ([рис. 7а](#)), подающие на катод КДМИ ([рис. 7б](#)) последовательно из двух импульсов. Первый импульс представлял наносекундный предимпульс или субнаносекундный импульс, формируемый с опережением от долей- до сотен наносекунд. Также использовались дуплеты высоковольтных пиков,



Рис. 7. (а) Двухканальная установка, формирующая синхронизированные субнаносекундные импульсы, последовательно подаваемые на КДМИ (б) по Т-образной схеме.

получаемых на выходе ГНЛ [45**]. Подача последовательных импульсов на один и тот же катод отличала наши эксперименты от анализа эффекта двойных импульсов, где плазма в диоде создавалась дополнительным «поджигающим» электродом (см. цитирование в [53]).

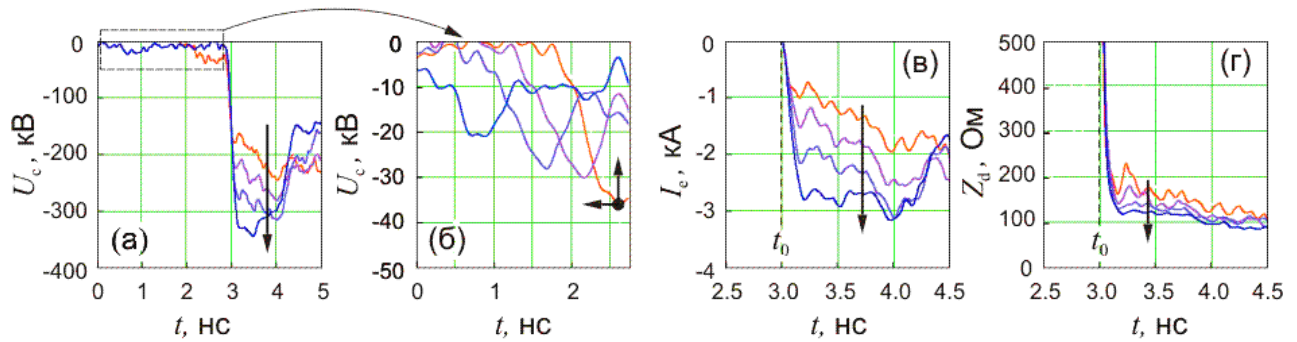


Рис. 8. Импульсы напряжения (а) и предимпульсы (б) на катоде. (в) Эмитируемый ток и импеданс КДМИ (г). Все сигналы восстановлены методом ДР [5*] и имеют абсолютную привязку по шкале времени.

Влияние на эмиссию пучка параметров предимпульса детализировано в одноканальном варианте установки с преобразователем и КДМИ с графитовым трубчатым катодом. Предимпульс спадал по амплитуде, но удлинялся с увеличением зазора обостряющего разрядника (рис. 8а и 8б) [6*]. Осциллограммы тока на рис.8в показывают, что активация катода на предимпульсе приводит к увеличению скорости роста тока. В частности, с удлинением предимпульса, dI_e/dt на фронте (на уровне 0.5 кА) менялась от 15 до 22 кА/нс. По-видимому, с учётом известного правила $j^2 \tau_d \approx const$ [4], реализовывался компромисс между временем перехода от АЭЭ к ВЭЭ (τ_d) и величиной электрического поля на микроэмиттерах, от которого нелинейным образом зависит ток АЭЭ (j). Отметим, что для всех представленных на рис. 8 амплитуд напряжения основного импульса наличие предимпульса приводит к малоинерционной эмиссии килоамперного тока за время порядка 100 пс. Большая скорость активации эмиттеров приводит к тому, что уже через ~ 200 пс огибающие токов (рис.8в) повторяют всплеск и локальный спад фронта напряжения (рис.8а).

Комбинированное влияние на ток КДМИ экспозиции электрического поля, его величины и разлёта ВЭЭ-плазмы после воздействия опережающего импульса напряжения

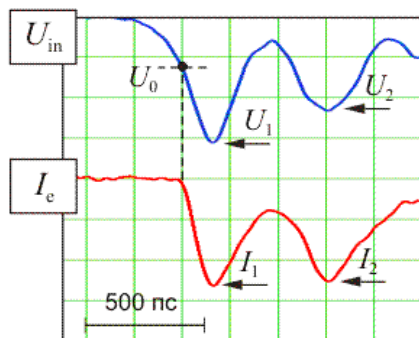


Рис. 9. Эмиссия тока амплитудой ≈ 2 кА с графитового катода при подаче пиков напряжения с задержкой 500 пс. Регистратор тока: коллекторный датчик.

прослеживается в эксперименте, результат которого показан на рис. 9. Когда специального опережающего импульса нет, его роль выполняет первый всплеск напряжения, формируемый в ГНЛ [45**]. При $(U_2/U_1) \approx 0.7$ на втором импульсе эмитруется увеличенный ток: $(I_2/I_1) \approx 1$. Здесь очевидна роль разлёта плазмы на интервале между пиками 500 пс, что при её скорости $v_p \approx 2 \cdot 10^6$ см/с [4] приводит к перекрытию типичного расстояния 10 мкм между агломератами элементарных АЭЭ-центров на графите. По-видимому, также активируется

большее количество ВЭЭ-центров в поле, усиленном расширяющейся положительно заряженной плазмой, из которой «вытягивается» электронный ток. Отмечается инерционность эмиссии катода при наличии подготовленной плазмы: между пиками напряжение падает ниже уровня напряжения первичной активации катода (U_0), но ток при этом не прекращается. Второй важный момент в том, что импульс тока I_1 , возникает при значительном напряжении на катоде ($U_0 \approx -60$ кВ), большем (здесь и ниже - по модулю для отрицательных величин) амплитуды предимпульсов (рис. 8б). Это, в соответствии с правилом $j^2 \tau_d \approx \text{const}$ компенсирует снижение τ_d .

В экспериментах [7*] использовался двухканальный вариант установки, показанный на рис. 7а, и КДМИ с зазором от трубчатого графитового катода с кромкой 100 мкм до анодного сужения 8 мм. В данном случае управляемый разрядник стабилизировал ускоряющий импульс с амплитудой -160 кВ в задержанном канале, а опережающий пик напряжения длительностью ≈ 500 пс и амплитудой $-(45-80)$ кВ поступал по Т-образному соединению с субмикросекундным опережением. Это обеспечивалось настройкой основного промежутка разрядника ДФЛ во втором канале, работавшего в режиме самопробоя, и регулировкой запуска тиристора-коммутатора в первичном контуре ТТ драйвера.

Представленные на рис. 10а экспериментальные данные для давления остаточного газа $5 \cdot 10^{-3}$ Торр демонстрируют ≈ 4 -х кратный рост тока в КДМИ при опережении инициирующего электронного пучка $t_a \approx 300$ нс. За это время прикатодная плазма со скоростью $v_p \approx 2 \cdot 10^6$ см/с заполняет область ≈ 6 мм, то есть, значительную часть промежутка КДМИ (8 мм). Концентрация частиц замагниченного трубчатого пучка с плотностью тока ~ 30 кА/см² и с энергией ≈ 160 кэВ составляет $n_e \approx 10^{13}$ см⁻³, что при указанном давлении много меньше концентрации молекул газа ($n_N \approx 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³). Молекулы могут быть эффективно ионизованы в прикатодной области, где сечения ударной ионизации электронами инициирующего пучка (ещё не набравшего больших энергий) велики. Различие

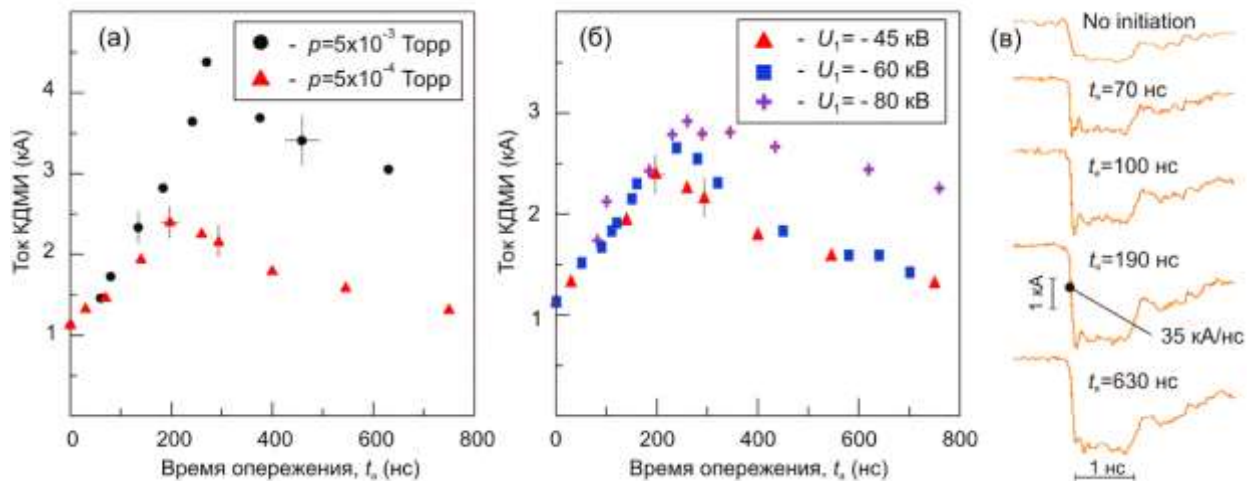


Рис. 10. (а) Ток КДМИ в зависимости от времени опережения инициирующего пучка при различных давлениях остаточного газа. Инициирующий импульс амплитудой 45 кВ. (б) То же самое, но при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Торр и вариации амплитуды инициирующего импульса напряжения. (в) Изменение тока электронного пучка с ростом опережения инициирующего пучка. Инициирующий импульс как в случае (а); давление $5 \cdot 10^{-3}$ Торр.

n_N и n_e показывает, что рост тока и падение импеданса КДМИ возможны из-за нейтрализации заряда пучка в плазменном канале [54], образованном разлетающейся вдоль магнитного поля плотной прикатодной газовой плазмой. При уменьшении остаточного давления газа до $5 \cdot 10^{-4}$ Торр ($n_N \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в зарядовой нейтрализации пучка, по-видимому, доминирует процесс заполнения промежутка КДМИ взрывоэмиссионной плазмой. Действительно, этот процесс оказался чувствителен к амплитуде и длительности опережающего импульса напряжения, ответственного за «наработку» такой плазмы (рис.10б). Описанный режим формирования пучка с зарядовой нейтрализацией позволил получить фронт электронного тока со скоростью нарастания 35 кА/нс (рис.10в). А при увеличении амплитуды опережающего импульса напряжения до -120 кВ вплоть до 55 кА/нс. Последний режим демонстрировался при использовании ускоряющих импульсов в виде дуплета осцилляций с амплитудой ≈ -200 кВ на выходе ГНЛ.

Из предыдущего рассмотрения следует, что давление остаточного газа в условиях предварительного инициирования ВЭЭ процессов на катоде может существенно влиять на параметры тока КДМИ. Заметим, однако, что некоторые вариации возможны и без инициирования, то есть, в течение относительно протяженного (наносекундного) импульса напряжения, поданного на катод. Ток без инициирования катода (это верхний импульс на рис.10в) немного нарастает «на полке» после фронта, в то время как использованный ускоряющий импульс здесь спадал примерно на 5-10% [7*]. То есть, на масштабе ≈ 1 нс продолжалось развитие ВЭЭ процессов. Представлял интерес вопрос о том, какие будут изменения режимов эмиссии с дальнейшим ростом давления? Это интересно в связи с тем, что ухудшение вакуумных условий – это типичный момент при импульсно-периодической работе сильноточных электронных инжекторов [55] из-за дегазации и распыления материала коллектора пучка или других мишеней. Кроме того, при неизменном питающем импульсе высоковольтного генератора вариация тока в КДМИ сопровождается изменением напряжения на ускоряющем промежутке. Например, для вариантов на рис.10в с ростом тока происходит кратное снижение энергии ускоренных электронов, а это неприемлемо,

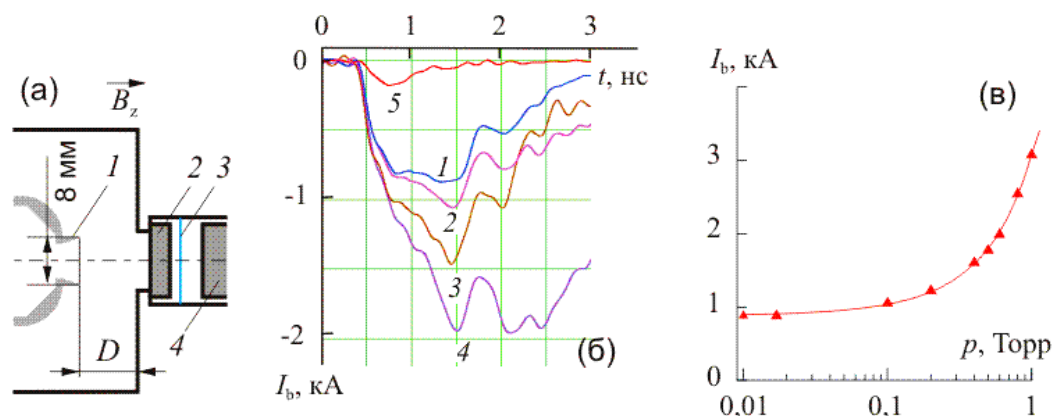


Рис. 11. (а) Конфигурация КДМИ ($D = 0.8$ см и $B_z = 2.1$ Т): 1 – графитовый катод, 2 – сегментный коллиматор пучка, редуцирующий ток в диапазон, приемлемый для датчика, 3 – тонкая фольга, 4 – коллектор датчика тока. (б) Импульсы тока пучка с коллекторного датчика в диапазоне давлений: 1- 0.02 Торр, 2- 0.1 Торр, 3- 0.3 Торр, 4- 0.6 Торр, 5- 0.6 Торр (фильтр с отсечкой по энергии 270 кэВ). (в) Амплитуды тока пучка в диапазоне давлений.

например, для электронных СВЧ генераторов. Отмеченные особенности анализировались в работах [8*, 9*, 10*].

Для конфигурации КДМИ, показанной на рис.11а, было выяснено [9*], что в диапазоне давлений < 0.02 Торр параметры импульса тока пучка (1 на рис.11б) практически не меняются. В диапазоне 0.02-0.1 Торр уже имеются изменения, которые выражаются в росте амплитуды тока примерно на 10% к концу наносекундной «полки» импульса (2 на рис.11б; рис.11в), и эта тенденция нарастает с дальнейшим ростом давления. Причём ток оказывается большим после полки ускоряющего импульса, то есть на его заднем фронте, где напряжение уже невелико. Такое поведение говорило о смене или дополнении механизма эмиссии быстрых электронов за счёт эффектов «газового усиления» тока и стимулировало эксперименты [10*] при дальнейшем повышении давления, но на временах < 1 нс.

Данные экспериментов в диапазоне давлений ($3 \cdot 10^{-2} - 5.5$) Торр представлены на рис.12. При $p > 0.5$ Торр амплитуда субнаносекундного импульса тока начинает нарастать и достигает максимума ≈ 2800 А при $p \approx 3$ Торр. Как показали рефлектометрические измерения, в этом случае импульс напряжения на катоде с начальной длительностью ≈ 400 пс снижается по амплитуде от начальных -220 кВ и укорачивается: срезается задний фронт. Однако его длительность остаётся в диапазоне сотен пикосекунд. При этом отраженный импульс на рефлектограмме с некоторой задержкой меняет полярность. То есть, в газе включаются ионизационные процессы, приводящие к развитию пробоя. Дальнейшее повышение давления $p > 3$ Торр демонстрирует быстрый спад амплитуды и длительности тока пучка (4 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 6 на рис. 12б), и при $p > 6$ Торр ток уже отсутствует или крайне мал на фоне предыдущих значений. Судя по рефлектограммам, в последнем случае возникали распределённые пробои в «газовом» участке передающей линии при доставке импульса напряжения к катоду.

Соавторами работы [10*] были проведены оценки, которые учитывали факт, что при интересующих нас давлениях в единицы Торр и достигаемой средней по промежутку D напряженности электрического поля $U/D > 100$ кВ/см все свободные электроны оказываются

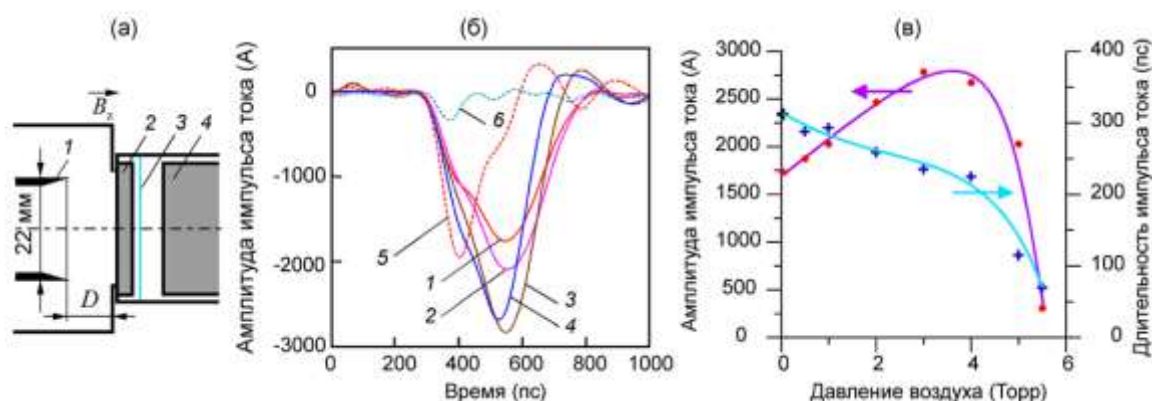


Рис. 12. (а) Конфигурация КДМИ с зазором $D = 1$ см и $B_z = 2.1$ Т. Обозначения, как на рис.11. (б) Импульсы тока КДМИ в диапазоне давлений: 1 - $3 \cdot 10^{-2}$ Торр; 2 - 1 Торр; 3 - 3 Торр; 4 - 4 Торр; 5 - 5 Торр; 6 – 5.5 Торр. (в) Амплитуды импульсов тока пучка и их длительности на полувысоте в диапазоне давлений.

в режиме непрерывного ускорения (убегания) [18]. То есть, при увеличении давления газа наряду с взрывоэмиссионными электронами появляется дополнительный источник электронов - вторичные электроны, возникающие в результате ионизации молекул газа электронным ударом. При пороговой концентрации газа $9.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ за счет взаимодействия первичных ВЭЭ-электронов с газом число быстрых электронов удваивается. Такая концентрация соответствует давлению $p^* = 2.8 \text{ Торр}$, близкому к экспериментальному, где наблюдался резкий рост амплитуды тока. Таким образом, при $0 < p < p^*$ основу потока быстрых электронов составляют ВЭЭ-электроны. При $p = p^*$ масштаб двукратного увеличения числа быстрых электронов близок к расстоянию D , а при $p > p^*$, этот масштаб снижается, и происходит лавинное размножение быстрых (убегающих) электронов. В результате, даже при незначительном превышении давления p^* меняется природа электронов, достигающих анода, а для инициирования ионизации в газе уже достаточно потока АЭЭ-электронов с катода. То есть, для давлений вблизи порога p^* в КДМИ происходит переход от ВЭЭ режима к режиму генерации УЭ.

Бликие по характеру процессы перехода от ВЭЭ к генерации УЭ наблюдались (рис. 13) в радиальном воздушном зазоре коаксиальной ПЛ, где распространялся бегущий импульс напряжения U_{in} [11*]. На центральном электроде был установлен фольговый медный диск (выступ), являвшийся усилителем поля, то есть, катодом. Быстрые электроны регистрировались коллекторным датчиком за тонким окном из алюминиевой фольги диаметром 3 мм во внешнем электроде ПЛ (детальная конфигурация аналогичного эксперимента будет представлена в Разделе 7).

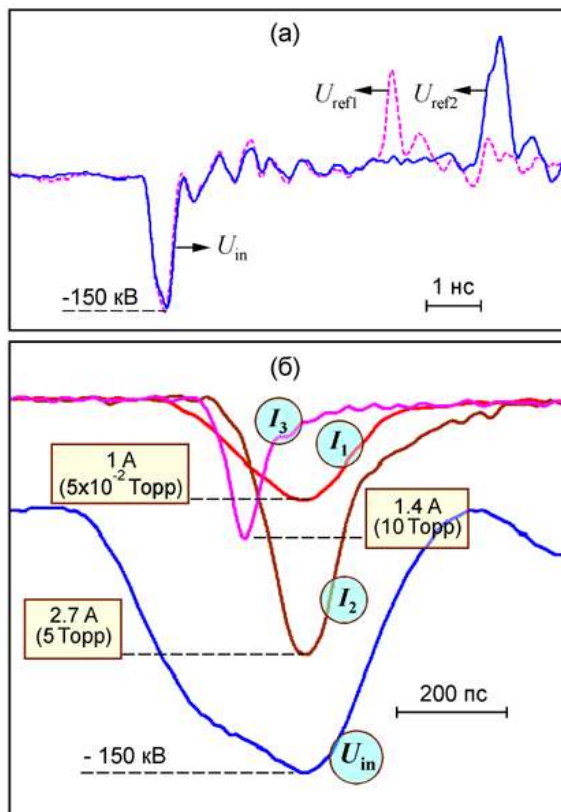


Рис. 13. (а) Рефлектограмма напряжения в коаксиальной ПЛ с КЗ на конце. (б) Токи быстрых электронов от медного усилителя поля при вариации давления.

При $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$ и $U_{in} \sim -150 \text{ кВ}$ (рис. 13а) наблюдается вакуумный ток $I_1 \approx 1 \text{ А}$ (рис. 13б). Эмиссия I_1 начинается на фронте U_{in} при достаточно большом напряжении $\approx -100 \text{ кВ}$, что характерно для медного катода. Поскольку I_1 невелик и плотность остаточного газа мала, то сопротивление ионизированной области в радиальном промежутке большое и отражение на этом участке отсутствует (сплошная кривая на рис. 13а). Поэтому U_{in} проходит до КЗ-конца ПЛ с малой потерей амплитуды (см. U_{ref2} на рис. 13а), как и при отсутствии эмиссии с катода. Резкое увеличение тока (I_2 на рис. 13б) отмечается при $p^* \rightarrow 5 \text{ Торр}$, что несколько выше, чем для коаксиального магнитоизолированного диода (рис. 12б). Это может объясняться отсутствием фокусировки электронов в радиальном промежутке, различием динамики АЭЭ-инициирования ВЭЭ с меди по сравнению с графитом, а также эффектом «полировки» микрорельефа

пластичного медного катода. С повышением давления мы наблюдаем резкое укорочение тока (I_3 на [рис. 13б](#)) и спад его амплитуды, что типично для перехода к режиму эмиссии УЭ. Дальнейший рост давления приводит к развитию пробоя в области, привязанной к катоду, и тогда наблюдается инвертированное отражение U_{ref1} ([рис. 13а](#)).

3. Характеристики КДМИ и эффекты на фронте пучка

Из предыдущего раздела очевидна актуальность задачи определения параметров высоковольтного импульса непосредственно на катоде КДМИ и момента на его фронте, когда АЭЭ переходит в стадию ВЭЭ. Только обладая этой информацией можно говорить о напряженностях макро- и микроскопических полей на эмиссионной кромке, и, тем самым, иметь основания для построения динамических моделей катодных процессов в инжекторах сильноточных пучков и для задания пороговых условий эмиссии при численном моделировании таких задач [\[40\]](#). При субнаносекундной длительности фронта напряжения, отмеченные вопросы нетривиальны, т.к. датчики напряжения и электронного тока удалены от катода, разнесены в пространстве относительно друг друга и их сигналы не могут быть синхронизированы без привлечения дополнительных методик. Кроме того, ток пучка на выходе КДМИ, регистрируемый коллекторным датчиком [\[см. рис. 1б в работе 56**\]](#) (пояса Роговского при $t \ll 1$ нс неприменимы), в общем случае отличается от тока с катода.

В работах [\[5*, 11*\]](#) описана и продемонстрирована эффективная методика для решения обозначенной проблемы – динамическая рефлектометрия. Схема измерений представлена на [рис. 14](#). Регистрируются падающий $U_{in}(t)$ и отраженный $U_{ref}(t)$ импульсы напряжения. Учитывая, что $U_{ref}(t) = K(t)U_{in}(t)$, где коэффициент отражения $K(t) = [Z(t) - \rho] / [Z(t) + \rho]$, импеданс КДМИ определится как $Z(t) = \rho [U_{in}(t) + U_{ref}(t)] / [U_{in}(t) - U_{ref}(t)]$, а напряжение на катode составит $U_c(t) = U_{in}(t) [2\alpha / (1 + \alpha)]$. Здесь $\alpha = \alpha(t) = Z(t) / \rho$, а $\rho = 44$ Ом – волновое

сопротивление ПЛ. Тогда ток с катода рассчитывается по формуле $I_e(t) = 2U_{in}(t) / [Z(t) + \rho]$. Для реализации методики требуется однородность тракта вплоть до катода ($\rho = \text{const}$), неискаженная регистрация $U_{ref}(t)$ и прецизионное измерение задержки между $U_{in}(t)$ и $U_{ref}(t)$.

Чтобы исключить искажение $U_{ref}(t)$, вызванное его наложением на шумовой фон после заднего фронта $U_{in}(t)$, используются два идентичных емкостных делителя напряжения D_1 и D_2 [\[57**, 58**\]](#) ([рис.14,а](#)). Делители последовательно расположены в однородной ПЛ. Неискаженный сигнал $U_{ref}(t)$ определяется обработкой осциллограмм ([рис. 14б](#)) с делителей D_1

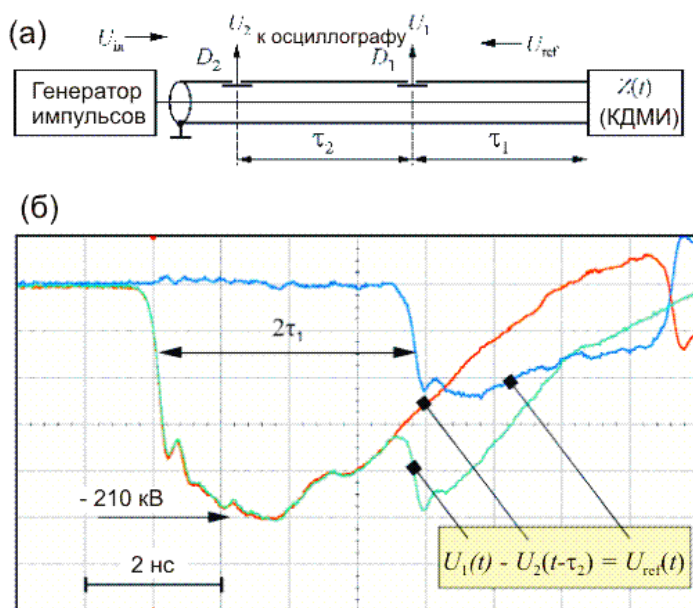


Рис. 14. (а) Схема ДР-измерений. (б) Полученные за один импульс сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t - \tau_2)$ с датчиков D_1 и D_2 и отражение $U_{ref}(t)$ от КДМИ.

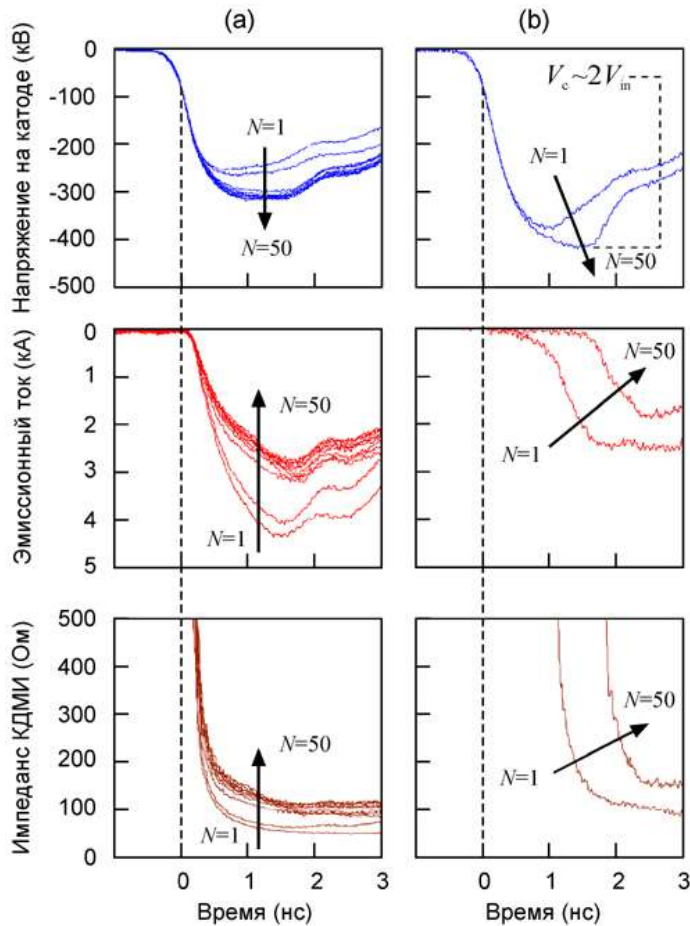


Рис. 15. Характеристики КДМИ с катодом из графита (а) и нержавеющей стали (б) при тренировке 50-импульсами ($N=1-50$). $B_z \approx 2$ Тл.

интервале 3 нс, а импеданс КДМИ стабилизируется через ≈ 1.5 нс.

В отличие от графита, взрывная эмиссия со стали развивается гораздо медленнее (рис. 15б) и деградирует при тренировке из-за «полировки» микрорельефа (центров АЭЭ) [12*]. Задержка ВЭЭ нарастает до ≈ 1 нс за $N=50$ включений, и этот эффект был использован в работе [13*] для подавления обратного электронного тока, возникающего в КДМИ с поверхности стального катодного электрода (ПЛ на рис. 16а). В этих экспериментах нарастающая задержка ВЭЭ в стальной ПЛ на сотни пикосекунд наблюдалась при питании КДМИ обостренным импульсом после ГНЛ с умеренно подмагниченным ферритом (рис. 4б). Суммирование $U_{in}(t)$ и $U_{ref}(t)$ на участке ПЛ $z = 0-3$ см позволило рассчитать динамику трансформации электрического поля ($E_{max}=1.2$ МВ/см на рис. 16б), которое к моменту начала ВЭЭ уже достигало 1 МВ/см.

Метод ДР позволяет с точностью в единицы пикосекунд сравнить момент появления тока ВЭЭ для КДМИ с острокромочным графитовым катодом (≈ 100 мкм, рис. 16а) при различных скоростях нарастания напряжения (рис. 17а и 17б). Для этого в экспериментах [3*] использованы импульсы напряжения (рис. 4б) без предимпульсов. Виден сдвиг момента и увеличение напряжения начала ВЭЭ на обостренном фронте, что соответствует упомянутому условию $j^2 \tau_a \approx const$ [4]. Уменьшение τ_a в ≈ 1.5 раза (закрашено на рис. 17а и 17б) компенсируется меньшим изменением напряжения, задающего электрическое поле, от

и D_2 , которые совмещаются по фронту. Это сигнал $U_{ref}(t) = U_1(t) - U_2(t - \tau_2)$. Интервал корректного восстановления формы $U_{ref}(t)$ задаётся задержкой $2\tau_2$. Чтобы рассчитать $U_c(t)$, $Z(t)$ и $I_e(t)$ по приведённым выше формулам, нужно обеспечить синхронизацию $U_{in}(t)$ и $U_{ref}(t)$, для чего в режиме холостого хода КДМИ при пониженном напряжении определяется задержка τ_1 .

В работах [5*, 11*] возможности метода ДР показаны на примере характеристик КДМИ (рис. 15), где использовались «свежие» трубчатые катоды диаметром 7.5 мм из плотного графита (МПГ-6) или из нержавеющей стали, имевшие полутороидальные кромки с радиусами 0.5 и 1.2 мм, соответственно. Применён один и тот же импульс формирователя с ГНЛ без подмагничивания феррита (рис. 4б). Видно (рис. 15а), что эмиссия с графита стабильна, но только через десятки включений ток воспроизводится на

которого экспоненциально зависит ток АЭЭ. Важной характеристикой КДМИ в случае быстрого фронта напряжения является высокая скорость нарастания тока. Примерно через 100 пс с момента начала ВЭЭ мы получаем темп ≈ 12 кА/нс и ток ≈ 1 кА (рис. 17г). Это свидетельствует о малой инерционности графитового катода. Плазма ВЭЭ центров-лидеров

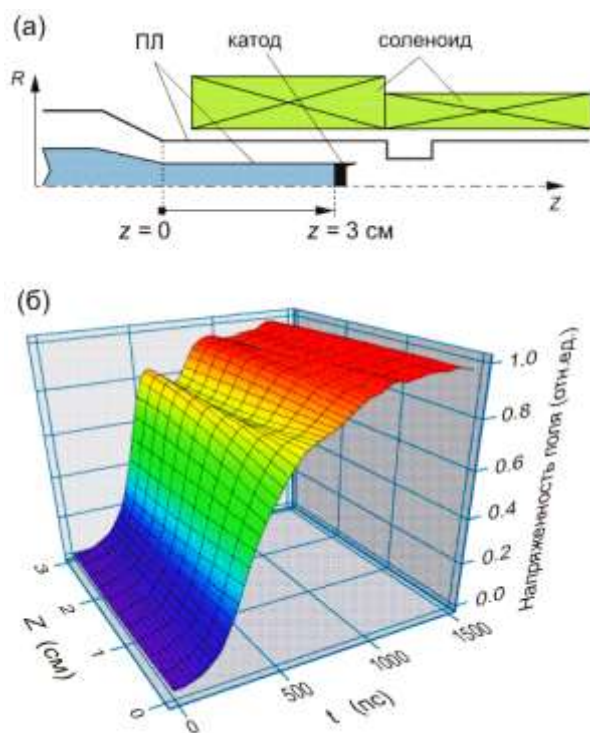


Рис. 16. (а) Конфигурация КДМИ с диаметром катода 7.5 мм. (б) Динамика трансформации напряженности электрического поля на катододержателе (ПЛ) при питании катода обостренным импульсом после ГНЛ (рис. 46).

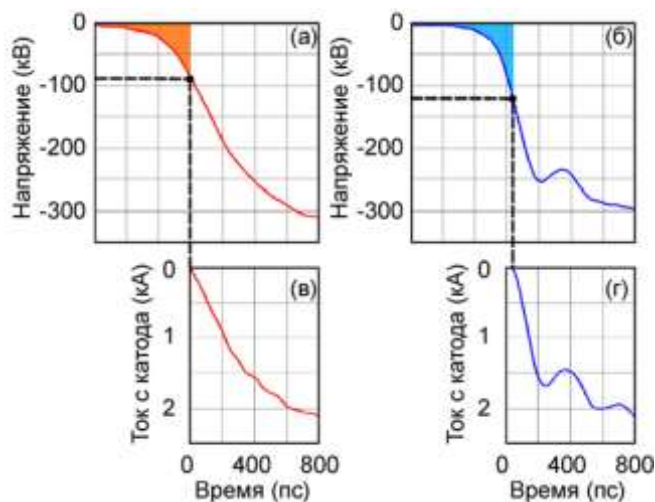


Рис. 17. (а), (б) Восстановленные с помощью ДР осциллограммы катодного напряжения с различной крутизной фронта и соответствующие токи КДМИ (в) и (г). $B_z \approx 2$ Тл. Зазор диода 5.5 мм.

со скоростью $2 \cdot 10^6$ см/с за время 100 пс «накрывает» области ≈ 2 мкм, и поэтому в достаточно сильном магнитном поле $B_z \approx 2$ Тл экранировка соседних АЭЭ-центров взрывоэмиссионным током с границы плазмы неэффективна, в результате чего за десятки пикосекунд они также переходят в стадию ВЭЭ.

В работе [2*] соавторами соискателя была рассмотрена аналитическая модель КДМИ, описывающая усредненное макроскопическое поле на эмиссионной кромке графитового катода, и получены зависимости тока и импеданса от времени, которые в целом подтверждаются в ДР - измерениях с обостренным импульсом напряжения на катоде. Как в модели, так и в эксперименте показано, что импеданс КДМИ выходит на квазистационарное значение примерно через 1.5 нс после возникновения ВЭЭ. На временах, превышающих 0.5 нс, для трубчатого катода с эмиссионной кромкой радиусом 0.5 мм были получены зависимости импеданса от величины продольного магнитного поля в КДМИ (рис.18). Использовались импульсы катодного напряжения с фронтами разной длительности, как на рис.17. Различия зависимостей $Z(B_z)$ для разных фронтов хорошо заметны в течение первой наносекунды и практически исчезают через 1.5 нс. Однако при $t > 1.5$ нс кривые $Z(B_z)$ немонотонные – с максимумом при $B_z \approx 1$ Тл. Такое поведение мы связываем с зависимостью от B_z пространственных

масштабов экранировки АЭЭ-центров током центров-лидеров [59] в совокупности с динамикой разлёта плазмы ВЭЭ-центров. При $B_z < 1$ Тл, когда радиус циклотронных осцилляций электронов превышает радиальный зазор КДМИ, говорить о магнитной экранировке эмиссионной кромки не приходится, так как электроны из активных центров не возвращаются к поверхности эмитирующего пояaska на катоде. С приближением к полю $B_z \approx 1$ Тл экранировка из-за снижения радиуса осцилляций электронов проявляется, и в зависимости $Z(B_z)$ возникает максимум. Затем, при $B_z > 1$ Тл активных центров становится больше, из-за разлёта плазмы эмиссионная поверхность становится однородной и зависимость импеданса КДМИ от B_z стабилизируется.

Представим типичные эффекты, связанные с субнаносекундной длительностью фронтов ускоряющих импульсов и тока ВЭЭ-пучков. Как отмечалось в начале настоящего Раздела, эмиссионный ток катода по методу ДР и ток субнаносекундного пучка на выходе КДМИ в общем случае отличаются. Поскольку ВЭЭ начинается при напряжениях от десятков до сотни киловольт, фронт электронного тока (рис. 17г) оказывается короче фронта напряжения (рис. 17б) уже вблизи эмиссионной кромки катода.

Время ускорения электронов в типичном зазоре до анодного сужения (рис. 16а) $d \approx 1$ см сравнимо с длительностью фронта напряжения. Из-за большой скорости нарастания напряжения на катоде, достигающей при использовании преобразователя с обостряющим разрядником $(1 \div 2) \cdot 10^6$ В/нс, ускорение приводит к эффекту «гандикапа»: поздние электроны, эмитированные при большем напряжении на промежутке, будут догонять ранние, которые более медленные. В результате реализуется эффект кинематического обострения фронта тока пучка, то есть, компрессия заряда. При одном и том же ускоряющем импульсе обострение тока более выражено с удлинением зазора d [3*]. Компрессия заряда продолжает нарастать и после ускорения в КДМИ, то есть на последующем участке дрейфа в продольном магнитном поле. Это наиболее характерно для электронов, эмитированных на иницилирующем ВЭЭ предимпульсе или в самом начале быстрого фронта напряжения. На рис. 19 представлен эксперимент [14*], где в процессе дрейфа формируется всплеск на фронте тока. Всплеск по уровням 0.1-0.9 нарастает за ≈ 55 пс, и поэтому регистрационная система (коллектор, кабель, осциллограф, и т.д.) занижает его амплитуду. С учётом калибровки этих компонент тестовым

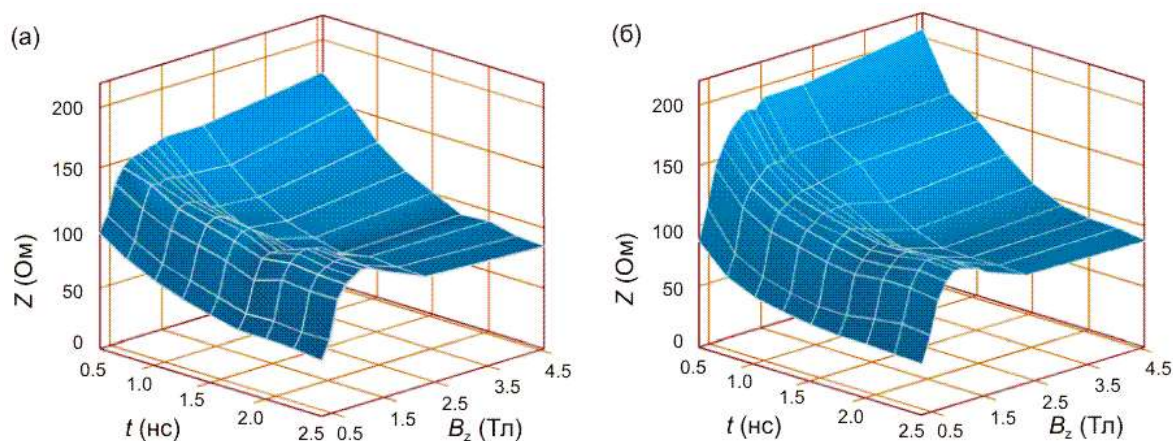


Рис. 18. Изменение импеданса КДМИ с графитовым катодом (радиус полутороидальной кромки 0.5 мм) в различные моменты времени при вариации индукции магнитного поля. (а), (б) Питание импульсами напряжения как на рис.17 (б) и 17 (а), соответственно.

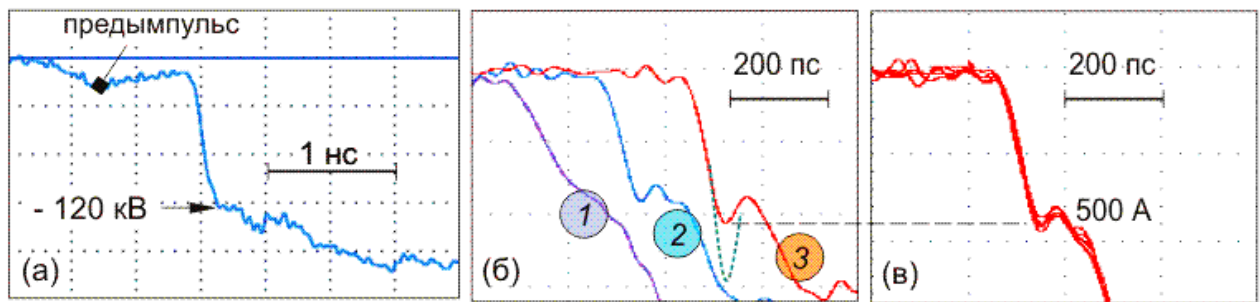


Рис. 19. (а) Ускоряющий импульсы на 45-омном выходе преобразователя. (б) 1 - фронт тока пучка за анодным сужением и при увеличении дистанции дрейфа с 25 до 57 мм (2, 3). (в) Воспроизводимость фронта 3 от импульса к импульсу.

импульсом реальную амплитуду всплеска следует увеличить, как это показано пунктиром.

Сильноточные замагниченные пучки, формируемые при питании катода импульсами напряжения с субнаносекундным фронтом (2 и 3 на рис. 3в) востребованы для генерации мощных микроволновых импульсов миллиметрового диапазона длин волн. Здесь важна

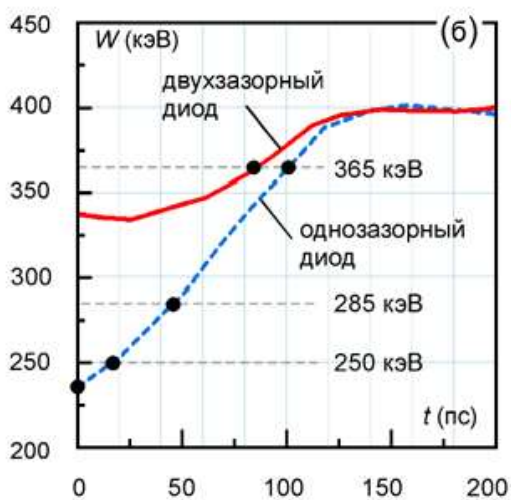
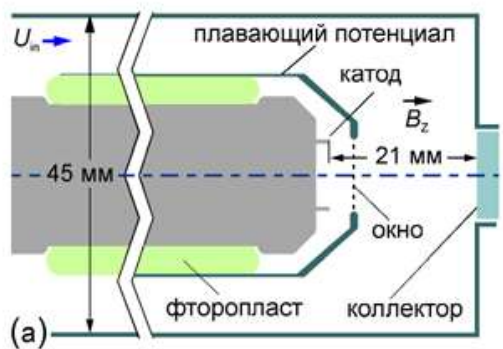


Рис. 20. (а) Схема двухзазорного КДМИ. (б) Энергии на фронте пучков в диодах с одним и двумя промежутками: расчёт методом пробных частиц [40] (кривые) и измерения коллекторным датчиком с фильтрами (точки).

задача снижения разброса энергии пучка, источником которого является неравномерность полки и нестабильность амплитуды ускоряющего импульса (это вопросы техники формирования импульсов), а также эмиссия электронов, распределённая практически по всему фронту. Физические аспекты последней проблемы рассмотрены выше, и, казалось бы, непреодолимы. Например, в пределе удлинённого фронта (много больше времени ускорения), разброс энергий пучка составит $e(U_{\max} - U_0)$, где $U_{\max}$ – амплитуда напряжения, U_0 – пороговое напряжение возникновения ВЭЭ, e – элементарный заряд. Как показали предварительные эксперименты, при питании «классического» КДМИ (с одним ускоряющим промежутком) импульсом 3 на рис. 3в, разброс энергий на фронте пучка у анодного сужения достигал $\approx 40\%$. Однако, в работе [15*] нами была реализована схема КДМИ с разделением функций эмиссии и ускорения пучка в двух последовательных промежутках. Такая конструкция призвана уменьшить фракцию низкоэнергетических электронов на фронте пучка. Диод с двумя промежутками был запитан импульсом 3 на рис. 3в по связанным коаксиальным линиям с общим электродом под

плавающим потенциалом (рис. 20а), расщепляющий этот импульс на два независимых. В отличие от КДМИ с одним промежутком, электроны стартуют при гораздо меньшей вариации напряжения на фронте импульса, задержанного во внутреннем фидере с диэлектрической вставкой. При ускорении во втором промежутке при амплитудном напряжении опережающей волны из внешнего фидера, вариация энергии электронов на фронте снизилась до $\approx 15\%$. Это показано в расчётах и при регистрации тока пучка после фильтров (рис. 20б). В экспериментах [15*] также было отмечено, что фронт пучка после ускорения до анода обостряется.

Повышение внимания к сильноточным пучкам с предельно короткими фронтами было в значительной мере связано с проблемой получения СВЧ генерации с фазой, воспроизводимой от включения к включению или идентичной в нескольких параллельных генераторных каналах. После экспериментов [46,47**] был проведён детальный анализ стабилизации фазы релятивистской ЛОВ 3-сантиметрового диапазона длин волн [60], где показано, что условием такого режима является наличие мощного затравочного ЭМ сигнала, связанного с субнаносекундным фронтом тока пучка. В наших экспериментах [16*] применение осциллографа с полосой 59 ГГц и ГНЛ для преобразования импульса драйвера РАДАН-303 позволило проанализировать ЭМ шумы замагниченного сильноточного

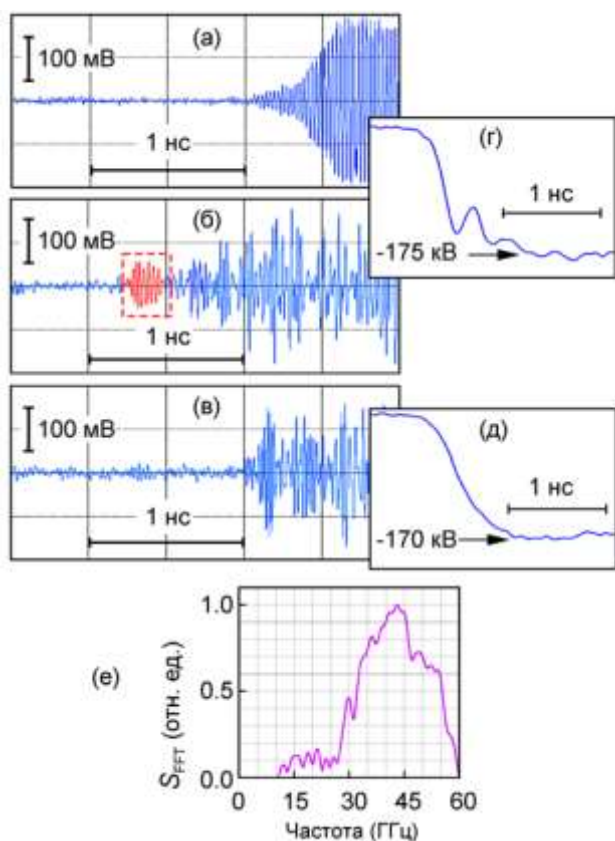


Рис. 21. ЭМ шумы фронта пучка (б) с привязкой к радиоимпульсу СВЧ генерации ЛОВ (а) при обострённом фронте импульса напряжения на катоде (г). (в) ЭМ шумы при плавном фронте напряжения (д). (е) Спектр лидирующего всплеска шумов в случае (б).

электронного пучка. На субнаносекундном фронте пучка с помощью коллектора высокого временного разрешения и коллиматора с узкими радиальными щелями не было обнаружено ВЧ модуляции тока из-за дискретности взрывной электронной эмиссии катода. В эксперименте был применён оригинальный метод привязки наблюдавшихся более низкочастотных ЭМ шумов к фронту напряжения на катоде по задержке возбуждения релятивистской ЛОВ диапазона частот 38 ГГц (рис. 21а) [65]. Для этого радиосигнал ЛОВ с мощностью ≈ 100 МВт подавлялся поглотителями более, чем на три порядка (для получения амплитуд СВЧ осцилляций, сравнимых с шумовыми), а положение приёмной антенны не менялось. Так в реальном времени был впервые зарегистрирован лидирующий широкополосный ЭМ сигнал (выделен пунктиром на рис. 21б), связанный с обостренным фронтом пучка (и напряжения питания катода, показанного на рис. 21г). Поскольку его спектр (FFT на рис. 21е) перекрывал полосу генерации ЛОВ, то это

возмущение представляет «затравку» для возбуждения генерации в черенковских СВЧ приборах.

4. Источники мощных наносекундных СВЧ импульсов

Как отмечалось во Введении, пионерские эксперименты [9] по генерации мощных СВЧ импульсов диапазона 10 ГГц наносекундной длительности в релятивистской ЛОВ стали стимулом развития исследований физики и техники формирования магнитоизолированных релятивистских сильноточных электронных пучков в аспекте задач СВЧ электроники больших мощностей [61, 62, 63]. После эксперимента [64] и теоретического анализа переходного процесса ЛОВ [65] стало очевидно, что для генерации в 8-мм диапазоне длин волн и создания более высокочастотных приборов этого типа [66] применимы пучки с длительностью в единицы наносекунд, формируемые компактными ускорителями на основе драйверов РАДАН [26].

Достаточно быстро (в масштабе 50-летней истории исследований релятивистских ЛОВ) выяснилось, что коротковолновые ЛОВ с «классической» схемой [9] (рис. 22а) при использовании драйвера РАДАН-303 не только обеспечивают импульсно-периодическую (10 Гц) генерацию излучения с мощностью в десятки мегаватт [67**], но также позволяют проводить исследования режимов генерации для их сравнения с теоретическими представлениями. На рис. 22г представлена типичная зависимость мощности генерации 8-мм ЛОВ (рис. 22а) от ведущего магнитного поля [67**], где имеются две области: до- и после зоны циклотронно-резонансного поглощения при $B_z \approx 3$ Тл. Для анализа установления режима генерации (квазистационарного, автомодуляционного или стохастического [65]) интерес представляли оба этих диапазона магнитных полей. В экспериментах особое внимание уделялось специфике регистрации импульсов излучения с использованием детекторов СВЧ на горячих носителях [68]. Например, при относительно невысоком временном разрешении детектора (~ 1 нс) можно получить лишь приблизительную информацию о форме огибающей импульса ЛОВ (рис. 23а) [17*]. В эксперименте [69] аналогичный импульс регистрировался на порядок более быстрым детектором, как показано на рис. 23б. Между тем, наблюдаемые при $B_z \approx 1.7$ Тл глубокие осцилляции мощности не

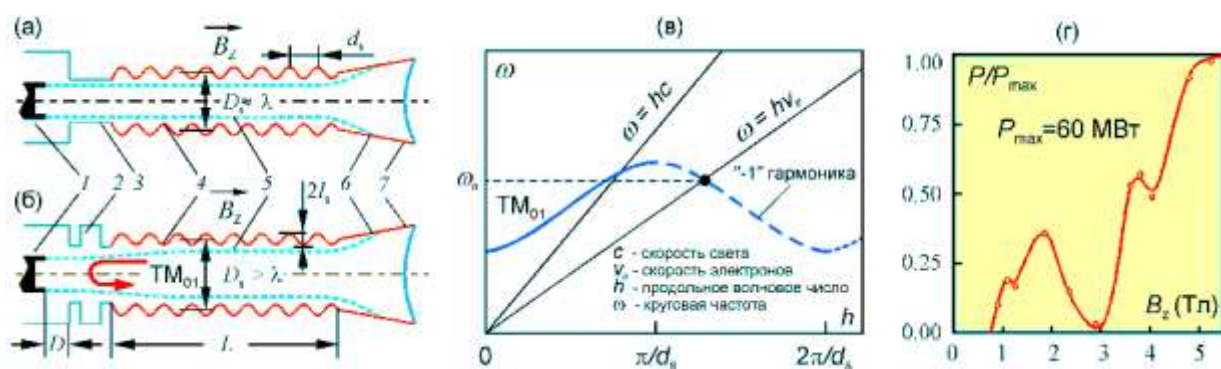


Рис. 22. (а, б) Варианты релятивистских ЛОВ: 1 – катод; 2 – резонансный рефлектор; 3 – запредельный волновод; 4 – гофрированная замедляющая система; 5 – трубчатый пучок; 6 – коллектор пучка; 7 – рупорная антенна с вакуумным окном. (в) Дисперсионная зависимость ЗС. (г) Мощность генерации 8-мм ЛОВ (а) в зависимости от ведущего магнитного поля.

могут быть отнесены к стохастическому режиму в силу хорошей повторяемости сигналов. Действительно, авторы [69] провели полномасштабное численное моделирование [40], из которого следовало, что причиной является не автомодуляция [65], а периодический сброс пучка полями СВЧ на стенку замедляющей системы.

В работе [18*] представлен эксперимент, где проведён анализ установления режима генерации релятивистской ЛОВ диапазона 8-мм волн в сильном ведущем магнитном поле 5 Тл, когда сброса пучка на стенку ЗС не происходит. Варьировались два параметра: крутизна фронта напряжения, питающего катод, и длина замедляющей системы (в 1.7 раза). Из данных, представленных на рис. 23в и 23г следует, что обострение фронта как и удлинение ЗС приводят в полном соответствии с [65] к возникновению модуляции огибающей детектированного СВЧ сигнала. Для короткой ЗС рабочий ток пучка ($I_{op} \approx 1.6$ кА) превосходил стартовый (I_{st}) в 4 раза, что несколько больше оптимального соотношения [65]. Поэтому небольшая модуляция огибающей СВЧ (рис. 23в-I) наблюдалась без дополнительного обострения напряжения (и тока пучка). При обострении модуляция усиливалась (рис. 23г-I), и в этом случае для удлинённой ЗС, когда при неизменном I_{op} выполнялось $(I_{op}/I_{st}) \approx 20$, наблюдался выраженный стохастический режим (рис. 23г-II) с модуляцией, близкой к 100%. Таким образом, наблюдавшиеся трансформации режимов генерации ЛОВ согласуются с теорией, которая обосновывает их зависимость от параметра (I_{op}/I_{st}) и природы начальной затравки: дробовой шум на плавном фронте тока или мощный ЭМ сигнал при его обострении (рис. 22).

Дальнейшие исследования режимов генерации мультимегаваттных СВЧ импульсов 8-мм диапазона выполнялись с применением релятивистских ЛОВ с модифицированной схемой (рис. 22б), предложенной в работе [70]. Замедляющая система прибора имеет увеличенное поперечное сечение, сохраняя селективность возбуждения низшей симметричной волны TM_{01} . Несколько увеличен масштаб радиального спада синхронной пучку -1-й гармоники волны (рис. 22в) от стенки ЗС. В сочетании с профилированием траектории пучка за счёт декомпрессии магнитного потока соленоида, когда снижаются поперечные осцилляторные скорости электронов, облегчается проводка более тонкостенного

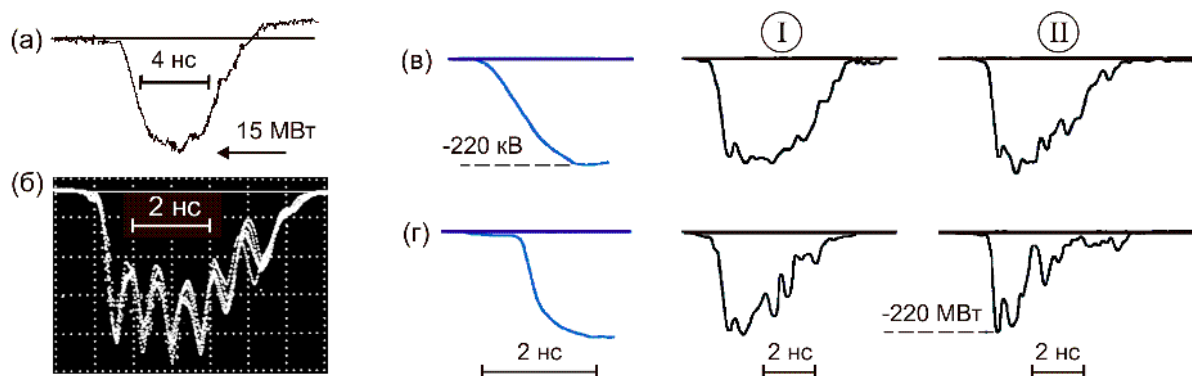


Рис. 23. (а, б) Сигналы с детекторов различного временного разрешения СВЧ импульсов ЛОВ при $B_z \approx 1.7$ Тл. (в, г) Фронты ускоряющих импульсов разной длительности и СВЧ импульсы с «быстрого» детектора при $B_z \approx 5$ Тл для двух вариантов замедляющих систем. ЗС в случае II длиннее в 1.7 раза. Регистратор: (а,в,г) – С7-19 (5 ГГц); (б) – Tektronix -7250 (6 ГГц).

трубчатого пучка вдоль ЗС, что важно для коротковолнового прибора. Кроме того, взамен запредельного волновода-отражателя перед входом в ЗС используется резонансный рефлектор, не препятствующий проводке пучка, и выполняющий функцию предварительной модуляции электронного потока на рабочей частоте ЛОВ.

Как показали эксперименты [71, 72**], при использовании SOS драйвера и преобразователя [45**] релятивистская ЛОВ 8-мм диапазона длин волн (рис. 226) с ЗС оптимальной длины и $D_s \approx 1.3 \lambda$ обеспечивает в слабых магнитных полях (до циклотронного резонанса) квазистационарную генерацию наносекундных СВЧ импульсов с пиковой мощностью 150-170 МВт и электронным к.п.д. 30-35%. С применением питания катода комбинацией РАДАН-303+ГНЛ продолжены исследования влияния крутизны фронта напряжения на параметры СВЧ генерации. В частности, для ЛОВ с удлинённой ЗС в нестационарном режиме при обострённом фронте пучка генерация возникала раньше на сотни пикосекунд (рис. 24а) [14*]. Контролируемое методом ДР изменение напряжения на катоде при вариации амплитуды импульса драйвера или величины ускоряющего промежутка КДМИ (D на рис. 226) позволило в работе [19*] наблюдать электронную перестройку частоты генерации ЛОВ с пиковой мощностью порядка 100 МВт (рис. 24б и 24в), что демонстрирует замечательную особенность этого прибора – адаптивности к изменениям энергии пучка.

В работах [19*, 20*] проанализирован метод перестройки времени переходного процесса, режима и несущей частоты генерации 8-мм ЛОВ при вариации сопротивления связи трубчатого пучка с синхронной -1-й гармоникой волны TM_{01} [65]. Это достигается изменением диаметра пучка. Идея заключалась в использовании вариации времени диффузии магнитного поля импульсного фокусирующего соленоида через металлические стенки с различной проводимостью. В конструкциях ЛОВ, показанных на рис. 22, стенка корпуса КДМИ из немагнитной стали, а ЗС изготовлена из меди. Как видно на рис. 25а, отношение магнитных полей в КДМИ и внутри ЗС могут варьироваться в широких пределах за счёт перестройки синхронизации пучка и субмиллисекундного импульса магнитного поля.

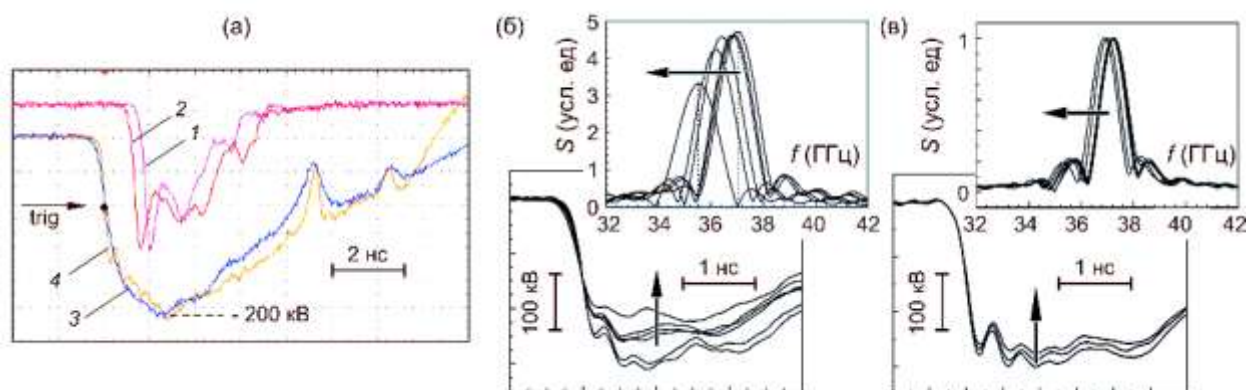


Рис. 24. (а) СВЧ-импульсы 8-мм ЛОВ (1,2) формируемые при питании катода импульсами напряжения с плавным и обострённым фронтом (3,4, соответственно). (б) Вариация спектра (FFT) радиоимпульса ЛОВ при изменении выходного напряжения драйвера РАДАН-303+ГНЛ. (в) Вариация спектра (FFT) радиоимпульса ЛОВ при снижении ускоряющего напряжения за счёт уменьшения промежутка КДМИ (D на рис. 226) от 8 до 3 мм.

Обратим внимание, что в точке пересечения зависимостей $B(t)$ влияние различия времён диффузии на профиль силовой линии магнитного поля скомпенсировано, и именно эта точка представляет интерес для сравнения СВЧ генерации в экспериментах с численными моделями [40]. На рис. 25б представлено качественное изменение силовой линии (и траектории пучка) слева и справа от точки пересечения $B(t)$. В эксперименте при вариации синхронизации «вправо» постепенное удаление пучка от стенки ЗС приводит к падению его связи с синхронной гармоникой волны. Это снижает мощность генерации и удлиняет переходной процесс (рис. 25в). В то же время потенциал пучка относительно заземлённой стенки ЗС возрастает, и энергия электронов снижается. В результате мы наблюдаем изменение частоты генерации более чем на 600 МГц (рис. 25г).

Опыт управления параметрами и качеством трубчатых пучков за счёт снижения поперечных скоростей при профилировании траектории (рис. 22б), обострения фронта, перестройки амплитуды ускоряющих импульсов (рис. 24) и прецизионной вариации диаметра пучка (рис. 25а) позволил провести исследования генерации коротковолнового излучения ($\lambda \approx 4$ мм) в приборе (рис. 26а) с черенковским механизмом электронно-волнового взаимодействия и с замедляющей системой увеличенной сверхразмерности поперечного сечения ($D_s \approx 2.5 \lambda$, рис. 26б и 26в) [21*, 22*]. В работах [71, 74] с прототипами приборов диапазонов длин волн 3 см и 8 мм (применялись ускорители СИНУС-7 и СИНУС-200), пучок (рис. 26г) в ЗС мог взаимодействовать сразу с двумя симметричными волнами: с TM_{02} – на -1-й гармонике, а с TM_{01} рабочая точка синхронизма смещена к области π/d_s (рис. 22в). Волна TM_{02} обеспечивает обратную связь в приборе, в то время как энергообмен происходит в основном с поверхностной волной TM_{01} (рис. 26д).

При питании импульсом, показанным на рис. 26е, максимальное ускоряющее напряжение на катоде достигало 270-280 кВ при токе электронного пучка до 2.6 кА. На этом же рисунке представлен достаточно стабильный СВЧ сигнал, полученный в детекторных измерениях после тщательной юстировки пучка. С учётом отклика калориметра за один

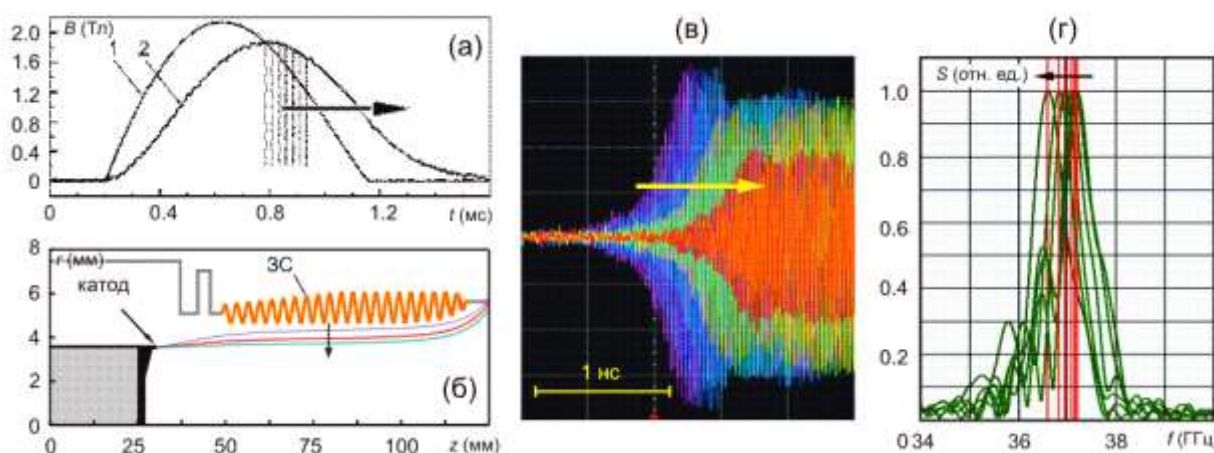


Рис. 25. (а) Сигналы с индукционного датчика импульсного магнитного поля в области КДМИ (1) за стальной стенкой и внутри ЗС из меди (2). (б) Качественная картина изменения силовой линии магнитного поля (и траектории пучка) при смещении синхронизации ускорителя с импульсом магнитного поля (а). Трансформация радиоимпульсов ЛОВ (в) и их автоформированных спектров (FFT) (г) при удалении пучка от стенки ЗС.

импульс в диапазоне 90-110 мДж и длительности огибающей детектированного сигнала на полувысоте 1.3 нс, получено пиковое значение мощности $\approx 70\div 85$ МВт, что неплохо согласовывалось с численным моделированием (≈ 100 МВт). Предварительные оценки частоты генерации ($70.9\div 75.8$ ГГц) сделаны по частотам отсечки волноводных фильтров в тракте детектора. Так как осциллограф с полосой > 70 ГГц для регистрации радиосигнала отсутствовал, то точное значение частоты определено в измерениях со смесителем, имевшим несущую частоту опорного сигнала (гетеродина) 77.7 ГГц. Спектральный максимум разностного сигнала (рис. 26е) составил 5.44 ГГц (рис. 26ж) и поэтому частота СВЧ импульса была $77.7 - 5.44 = 72.16$ ГГц, в соответствии с ожидаемой.

Приведённые выше примеры вакуумных СВЧ генераторов диапазона миллиметровых волн с сильноточными пучками характеризуются достаточно узкими спектрами излучения, естественная ширина которых определяется большим (от десятков до сотни) количеством осцилляций в составе наносекундных радиоимпульсов. В то же время, для ряда прикладных задач востребованы широкополосные импульсы излучения, допускающие перестройку центральной частоты до нескольких октав (то есть, в несколько раз между верхним и нижним пределами). Наряду с известными возможностями перестройки частоты вакуумных гирорезонансных приборов за счёт вариации магнитного поля (см. цитирование в [75, 76]), некоторые варианты предоставляют устройства с черенковским пучково-плазменным взаимодействием (плазменные мазеры (ПМ)), где рабочая частота излучения определяется плотностью плазмы [77], которую можно менять.

Чтобы обеспечить работу ПМ в режиме широкополосного усиления шумов, требуется подавить режим самовозбуждения узкополосной генерации, то есть, устранить обратную связь. Для этого обычно используют СВЧ поглотители, которые, однако, не могут быть эффективными на всех частотах, различающихся на октавы. Альтернативу представляет однопроходный режим взаимодействия с плазмой короткого пучка, когда обратная связь принципиально невозможна. Именно такой вариант был реализован в эксперименте [23*], где применён 2-нс ускоряющий импульс (2 на рис. 36). Схема ПМ инвертированной

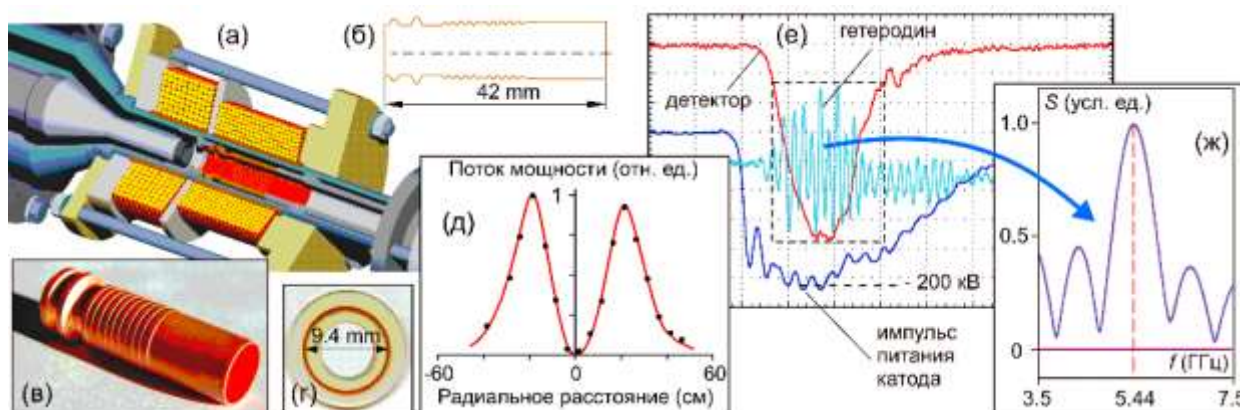


Рис. 26. (а) Конструкция двухволнового генератора диапазона частот ≈ 72 ГГц. (б,в) Сечение и внешний вид ЗС. (г) Автограф трубчатого пучка на входе ЗС. (д) Пространственное распределение потока мощности волны TM_{01} на дистанции 3.5 м. (е) Импульс напряжения, подаваемый на катод, сигналы с СВЧ детектора и с гетеродина. (ж) Спектр разностного сигнала.

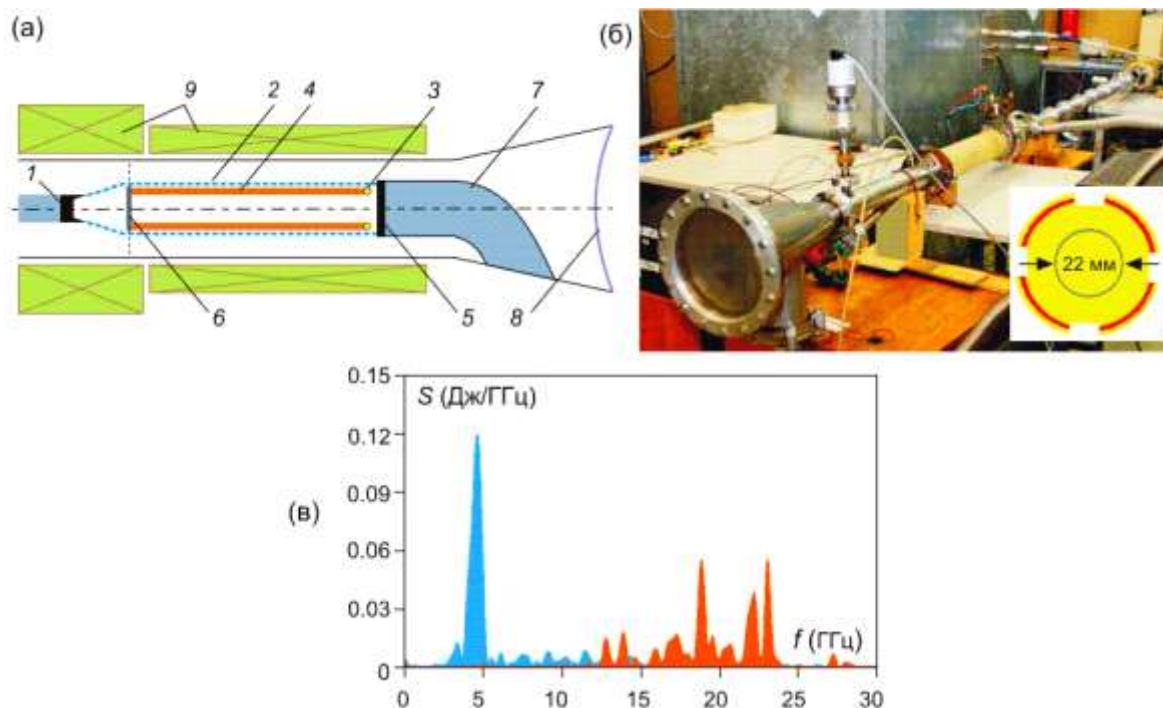


Рис. 27. (а) Схема ПМ: 1 -ВЭЭ-катод; 2 –пучок; 3 –термокатод; 4 –плазма; 5,6 –коллекторы; 7 – трансформатор мод; 8 – окно; 9 – соленоид. (б) Внешний вид ПМ; отпечаток пучка на фоне диаметра катода. (в) Вариация спектра излучения при изменении плотности плазмы.

геометрии (плазменная трубка внутри трубчатого пучка), показанная на [рис. 27а](#), реализована в установке ([рис. 27б](#)) на базе РАДАН-303 и преобразователя с удлинённой ФЛ ([рис. 3а](#)). Применена большая декомпрессия магнитного потока неоднородного соленоида, позволившая расширить пучок после КДМИ с диаметра 22 до ≈ 45 мм перед пространством взаимодействия (вставка на [рис. 27б](#)). При энергии частиц ≈ 270 кэВ, импульсная мощность пучка была ≈ 450 МВт. Меняя давление азота, который предварительно ионизовался низкоэнергетическим пучком со вспомогательного термокатода, обеспечивалась пятикратная вариация плотности плазмы и были получены мощные СВЧ импульсы в спектральном диапазоне от ≈ 3 до ≈ 25 ГГц ([рис. 27в](#)). Энергоэффективность в режиме однократного усиления шумов достигала $\approx 26\%$, средняя СВЧ-мощность за импульс тока пучка составила ≈ 100 МВт, а мгновенная (пиковая) мощность 430 ± 30 МВт близка с мощностью пучка. Эти параметры излучения получены при измерении энергии широкоапертурным калориметром и при регистрации радиоимпульсов штыревой антенной 33-ГГц осциллографом.

5. Микроволновое сверхизлучение электронных пучков

Исследования в ИЭФ УрО РАН по формированию в КДМИ сильнооточных умеренно-релятивистских электронных пучков с длительностью порядка 1 нс и короче, описанных в [\[27\]](#), в начале 1990-х удачно совпали с теоретическими работами ИПФ РАН по генерации ультракоротких микроволновых импульсов с различными механизмами электронно-волнового взаимодействия, предполагающих применения таких пучков [\[78\]](#). Концепции новых режимов генерации мощных когерентных ЭМ импульсов ансамблями классических электронов-осцилляторов, образующих пучки, базировались на аналогии с известным эффектом сверхизлучения (СИ) Дике [\[79\]](#) в двухуровневой среде возбуждённых квантовых

осцилляторов. Заметим, что такие же аналогии применимы к СИ ультрарелятивистских электронных сгустков в других диапазонах частот, включая терагерцовые, оптические и т. д. [80]. Чтобы сформировать короткий уединённый импульс СВЧ излучения, достаточно пучка с длиной не более т.н. кооперативной длины - расстояния на котором происходит развитие неустойчивости, приводящей к усилению начального ЭМ возмущения. В этих условиях интенсивное когерентное излучение возникает в беспороговом режиме со всего объема пучка из-за группировки частиц за один проход через электродинамическую систему, то есть без установления обратной связи.

В зависимости от диапазона длин волн и достижимых инкрементов усиления, для получения в экспериментах микроволнового СИ при типичных энергиях электронов 200÷300 кэВ применимы короткие ускоряющие импульсы 2-5, представленные на рис. 36. Первое наблюдение микроволнового СИ [37**, 38**] было осуществлено с использованием ускоряющего импульса 4, рис. 36, питавшего ВЭЭ-катод установки, представленной на

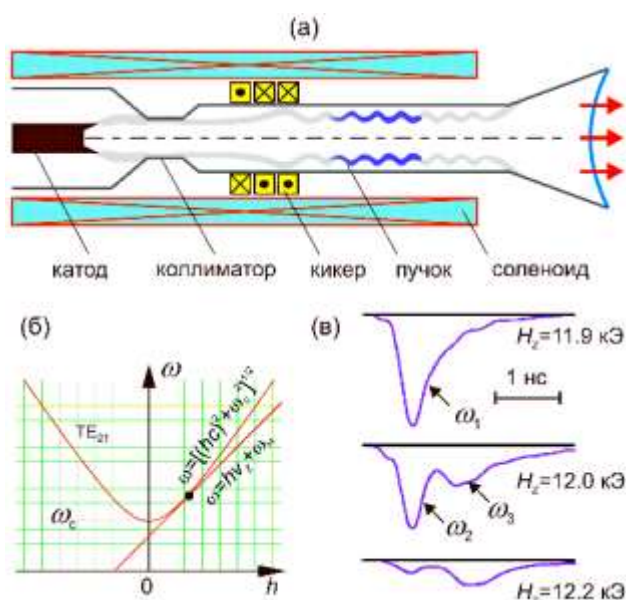


Рис. 28. (а) Схема установки для наблюдения циклотронного СИ. (б) Рабочая точка группового синхронизма при касании дисперсионных характеристик электронного потока и волны. (в) Трансформация огибающих импульсов СИ при отклонении от рабочей точки (12 кЭ).

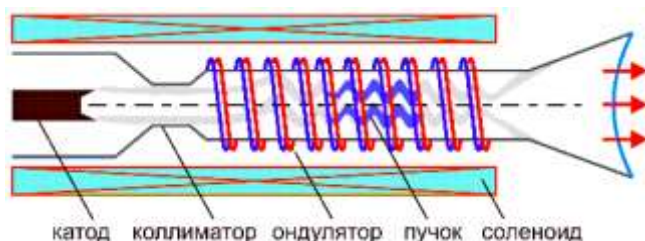


Рис. 29. (а) Схема установки для наблюдения СИ в ЛСЭ с активным бифилярным ондулятором.

рис. 28а. Ставилась задача подтвердить теоретические представления о принципиальной возможности эффекта СИ при циклотронном механизме электронно-волнового взаимодействия [81], причём в оптимальном режиме группового синхронизма, когда поступательная скорость электронов близка к групповой скорости возбуждаемой ЭМ волны в волноводе. На рис. 28б такому режиму соответствует касание дисперсионных характеристик волноводной моды (TE₂₁ в данном случае) $\omega = [(hc)^2 + \omega_c^2]^{1/2}$ и электронного пучка $\omega - h\nu_e = \omega_N$. Здесь ω_N и ω_c - циклотронная и критическая частоты; остальные обозначения, как на рис. 22в. Из рис. 28в видно, что на структуру детектированных импульсов СИ существенно влияют отклонения от продольного магнитного поля $H_z = 12$ кЭ, при котором точно реализуется режим касания. В соответствии с теорией [36, 37**], при $H_z \geq 12$ кЭ получаются два разночастотных пика излучения. В частности, $\omega_2 \approx 33.3$ ГГц и $\omega_3 \approx 31.6$ ГГц, а пиковая мощность моноимпульса при $H_z = 11.9$ кЭ оценивалась в 0.2 МВт. Это значительно меньше мегаваттных значений, реализованных в численной модели [40] для симметричных волн при полях $H_z \approx 15$ кЭ

[36]. Невысокую мощность циклотронного СИ можно связать с большой вариацией энергии электронов пучка, задаваемой формой ускоряющего импульса, формируемого доступным на тот момент преобразователем [32**]. Также могли быть отклонения от требуемой величины ≈ 1 питч-фактора электронов (отношения поперечной и продольной скорости) после киккера, который имел индукционную связь с импульсным соленоидом.

По-видимому, аналогичные проблемы с качеством пучка, недостаточной длиной и сложностью настройки тока в активном импульсном спиральном ондуляторе в продольном магнитном поле [82] привели в экспериментах [24* 39**, 83**] к получению в «длинноволновом ЛСЭ» (рис. 29) импульсов СИ диапазона частот 28 ГГц с мощностью в сотни киловатт. Это на порядок меньше предварительных теоретических оценок. Между тем, в этих исследованиях вновь удалось подтвердить преимущества режима группового синхронизма пучка, как на рис. 28б, но уже с волной TE_{11} . Здесь в выражении характеристики электронного пучка ω_n следует заменить на баунс-частоту Ω колебаний электронов в поле ондулятора: $\omega - \hbar v_z = \Omega$. Также удалось продемонстрировать влияние на мощность генерации СИ вариации поперечных скоростей электронов, которые различаются при смене направления продольного магнитного поля и поэтому задают разные орбиты осциллирующего пучка. Причиной является суммирование магнитных полей соленоида и ондулятора. Детектированный импульс СИ по форме напоминал моноимпульс, показанный на рис. 28в. Диаграмма направленности излучения соответствовала расчетной волне TE_{11} . Зависимость пиковой мощности СИ от длины пространства взаимодействия имела экспоненциальный характер, тем самым подтверждалось, что излучение носит индуцированный характер, то есть, возникает за счет группировки электронов.

Генерацию излучения в ЛСЭ, в том числе в режиме СИ, можно рассматривать как рассеяние магнитостатической волны на электронном потоке, когда в результате релятивизма частиц длина волны оказывается короче периода ондулятора. Получение коротковолнового СИ возможно в процессе «однопроходного» вынужденного рассеяния электромагнитной волны накачки в волноводе на встречно движущемся электронном пучке

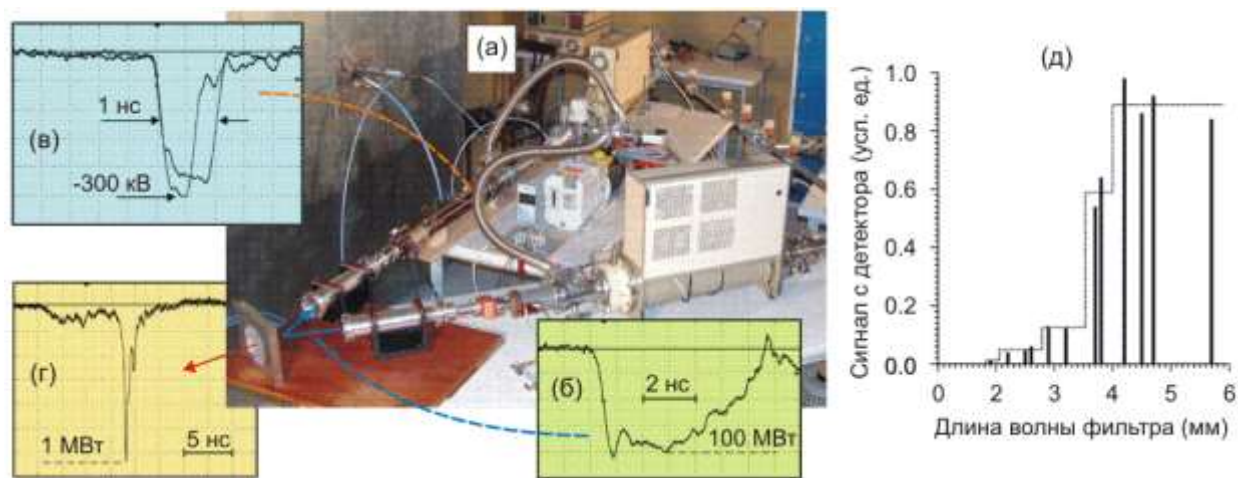


Рис .30. (а) Установка с синхронизированными драйверами РАДАН-303 для наблюдения СИ при вынужденном рассеянии микроволновой волны накачки на встречном электронном пучке. (б) Импульс накачки (ЛОВ, 38 ГГц). (в) Варианты ускоряющих импульсов рассеивающего пучка. (г) СИ-импульс (рассеянного излучения) со «спектром» (д).

[84]. Для демонстрации этого эффекта [25*] использовалась установка (рис. 30а) на основе двух синхронизированных драйверов РАДАН-303. В канале накачки релятивистская ЛОВ диапазона длин волн 8 мм, запитанная импульсом, как на рис. 2в, формировала СВЧ импульс (рис. 30б) с мощностью около 100 МВт. После преобразования из моды TM_{01} в Гауссов волновой пучок излучение отражалось фокусирующим металлическим параболическим рефлектором и вводилось в виде волны (накачки) TE_{11} в круглый волновод длиной 40 см. Сюда во встречном направлении инжектировался замагниченный взрывоэмиссионный пучок второго ускорителя, питаемого импульсом рис. 30в. Ограниченная длительность этого пучка определяла рассеяние в одностороннем режиме. В составе короткого импульса (СИ) рассеянного излучения (рис. 30г) имелся набор мод с длинами волн вплоть до 2-мм (рис. 30д), то есть фактор преобразования по сравнению с накачкой ($\lambda = 8$ мм) достигал $2\gamma^2$ (γ - релятивистский фактор Лоренца). Импульс СИ регистрировался после прохождения через перфорацию в рефлекторе с отсечкой $\lambda = 6$ мм. Интегральная по спектру мощность СИ оценивалась по ДН волнового пучка величиной ≈ 1 МВт. Заметим, что спад мощности коротковолновых компонент должен быть меньше, чем на рис. 30д, так как СВЧ детектор был калиброван на частоте ≈ 36 ГГц, а в высокочастотном пределе его чувствительность резко снижается. Наличие в спектре излучения компонент с длинами волн $\lambda \rightarrow 6$ мм обусловлено возбуждением квазикритических мод круглого волновода.

В представленном выше эксперименте использовался прямолинейный трубчатый пучок, который транспортировался в дрейфовой камере с магнитным полем на расстояние в десятки сантиметров. Аналогичный вариант с соотношением длины транспортировки пучка к его диаметру > 50 был применён в более ранних работах [26*, 27*, 38**, 83**] для получения СИ с черенковским механизмом электронно-волнового взаимодействия типа ЛБВ, а именно с волной, замедленной в волноводе с диэлектрической втулкой (рис. 31а). Согласно

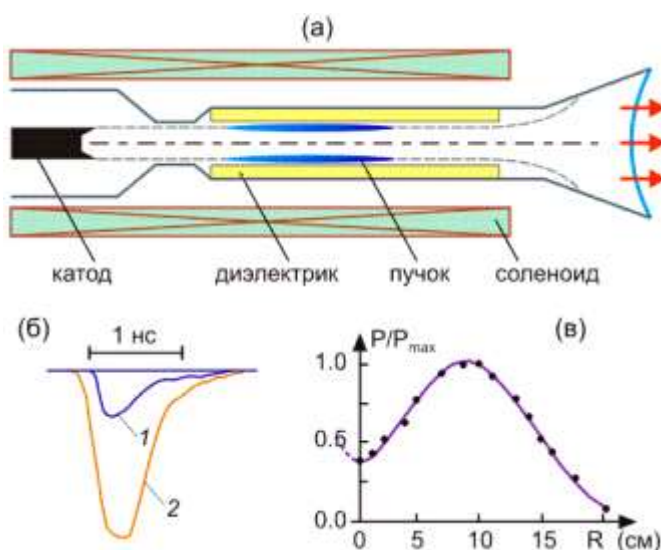


Рис. 31. (а) Генератор черенковского СИ с диэлектрической ЗС. (б) Импульсы СИ в однородной трубчатой ЗС (1) и с предмодуляцией (2). (в) ДН излучения на смеси мод TM_{01} и HE_{11} .

с теорией и моделированием [40] эффекта черенковского СИ для симметричной моды TM_{01} , в зависимости от характера начального ЭМ возмущения (шумы-флуктуации тока или затравочный сигнал от фронта пучка) при достаточной длительности тока могли наблюдаться нерегулярные последовательности пиков СИ или моноимпульс такого излучения. В экспериментах [26*, 83**] пучок был относительно коротким (питание катода как 4 на рис. 3б) и с невысоким током ≈ 200 А. В результате наблюдался только лидирующий импульс СИ (1 на рис. 31б) с мощностью $0.7\div 1$ МВт. Так как условия синхронизма выполнялись на близких частотах (≈ 39 ГГц) сразу

для волны TM_{01} и для гибридной моды HE_{11} , то ДН излучения (рис. 31в) не имела нуля на оси. Мощность СИ удалось повысить в 2-3 раза [38**] (2 на рис. 31б), когда перед диэлектрической втулкой была установлена модулирующая пучок короткая секция ЗС от релятивистской ЛОВ (рис. 22а). То есть, искусственная модуляция пучка на рабочей частоте выполняла функция затравочного сигнала, возникающего при обострении фронта тока. Последний режим был рассмотрен и продемонстрирован в [27*], где в эксперименте при укорочении фронта пучка до 300 пс мощность СИ возросла до 3 МВт.

Начиная с экспериментов [85**], генерация черенковского СИ 8-мм диапазона изучалась при движении пучка в периодической замедляющей системе, где обеспечен синхронизм типа ЛОВ (рис. 22в) с -1 гармоникой волны TM_{01} . Для эффективной генерации моноимпульса СИ требуется длительность пучка, определяемая временем $T_c = L(1/v_e + 1/v_g)$. Здесь L – длина ЗС, v_e и v_g – скорость электронов и групповая скорость волны, соответственно. В первых экспериментах были использованы «одномодовые» удлинённые ЗС с конфигурацией, как на рис. 22а, для которых рабочий ток пучка многократно превышал стартовый для квазистационарной генерации. Согласно [65], в этом случае на начальной стадии переходного процесса ЛОВ формируется всплеск излучения, амплитуда которого может сильно превосходить мощность стационарной генерации. При относительно небольшом превышении током оптимального значения такой всплеск излучения наблюдается, например, на рис. 30б. С увеличением L эта стадия относится к формированию пика СИ. Как было показано экспериментально, мощность лидирующего пика (до 60 МВт в работах [28*, 29*, 85**]) пропорциональна квадрату полного числа частиц в электронном сгустке (рис. 32а), что подтверждает когерентный характер черенковского СИ пучка,

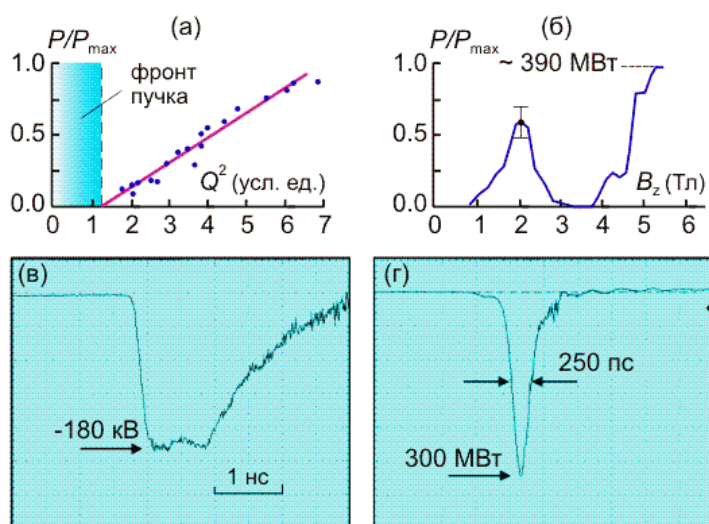


Рис. 32. (а) Зависимость мощности СИ (8-мм ЛОВ, рис. 22а) от квадрата заряда пучка (без фронта, где энергия мала). (б) Зависимость мощности СИ-ЛОВ (рис. 22б) от магнитного поля. (в, г) Импульс питания катода СИ ЛОВ и детектированное излучение при использовании SOS модулятора и водородного обостряющего разрядника: частота повторения 1 кГц.

движущегося в гофрированном волноводе. В этих экспериментах заряд электронного сгустка менялся перестройкой длительности ускоряющего импульса после преобразователя [32**]. Импульс пучка, как и напряжение не имел качественной «полки». Низкоэнергетические электроны на фронте выпадают из черенковского синхронизма с волной, в связи с чем, зависимость на рис. 32а по оси « Q^2 » сдвинута от нуля. Этот факт, в частности, стимулировал в дальнейшем поиск методов снижения фракции несинхронных электронов на фронте тока (см. рис. 20 и [15*]).

Применение в экспериментах сверхпроводящего соленоида

позволило осуществить генерацию импульсов СИ на частоте повторения 25 Гц [85**]. Как показали расчёты [29*] с помощью кода КАРАТ [40], мощность СИ-ЛОВ 8-мм диапазона (рис. 22а) может быть увеличена более 100 МВт при оптимизации (увеличении) длительности тока пучка. Ещё больший рост мощности СИ 8-мм диапазона был продемонстрирован [30*, 31*] (рис. 32б) с применением ускоряющего импульса 3 на рис. 36 для конфигурации ЗС, как на рис. 22б, причём при продольном магнитном поле соленоида $B_z \approx 2$ Тл, что ниже значения циклотронного резонанса. Этот результат был использован в эксперименте [43**], где с применением ускоряющего импульса (рис. 32в), формируемого SOS-модулятором и преобразователем [45**], черенковское СИ с мощностью ≈ 300 МВт (рис. 32г) генерировалось на частоте повторения вплоть до 3.5 кГц при использовании «тёплого» соленоида постоянного тока. Моноимпульсный характер такого пика СИ был связан с оптимизированной длительностью напряжения питания катода (рис. 32в) и тока пучка.

В работе [29*] был высказан прогноз о перспективах получения генерации СИ в сантиметровом диапазоне длин волн, и такие исследования в ИСЭ СО РАН дали нетривиальный результат [86] – превышение мощности импульса СИ-ЛОВ диапазона 10 ГГц по отношению к мощности электронного потока (конверсия мощности $K > 1$). Анализ этого эффекта показал [87], что причиной является распределённая по встречному потоку электронов аккумуляция энергии импульсом СИ, который значительно короче пучка. То есть, нарушений закона сохранения энергии здесь не имеется. Подобный режим для удлинённой ЗС (типа показанной на рис. 22б) был воспроизведён в эксперименте ИЭФ УрО РАН [88**] в диапазоне частот 38 ГГц. При $K \approx 1.5$ мощность пика СИ с длительностью 200 пс на полувысоте (≈ 8 периодов СВЧ) превысила 1 ГВт. Особенностью этого эксперимента было применение очень сильного продольного магнитного поля ($B_z \geq 6.5$ Тл), снижавшего размах поперечных осцилляций электронов в СВЧ полях. В дальнейшем, подобный подход позволил реализовать источники СИ диапазона частот ≈ 29 ГГц с рекордными пиковыми мощностями от 2 до 3 ГВт при $K \approx 1$ [32*, 33*]. Здесь для питания катода были

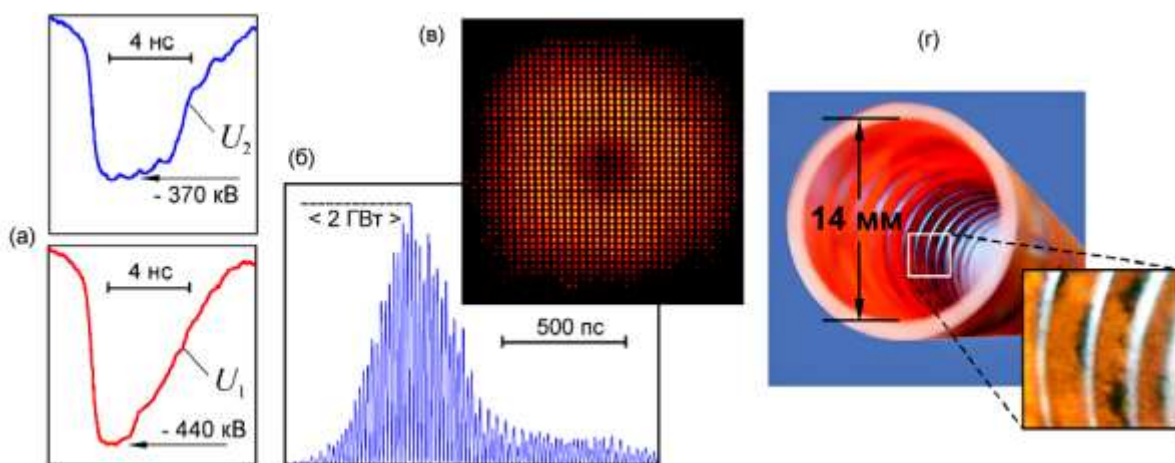


Рис. 33. (а) Импульсы питания, формируемые SOS-модулятором + ГНЛ и системой коррекции формы. (б) Радиопульс СИ (29 ГГц) в квадратичном представлении. (в) Свечение индикаторного табло 60х60 см под действием 2-ГВт импульса СИ. (г) Следы пробоев в замедляющей структуре СИ ЛОВ.

использованы импульсы (рис. 33а), формируемые на выходе SOS-модулятора S-500, дополненного обострителем фронта (ГНЛ) и устройством коррекции формы. Генерируемые импульсы СИ (рис. 33б) имели стабильные ДН (рис. 33в) не смотря на то, что на стенке ЗС

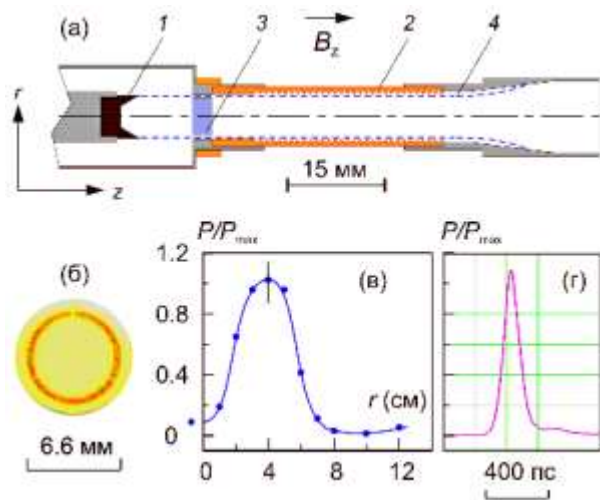


Рис. 34. (а) Генератор СИ 140 ГГц с 1-D гофрировкой сверхтонкой ЗС. (б) Пучок. (в) Диаграмма направленности СИ и его детектированный сигнал (г). 1 – катод; 2 – ЗС; 3 – рефлектор; 4 – пучок.

наблюдались следы пробоев (рис. 33г). По-видимому, возникновение взрывоэмиссионной плазмы в полях СИ ≈ 2 МВ/см [32*] (или её расширение) запаздывало настолько, что ультракороткий пик излучения успевал выводиться из электродинамической системы без существенного поглощения. К настоящему моменту подобный сценарий позволил в расчётах СИ-ЛБВ 8-мм диапазона при фронте 1-МэВного пучка < 100 пс прогнозировать генерацию пиков черенковского СИ с мощностью до 25 ГВт и $K > 1.5$ [89].

Как известно [13], одним из подходов, позволяющих минимизировать проблему СВЧ пробоев в мощных СВЧ приборах, является переход от одномодовых ($D_s \approx \lambda$) [90**] к ЗС большого поперечного сечения ($D_s \gg \lambda$). Это относится не только к квазистационарным генераторам миллиметровых волн [21*, 22*], но, как следует из предыдущего рассмотрения, также актуально для мощных источников черенковского СИ. Здесь, однако, при значительном увеличении параметра D_s/λ возникают проблемы когерентности излучения отдельных азимутальных фракций трубчатых пучков (длина их окружности также $\gg \lambda$) и селективности возбуждения волн. Квазиоптическая теория [91] гофрированных ЗС с $D_s \gg \lambda$ обосновывает когерентность генерации СИ с доминантой одной из мод, попадающих в синхронизм с пучком. Эксперименты с ускоряющими импульсами 2 и 3 (рис. 3б) проведены для ЗС с $D_s/\lambda = 3.5$ и 5.5, имевших 1-D и 2-D синусоидальную гофрировку стенок (рис. 34а) и (рис. 35а). Методом [20*] была

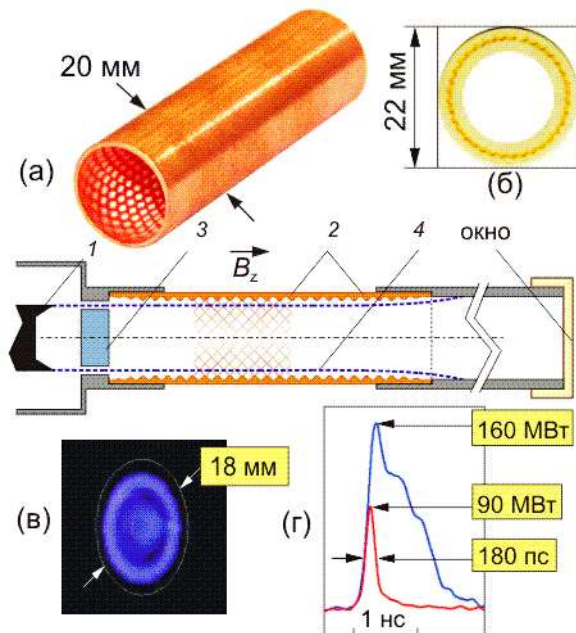


Рис. 35. (а) 2-D гофрированная ЗС и схема генератора СИ: 1 – катод; 2 – ЗС; 3 – рефлектор; 4 – пучок. (б) Азимутальная модуляция пучка на выходе ЗС. (в) Структура пробоя воздуха возле окна в поле волны TM_{01} . (г) Сигналы с детектора СИ с пробоем окна и без него.

осуществлена проводка трубчатых пучков (рис. 34б) и (рис. 35б) через радиально-кольцевые щели ($\delta r = 0.3$ и 0.5 мм) в «анодных» блоках с плоскими рефлекторами СВЧ с потерей тока не более 10%. Частотные диапазоны генерации СИ по измерениям волноводными фильтрами были около 140 и 90 ГГц в [34*] и [35*], соответственно. Структура ДН излучения [34*] (рис. 34в) в основном соответствовала поверхностной волне TM_{01} . Судя по тороидальной форме пробоя с атмосферной стороны вакуумного окна генератора (рис. 35в), такая же мода доминировала в [35*]. Полученные коротковолновые импульсы СИ 50-70 и 150-160 МВт (рис. 34г и рис. 35г), существенно превосходили по мощности пики черенковского СИ, наблюдавшиеся ранее [36*, 37**] после одномодовых ЗС (рис. 22а и 22б).

Экспериментальная установка на основе двух драйверов РАДАН-303 (рис. 36а), синхронизированных разрядниками (рис. 5) с субнаносекундной точностью, позволила впервые наблюдать эффект нелинейной компрессии импульсов микроволнового СИ 8-мм диапазона в процессе усиления квазистационарным электронным потоком [37*, 38*]. Для этого, импульс СИ ЛОВ из генераторного канала (рис. 36б) подавался в усилительный (со значительным снижением амплитуды из-за отражений в переходной секции), где после отражения от запредельного волновода он становился попутным пучку второго ускорителя. Для усиления этого сигнала СИ (рис. 36в) использовался черенковский механизм взаимодействия с волной TM_{01} , замедленной в волноводе, частично заполненном диэлектриком (кварцевая трубка). Так как групповая скорость замедленной волны ниже поступательной скорости попутного пучка, то электроны проскальзывают относительно импульса СИ, то есть, в упрощенной интерпретации, усиливают его на заднем фронте, сокращая эффективную длительность. В отличие от случая на рис. 31, при отсутствии внешнего сигнала СИ собственное излучение пучка усилительного канала (рис. 36г) имело многопиковый хаотический характер, так как специальных мер для получения

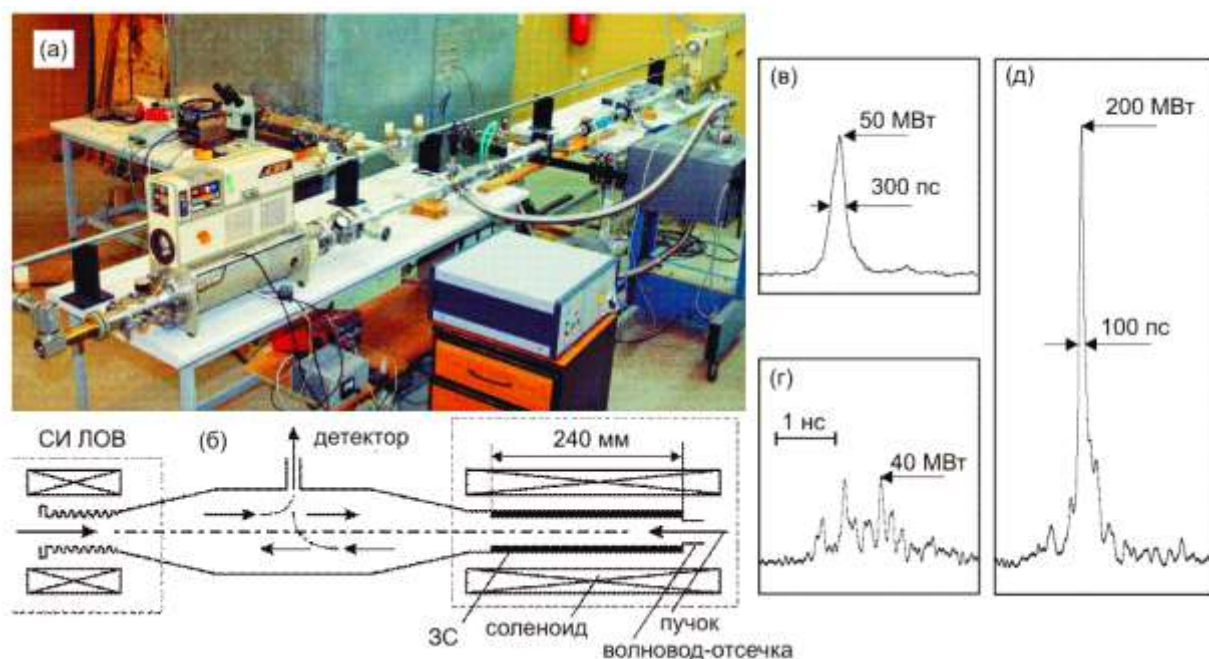


Рис. 36. (а) Внешний вид и схема установки (б) с синхронными ускорителями для наблюдения нелинейной компрессии импульса СИ 8-мм диапазона (в) при усилении электронным потоком. (г) Шумы пучка усилительного канала. (д) Сжатый сигнал СИ.

моноимпульса СИ здесь не предпринималось. При работе обоих каналов установки, наблюдалось 4-х кратное усиление пучком импульса СИ по мощности с 50 до 200 МВт (рис. 36д), сопровождаемое значительным (не менее чем трехкратным) его укорочением. То есть, были получены микроволновые импульсы рекордно короткой длительности, не превышающей 100 пс на полувысоте, что соответствует ≈ 4 периодам СВЧ осцилляций. Отметим, что в работе [39*] предложено использовать возможности установки, показанной на рис. 36а, (при незначительных изменениях конструкции и параметров [40*]) для исследования режимов формирования ЭМ солитонов в условиях циклотронного резонанса между импульсом СИ с встречным электронным потоком.

6. Стабильная по фазе СВЧ генерация в диапазоне миллиметровых волн

Представленные на рис. 32в и 32г осциллограммы примечательны тем, что импульс питания катода (рис. 32в) был сформирован SOS модулятором, дополненным короткой ФЛ и водородным обостряющим разрядником. Регистрация этих осциллограмм выполнена цифровым стробоскопическим осциллографом (Tektronix-TDS820, аналоговая полоса 6 ГГц) за 512 последовательных импульсов. То есть, осциллограммы представляют оцифровку сигналов со сдвигом ≈ 10 пс. Отсутствие каких-либо девиаций на фронте импульса СИ дало основание предположить, что процесс его возбуждения происходит с пикосекундной стабильностью по отношению к фронту напряжения по времени, и, возможно, по фазе. Отметим, что реальный фронт импульса напряжения на рис. 32в в результате процедуры коррекции, учитывающей переходную характеристику осциллографа [92], по уровням 0.1-0.9 составлял около 180 пс, а ток пучка на входе в ЗС с учётом, представленного на рис. 17 и рис. 19 эффекта, мог быть ещё короче. Роль обострённых фронтов ускоряющего напряжения в стабильной по фазе генерации релятивистских СИ ЛОВ диапазонов 3.7 и 10 ГГц подтвердилась в [46, 47**], когда для регистрации радиоимпульсов стали доступны осциллографы реального времени Tektronix TDS7704B (4 ГГц) и TDS6154C (15 ГГц).

Следующим этапом был анализ возможности получения для фазово-стабильной СВЧ генерации нескольких ускоряющих импульсов и пучков с пикосекундной синхронизацией фронтов тока и напряжения. Было признано, что прецизионно управляемый разрядник [49**] сложно применить для многоканальных систем, т.к. включающий его сильноточный пучок требовал использовать драйвер с энергетикой, сравнимой с ускорителем ведомого СВЧ генератора. С учётом этого, более выгодно расщеплять на несколько каналов ускоряющий импульс одного мощного высоковольтного драйвера. Такими драйверами стали машины СИНУС [60, 93], комбинация из драйверов РАДАН-303 с объединённым разрядником [94**], а также SOS-модулятор S-500 [95**, 96**]. Так как при расщеплении импульсов высоковольтными фидерами крутизна фронтов напряжения ухудшается, в параллельных каналах использовались ГНЛ с подмагничиванием в качестве дополнительных обострителей, не дающих разбросов фронтов и обеспечивающих их управляемый сдвиг для взаимной фазировки СВЧ генераторов.

С переходом к экспериментам в 8-мм диапазоне длин волн вновь стала актуальной проблема осциллографов реального времени с адекватной полосой регистрации. В начале 2010-х они отсутствовали, и поэтому для многоканальных систем применялась регистрация

детектированных суммированных СВЧ сигналов (как квазистационарных, так и СИ). Для квазистационарных генераторов было более критичным совпадение частот генерации в каналах. В специальном эксперименте [97**], где несущая частота импульса, состоящего из ≈ 100 периодов СВЧ, в одном из двух каналов была смещена примерно на 1% (метод смещения показан на рис. 24в), в течение суммированного импульса наблюдались биения - квадратичное увеличение мощности в различные моменты [98**]. Согласно расчётам (рис. 37а), набег фазы разночастотных СВЧ импульсов на один период приводит к полному сканированию параксиальной области ДН «квадратичным» интерференционным лепестком двух суммированных линейно-поляризованных гауссовых волновых пучков.

При равенстве частот в каналах, когда при квазистационарной генерации фаза не меняется в течение всего СВЧ импульса [65], наблюдалось стабильное квадратичное сложение сигналов двух 8-мм ЛОВ [94**] (рис. 37б). Когда протяженный импульс напряжения с обострённым в ГНЛ фронтом (рис. 46) применялся для питания 8-мм СИ ЛОВ, после первого стабильного пика СИ фаза становилась случайной и когерентность суммирования двух импульсов СИ терялась (рис. 37в) [96**]. Такое поведение впоследствии было подтверждено при анализе структуры радиоимпульса СИ с использованием 60-ГГц осциллографа (рис. 37г) [41*].

Успешная демонстрация синфазной работы двухканальной СИ ЛОВ [96**] диапазона длин волн 8 мм с мощностью СИ в каждом канале ≈ 700 МВт позволила перейти к экспериментам [42*, 99**] с 2-D решеткой из таких же генераторов (рис. 38а). SOS драйвер S-500 имел достаточный энергетический ресурс для питания четырёх каналов с незначительным снижением ускоряющего напряжения и мощности СИ ЛОВ в каждом канале (до 600 МВт). Как и в случае двух каналов, импульсы СИ в виде линейно-поляризованных гауссовых волновых пучков суммировались когерентно. Об этом свидетельствовало 16-кратное увеличение плотности мощности излучения по главному направлению антенной системы (рис. 38б). На суммированном сигнале, как и для случая на

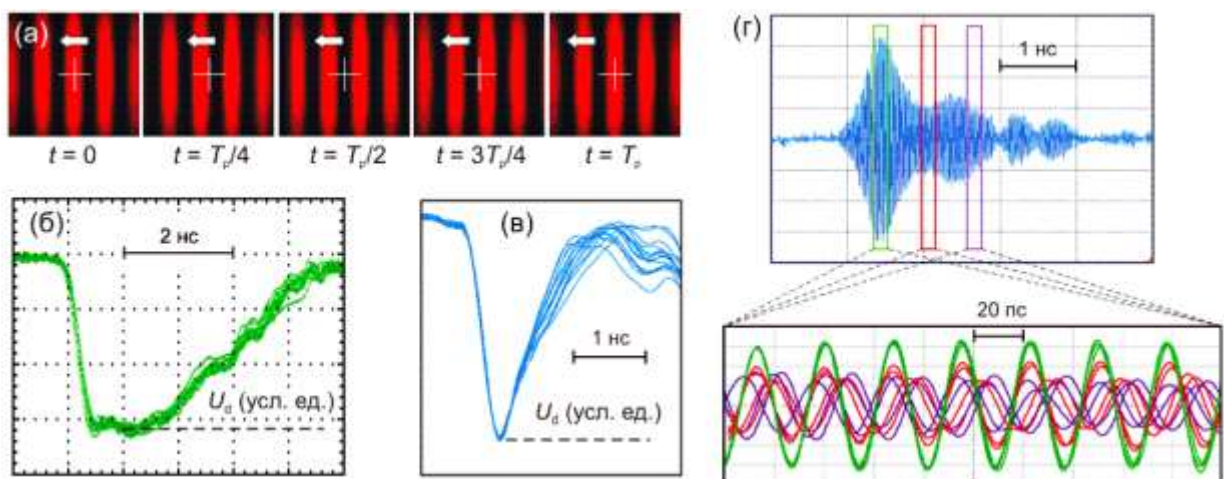


Рис. 37. (а) Расчёт суммирования в пространстве разночастотных гауссовых волновых пучков за один импульс длительностью T_p при набеге фазы в период СВЧ. (б, в) Сигналы детектора при когерентном суммировании импульсов 8-мм ЛОВ в квазистационарном и СИ режимах. (г) Хаотизация фазы после импульса СИ при питании ЛОВ удлинённым импульсом напряжения.

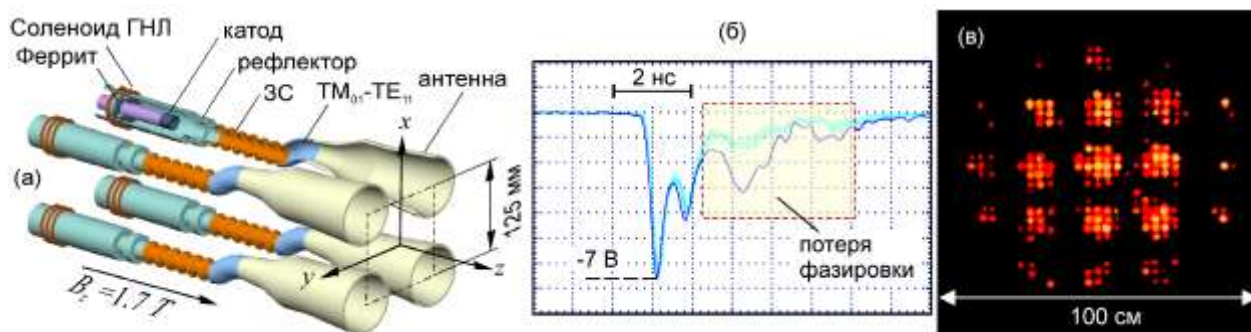


Рис. 38. (а) Схема 4-канального генератора из синфазных СИ ЛОВ 8-мм диапазона. (б) Импульс детектора от СИ одного из каналов (синий) и после суммирования излучения 4-х каналов (10 голубых) с ослаблением мощности волноводным attenuатором в 16 раз. (в) Свечение индикаторного табло при облучении суммированными волновыми пучками.

рис. 37в, была видна потеря когерентности суммирования после пика СИ. Тем не менее, суммированное излучение давало стабильную 2-D картину распределения интенсивности (рис. 38в). Важно, что в параксиальном интерференционном максимуме такой ДН плотность потока мощности была эквивалентна генератору с мощностью $(600 \text{ МВт} \times 4^2) \approx 10 \text{ ГВт}$. На расстоянии 1 м от антенной решетки максимальный поток мощности СИ составил 10 МВт/см^2 , а напряженность СВЧ поля здесь достигала $\approx 140 \text{ кВ/см}$, что при субнаносекундной экспозиции ещё не приводило к развитому СВЧ пробое воздуха.

С появлением возможности получать во временное пользование осциллографы с полосой регистрации 33, 60 и 70 ГГц исследования стабильности фазово-частотной структуры импульсов СИ ЛОВ проводились при регистрации радиоимпульсов в реальном времени. В частности, условия фиксации фазы СВЧ генерации относительно фронта напряжения на катоде рассматривались в [43*] для случая рекордных мощностей генерации СИ диапазона 29 ГГц (рис. 33). Здесь особое внимание было уделено методике регистрации радиоимпульса СИ в аспекте его привязки к точке запуска осциллографа (33 ГГц) на фронте импульса напряжения (рис. 39а). Было выяснено, что минимальное стандартное отклонение

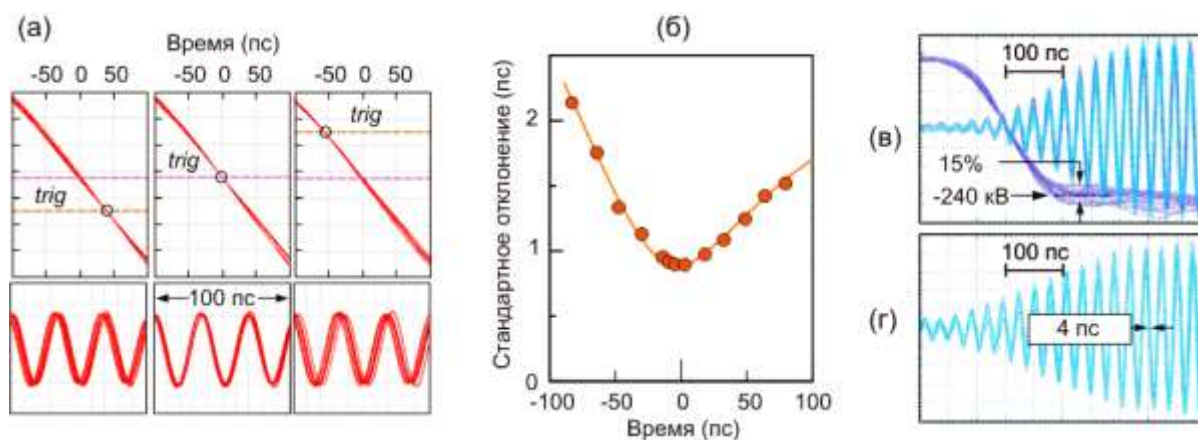


Рис. 39. (а) Изменение стабильности регистрируемой фазы 29-ГГц СИ ЛОВ и её стандартное отклонение (б) при вариации точки синхронизации осциллографа на фронте ускоряющего импульса. (в) Стабилизация фазы при амплитудном разбросе ускоряющего импульса с крутым фронтом и в случае быстрого участка в начале плавного фронта (г).

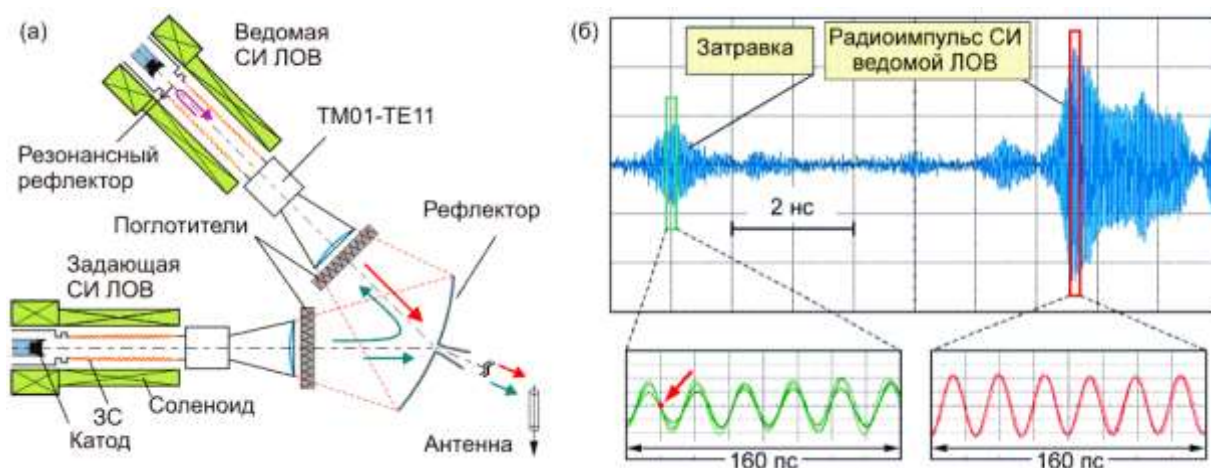


Рис. 40. (а) Схема эксперимента по навязке фазы СИ ЛОВ внешним затравочным радиоимпульсом. (б) Фазировка затравочного радиоимпульса и отклик ведомой СИ ЛОВ.

фазы генерации СИ от включения к включению (~ 1 пс при периоде СВЧ ~ 30 пс, [рис. 39б](#)) ассоциируется с областью фронта напряжения ([рис. 33а](#)), где достигается максимальная скорость его нарастания ≈ 1 МВ/нс. По видимому, это связано с локализацией по времени максимума ЭМ возмущения, которое мы наблюдали в эксперименте [\[16*\]](#) ([рис. 21](#)). Как выяснилось в работе [\[44*\]](#), условия стабилизации фазы 8-мм СИ ЛОВ со стандартным отклонением < 0.5 радиан могут достигаться в условиях применения преобразователя ([рис. 3а](#)), когда фронт импульса напряжения (3 на [рис. 3б](#)) имеет стабильную крутизну $(dU/dt)_{\max} \approx 2$ МВ/нс, но амплитудный разброс достигает 15% ([рис. 39в](#)). Важно, что стабилизация фазы также имеет место ([рис. 39г](#)), когда лишь относительно небольшой начальный участок медленного фронта напряжения имеет высокую скорость нарастания ([рис. 19а](#)), но при этом реализуются условия формирования короткого всплеска тока на фронте пучка ([рис. 19б](#)) и, следовательно, мощного затравочного сигнала.

Вопрос о роли затравочного ЭМ сигнала в аспекте фиксации фазы релятивистских ЛОВ представлял особый интерес, если учесть, что такой сигнал может не только порождаться крутым фронтом тока пучка, но и подаваться в пространство взаимодействия от внешнего источника. В работе [\[45*\]](#) с помощью установки ([рис. 40а](#)) на базе двух синхронизированных драйверов РАДАН-303, дополненных ГНЛ, впервые экспериментально продемонстрирована возможность генерации черенковского СИ с мощностью до 500 МВт в ЛОВ с фазой, задаваемой ультракоротким затравочным микроволновым импульсом, представлявшим ослабленный поглотителями импульс СИ второй ЛОВ. Фазы затравки и СВЧ импульса ведомого генератора СИ с близкими частотами ≈ 37 ГГц коррелировали с точностью 0,5–0,7 рад при соотношении мощностей вплоть до -35 дБ ([рис. 40б](#)). Когда частота затравки смещалась до 34.5 ГГц ([рис. 24б](#)), требовалось увеличивать мощность затравки для корреляции фазы ведомого импульса СИ. Такой режим свидетельствовал, что мы имеем дело со случаем, отличным от обычного усиления затравки в ведомой ЛОВ. В отсутствии затравки фаза СВЧ импульса относительно фронта ускоряющего импульса была хаотической. В дальнейшем, изучение роли внешней затравки в навязывании фазы генерации было проведено в специальных экспериментах [\[46*\]](#) с ведомой 8-мм ЛОВ, работавшей в квазистационарном режиме.

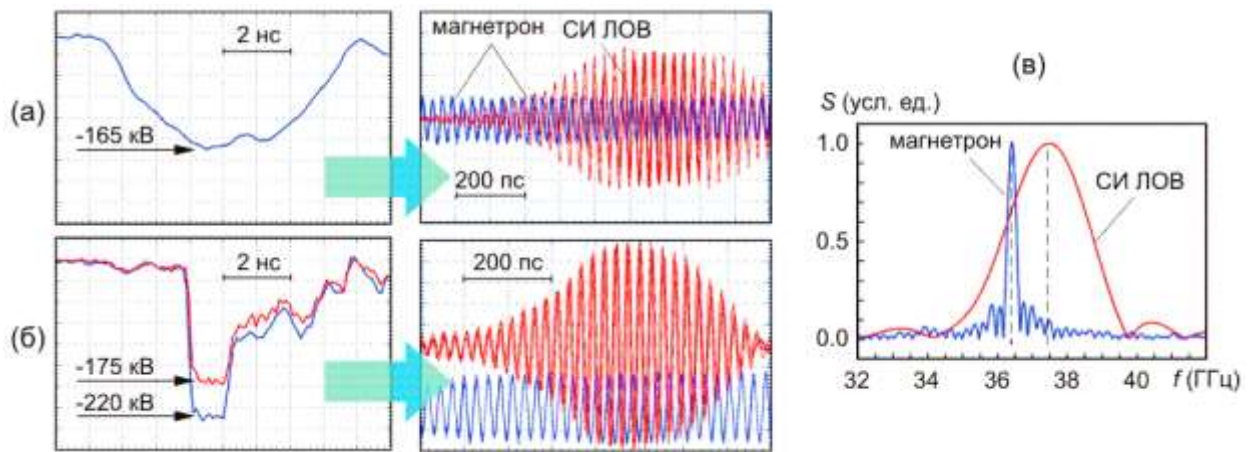


Рис. 41. (а, б) Варианты импульсов питания катода СИ ЛОВ и картины фиксации фаз СИ затравочным магнетронным сигналом со сдвинутой частотой (в).

В экспериментах [47*] рассмотрен важный вопрос о применении для фиксации фазы генерации субгигаваттной СИ ЛОВ 8-мм диапазона внешнего радиоимпульса, длительность которого значительно больше, чем длительность импульса ведомой ЛОВ. Использовалась экспериментальная установка аналогичная по схеме с показанной на рис. 40а, где генератор затравочного сигнала был заменён магнетроном с длительностью импульса около 100 нс. Был определён уровень вводимой мощности (> 20 кВт), который обеспечил стабилизацию фазы с полным разбросом $\leq 1,2$ радиан. Рассмотрен случай как медленного нарастания и нестабильной амплитуды ускоряющего напряжения (тока пучка), когда фиксации фазы в режиме автогенерации нет (рис. 41а), так и при конкуренции с электромагнитным возмущением от крутого фронта тока пучка (рис. 41б). В последнем случае требовалось повысить мощность магнетрона до 45 кВт. Эффект фиксации фазы наблюдался при разности частот внешнего радиоимпульса и ведомой ЛОВ ≈ 1 ГГц (рис. 41в). Возможность фиксации и управления фазой генерации при использовании ускоряющих импульсов с относительно плавными наносекундными фронтами и протяженного затравочного импульса представляет повышенный практический интерес. Можно создавать многоканальные квазистационарные сфазированные СВЧ генераторы на основе автономных высоковольтных драйверов, синхронизированных управляемыми искровыми разрядниками с субнаносекундной точностью (рис. 5).

7. Убегающие электроны в атмосферных разрядных промежутках

Из предыдущих разделов следует актуальность применения в электрофизических экспериментах осциллографов с частотной полосой регистрации и переходной характеристикой, адекватных исследуемому быстротекающему процессу. Это наглядно проявилось с начала 2000-х в исследованиях непрерывного ускорения (убегания) электронов в газах высокого давления. Теоретически эффект УЭ в плазме и газах был проанализирован достаточно давно [100, 101] и после его регистрации [102] длительное время исследовался в экспериментах [103]. В последние два десятилетия новый уровень обеспечения метрологической и высоковольтной техникой позволил подтвердить классические представления о механизме появления УЭ и прояснить дискуссионные моменты относительно эмиссионно-разрядных процессов в газовых промежутках с их участием.

Требовалось подтвердить существовавшие предположения или дать ответы на вопросы об источнике первичных, инициирующих электронов, о локализации области эмиссии УЭ, условиях их появления и достижения анода. Важным представлялось научиться определять момент эмиссии УЭ, управлять им, а также продемонстрировать «вторичные» эффекты прохождения УЭ в удлинённом промежутке и их роль в развитии пробоя. Как с точки зрения решения отмеченных задач, так и перспектив практических применений, было важно обеспечить фокусировку и компрессию потоков УЭ, а также формирование сгустков специальной формы.

Начиная с экспериментов [48*, 49*, 50*], применялись электродные промежутки различной конфигурации (рис. 42а), но практически всегда электрическое поле в области катода было неоднородным (усиленным). При переходной характеристике 6-ГГц осциллографа 70 пс в сравнительных измерениях эмиссии при использовании трубчатого катода в воздухе и вакууме [51*] было достаточно сложно установить, где электроны появляются раньше. Было определено, что длительность предимпульса напряжения на катоде существенным образом влияет на амплитуду тока УЭ (рис. 42б). Этот факт и наблюдавшиеся последствия дискретности потока УЭ (рис. 42в) [56**, 52*] подтверждали автоэмиссионное инициирование ионизационных процессов, то есть, в отличие от теоретических интерпретаций эксперимента [53*], прикатодную локализацию газовой плазмы – основного источника УЭ. Тот же вывод следовал из опыта по перемещению тонкой полимерной плёнки от анода, более эффективно ослаблявшей поток УЭ ближе к катоду, где электроны ещё не набрали достаточной энергии [54*]. Для стального катода было отчётливо видно [55*], что его тренировка в вакууме приводит к нарастающей задержке взрывоэмиссионного тока, вплоть до его «выключения» [56*] из-за сглаживания рельефа автоэмиттеров. Ток УЭ в воздухе после такой вакуумной полировки также задерживался (рис. 42г), но в гораздо меньшей степени и сохранял, как до тренировки, малую

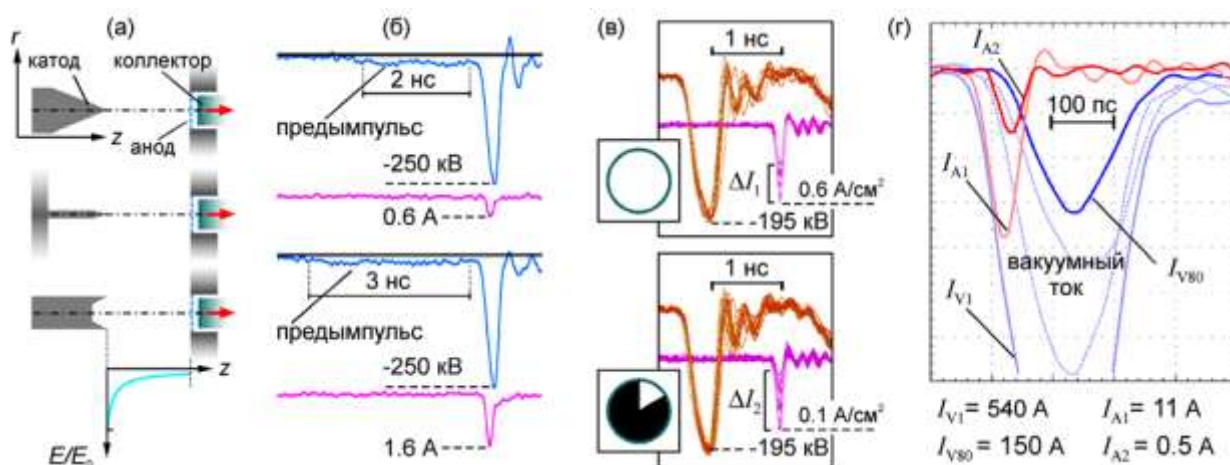


Рис. 42. (а) Воздушные промежутки с коническим, игольчатым и трубчатым катодом. (б) Рост тока УЭ с удлинением предимпульса напряжения. (в) Увеличение разброса амплитуд тока ΔI_2 при регистрации потока УЭ (катод трубчатый) после сегментного коллиматора. (г) Трансформация взрывоэмиссионного тока ($I_{V1} \rightarrow I_{V80}$) при тренировке стального трубчатого катода в вакууме 80 импульсами напряжения. Ток УЭ в воздухе до (I_{A1}) и после (I_{A2}) этой тренировки.

длительность. Было отмечено, что при достаточной длительности импульса напряжения, когда после прохождения УЭ в промежутке возникал пробой, разрядный ток реанимировал микрорельеф на катоде и после этого восстанавливался взрывоэмиссионный ток в вакууме.

По мере выполнения перечисленных выше работ, переход к измерениям тока УЭ осциллографом с частотной полосой 15 ГГц «сократил» длительность импульса тока УЭ до ≈ 45 пс на полувывоте, но было ясно, что и это значение ограничено переходной характеристикой регистратора. Действительно, автономизированные импульсы тока (I_2 на рис. 43а) имели идентичную форму, хотя их оригиналы (I_1) отличались значительным разбросом амплитуд, а по времени нестабильность их появления обычно составляла десятки пикосекунд. В работе [57*] было предложено использовать вариацию крутизны фронта напряжения U_{in} , подаваемого на катод (это импульс, аналогичный 4 или 5 на рис. 36) для привязки точки эмиссии УЭ по времени. Действительно, сканируя по фронту U_{in} уровень запуска осциллографа («trig» на рис. 43а) определялся минимум разброса момента появления тока (рис. 43б), и соответственно напряжение на фронте, когда это реализуется. Если выполняется условие доставки U_{in} от датчика к катоду по однородному тракту, то напряжение здесь удваивается (по крайней мере, до появления УЭ) в режиме холостого хода, и тогда в электростатическом приближении можно рассчитать [104] напряженность электрического поля на кромке катода или в её окрестности. То есть, определить критическое поле E_c эмиссии УЭ [18, 103].

В работе [58*] использован более «оперативный» способ определения порога эмиссии УЭ с помощью снижения напряжения на катоде при перестройке зазоров разрядников преобразователя (рис. 3). На рис. 43в приведены амплитудные значения напряжения, которые получены в расчётах [40] доставки на катод импульса U_{in} из ПЛ. Как видно, точность определения порога эмиссии УЭ (-40 кВ) определяется шумами осциллографа. Эти

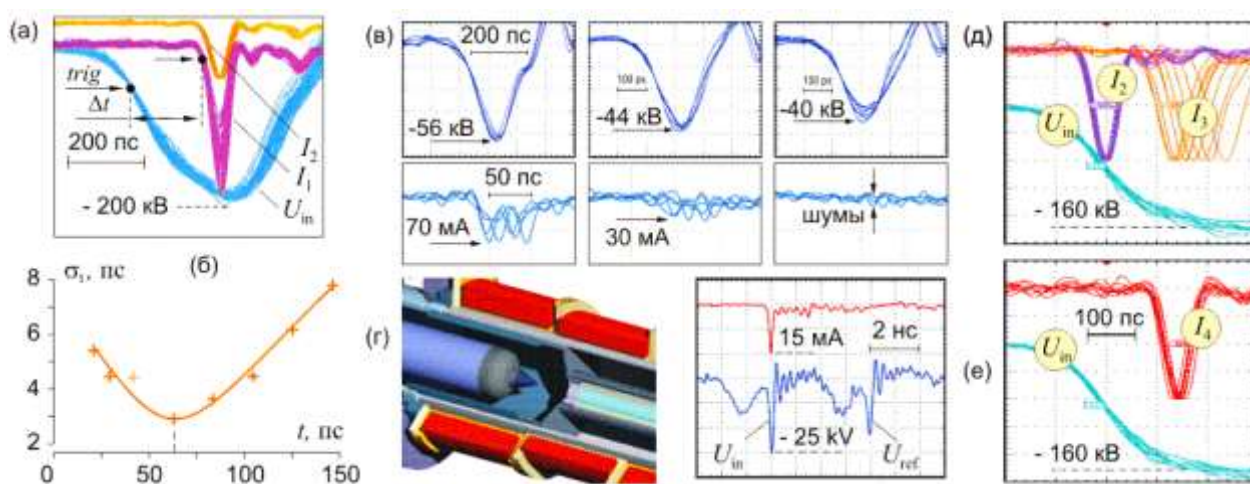


Рис. 43. (а) Измерение стабильности эмиссии УЭ по отношению к фронту импульса питания U_{in} и результат эксперимента (б). Здесь I_2 – автономизировка импульсов I_1 . (в) Определение порогового напряжения эмиссии УЭ в диоде с трубчатым стальным катодом при снижении амплитуды напряжения. (г) К определению порога эмиссии с графитовых конических катодов с разными углами раствора. (д) Стабильная по времени эмиссия тока УЭ (I_2) в двухэлектродном воздушном диоде на начальном участке фронта U_{in} и с большим разбросом (I_3) вблизи амплитуды U_{in} . (е) Стабилизация тока УЭ (I_4) при задержке эмиссии в первом промежутке двухзазорного диода и ускорении при амплитудном напряжении во втором.

измерения для стального трубчатого катода с кромкой толщиной 100 мкм, и аналогичные, вплоть до радиуса скругления кромки 0.5 мм, позволили показать, что для катода с острой кромкой полевое условие убегания вплоть до анода более жесткое по сравнению с классическим (локальным) [18, 103]. Достижение E_c в области сильного искажения поля у катода ещё не означает сохранения режима убегания на периферии промежутка, где поле

сильно падает (рис. 42а). Аналогичные выводы были получены в эксперименте с графитовыми коническими катодами [59*]. В данном случае при снижении амплитуды U_{in} (рис. 43г), пороговое напряжение определялось, когда ток УЭ становился $< 1\div 1.5$ мА, то есть, сигнал с коллектора оказывался на уровне шумов. Было определено, что при углах раствора конуса более т.н. Тейлоровского (98.6°) для убегания электронов вплоть до анода достаточно обеспечить E_c у катода. При более острых углах здесь потребуется $E > E_c$.

Как следует из осциллограмм токов I_2 на рис. 43а и 43д, ток УЭ возникает с разбросом порядка 10 пс, когда кромка катода заострена и E_c достигается возле неё на начальном участке фронта напряжения. Очевидно, что ускорение при относительно медленном дальнейшем росте напряжения может не обеспечить на аноде энергию, задаваемую амплитудой катодного напряжения. Для получения максимальных энергий УЭ, следует снизить искажение поля на катоде, то есть, увеличить радиус скругления его кромки [54*, 55*] или частично экранировать кромку профилированным торцом катодного электрода. При этом УЭ будут эмитироваться в области перехода фронта напряжения на «полку», но из-за нестабильности амплитуды разброс момента эмиссии резко возрастает (I_3 на рис. 43д). Чтобы обеспечить как максимальные энергии УЭ, так и малый разброс момента их эмиссии, в работе [60*]

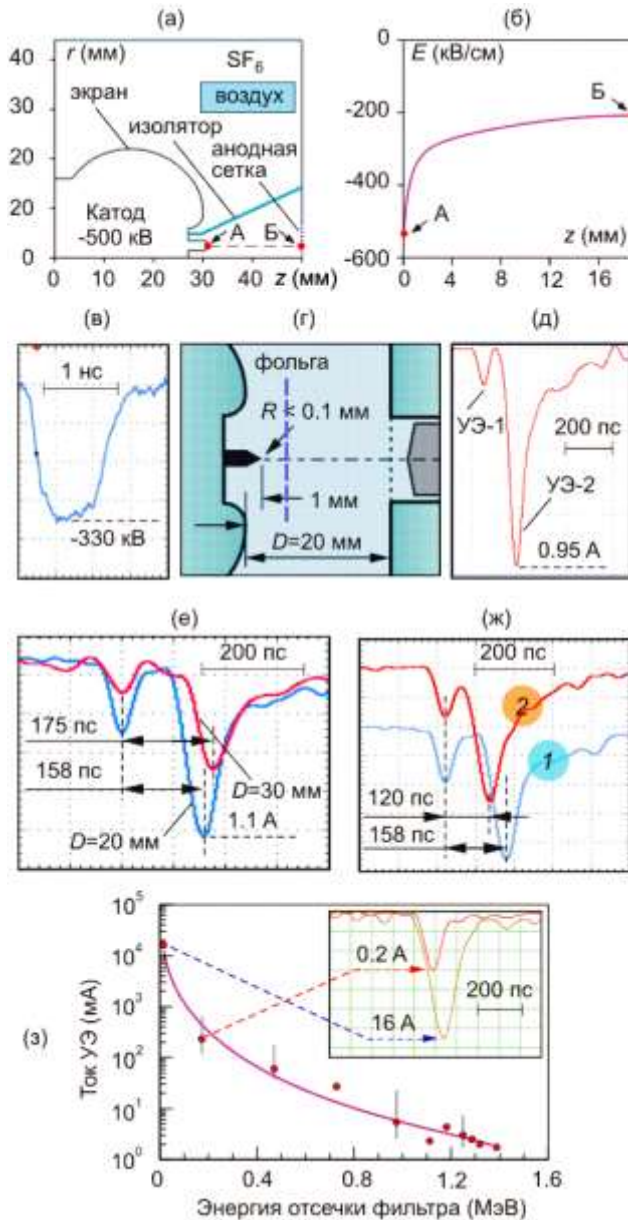


Рис. 44. (а) Промежуток с экраном для выравнивания распределения поля (б). (в) Импульс U_{in} увеличенной амплитуды. (г) Промежуток с игольчатым катодом. (д) Дуплетный сигнал тока УЭ. (е) Задержки между пиками токов УЭ для различных зазоров D . (ж) Изменение задержки между пиками при установке в зазоре фольги (импульс 2). (з) ослабление тока УЭ фольговыми фильтрами при питании импульсом с амплитудой -900 кВ.

было предложено разделить функции эмиссии и ускорения в двух последовательных промежутках. В дальнейшем эта идея была также реализована для вакуумного КДМИ с взрывоэмиссионным катодом [15*]. В настоящем случае, УЭ эмитировались на крутом участке фронта импульса напряжения, который был задержан во внутренней коаксиальной линии (рис. 20а). Во внешней линии опережающая волна напряжения достигала амплитудного значения, когда сюда поступали УЭ. В результате была получена повышенная энергия УЭ при кардинальном росте временной стабильности тока I_4 по сравнению с I_3 (рис. 43д и 43е).

На рис. 44 представлены данные по наблюдению УЭ при повышенных амплитудах и длительностях импульса U_{in} причём в условиях снижения неоднородности распределения электрического поля вдоль относительно большого (≈ 20 мм) воздушного промежутка (рис. 44а). Градиентный экран выравнивал распределение так, что по направлению А-Б от трубчатого катода с плавным скруглением кромки поле спадало к аноду примерно втрое (рис. 44б). Положение (выступ) катода относительно экрана подбиралось, чтобы эмиссия УЭ начиналась вблизи или на полке импульса U_{in} (рис. 44в). К этому моменту усреднённое по промежутку поле составляло не менее 250 кВ/см, что, безусловно, достаточно для поддержания режима убегания электронов до анода. В эксперименте [61*] показано, что за пиком тока УЭ-1 с небольшой задержкой есть повторный (УЭ-2) со значительно меньшей энергией электронов. Было высказано предположение, что он появляется за счёт размножения (возможно, лавинного [105]) вторичных электронов, после прохождения УЭ-1. Вторичные УЭ ускоряются ослабленным электрическим полем за фронтом волны ионизации, порождаемой и сопровождающей УЭ-1. Поэтому их энергия ниже. В экспериментах [62*] реализована идея уменьшить ослабление этого поля, снизив ток УЭ-1 и, соответственно, плотность плазмы в волне ионизации. Для этого трубчатый катод с плавной кромкой (рис. 44а) был заменён на игольчатый (рис. 44г), что многократно уменьшало площадь поверхности прикатодного плазменного образования – источника УЭ. В результате этих мер ток УЭ-2 на порядок превзошел пик УЭ-1 (рис. 44д). В работе [63*] были проанализированы сценарии, определяющие задержку между пиками тока. Вероятен режим, когда часть УЭ-2, ускоряемых почти от катода (они набирают в ослабленном поле за фронтом волны ионизации значительную энергию, но меньшую $2eU_{in}$), и те частицы, которые порождаются первичными УЭ в конце промежутка (их энергия и скорость много меньше) попадают на анод почти «одновременно». В этом случае задержка между пиками УЭ-1 и УЭ-2 зависит от величины зазора (рис. 44е). Тот же режим подтверждает отсечка первичной волны ионизации фольгой под плавающим потенциалом (пунктир на рис. 44г), прозрачной для части УЭ-1 (рис. 44ж). Интересен эксперимент [64*], где в конфигурации промежутка рис. 44г давление воздуха было снижено до 0.3 атм. В результате, из-за падения E_c , при существующих полях все свободные электроны оказались убегающими, пики УЭ-1 и УЭ-2 слились, образовав один импульс с многократно (>10 х) возросшим током. Отметим, что разрядный промежуток, показанный на рис. 44г, при замене острой кромки катода на скруглённую и его заглублении в полость градиентного экрана, позволил значительно поднять напряжение, требуемое для получения поля E_c . Используя для питания комбинацию в виде SOS-драйвера S-500 и последовательности из трёх ГНЛ, был получен импульс U_{in} с

амплитудой около -900 кВ, с длительностью и фронтом 120 и 100 пс, соответственно. При потенциале холостого хода на катоде около 2 МВ такие временные параметры U_{in} обеспечивают ускорение электрона практически до анода [106**]. После фильтров с энергией отсечки вплоть до 1.4 МэВ ток УЭ уверенно регистрировался (рис. 44з).

Эксперименты, по генерации УЭ обычно требуют расчётов [40] доставки U_{in} на катод, так как из-за сложной конфигурации окончания катодного электрода по отражению U_{ref} импульса U_{in} сложно восстановить реальное напряжение на катоде. В частности, из-за искажений форма U_{ref} даёт лишь качественное представление о динамике коллапса напряжения на промежутке в процессе развития пробоя после прохождения УЭ при достаточной длительности U_{in} [61*, 62*, 65*]. В работах [10*, 66*, 67*] было показано, что искажения U_{ref} минимальны при анализе эмиссионных и разрядных процессов в газовом радиальном зазоре однородной коаксиальной ПЛ (рис. 45а), где на центральном (катодном) электроде выделена область эмиссии УЭ. Этот выступ (усилитель), искажающий электрическое поле, не препятствует распространению U_{in} и его отражений. Если вместо выступа в зазоре ПЛ установлена КЗ перемычка (диск), то с пикосекундной точностью определяется задержка между U_{in} и отражением U_{ref1} от области интересующих нас процессов. Отражение регистрируется методом ДР [5*], то есть, очищено от шумов на спаде U_{in} . Совмещая U_{in} с U_{ref1} (инвертированной полярности) и сравнивая их, можно анализировать динамическое сопротивление разряда $Z_d(t)$, его ток $I_d(t)$ и падение напряжения $U_d(t)$. Учитывая коэффициент отражения на скачке сопротивления ПЛ, из отношения $U_{ref1}/U_{in} = (Z_s - \rho)/(Z_s + \rho)$ определяется сопротивление Z_s параллельно включенных Z_d и волнового сопротивления ПЛ (ρ): $Z_s = \rho (U_{in} + U_{ref1}) / (U_{in} - U_{ref1})$. Здесь и далее зависимости величин от времени (t) не показаны. Тогда $Z_d = \rho Z_s / (\rho - Z_s)$; $U_d = 2U_{in} Z_d / (2Z_d + \rho)$ и $I_d = U_d / Z_d$. На рис. 45б представлен случай, когда использован «плавный» усилитель с $r_a = 0.5$

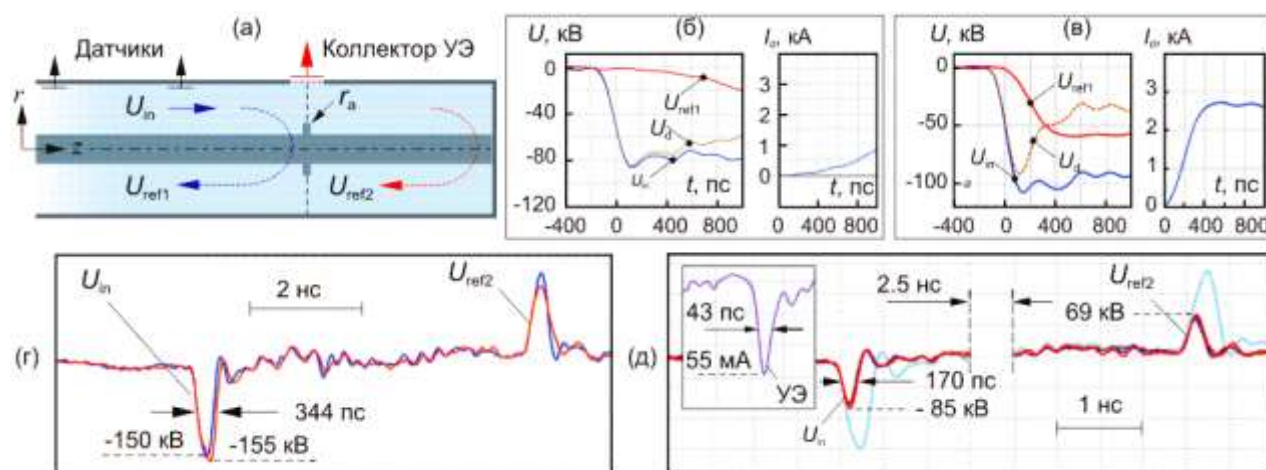


Рис. 45. (а) Геометрия коаксиальной линии с воздушной изоляцией с усилителем электрического поля, датчики и структура отражений. (б, в) Рефлектометрия напряжений (падающего, отраженного, и на разрядном промежутке) и токи разряда в отсутствии и при эмиссии УЭ, соответственно. (г) Вариация падающего субнаносекундного импульса, приводящая к проявлению разрядных процессов в однородной ПЛ. (д) Параметры U_{in} , при которых от усилителя поля до анода проходят УЭ без влияния на параметры импульса U_{ref2} , пошедшего в обратном направлении через область ионизации.

мм, где при амплитуде $U_{in} = -85$ кВ поле возрастало до 220 кВ/см, что меньше E_c и эмиссии УЭ не наблюдалось. В этом режиме развивался обычный импульсный пробой [18], разрядный ток которого нарастал за ≈ 1 нс до 0.8 кА (это в 5 раз ниже тока КЗ), достигая темпа ≈ 1.5 кА/нс. В случае фольгового усилителя поля с кромкой $r_a = 0.025$ мм (рис. 45в) УЭ регистрировались коллектором, и через 400 пс достигался разрядный ток ≈ 2.5 кА (это $> 70\%$ от тока КЗ), а темп его нарастания через 200 пс составил ≈ 9 кА/нс. Сопротивление Z_d через 600 пс снижалось до 10 Ом, что на порядок меньше, чем в предыдущем случае. То есть, при амплитуде $|U_{in}| \geq 100$ кВ был реализован быстродействующий срезающий разрядник атмосферного давления.

С помощью традиционной рефлектометрической методики в работе [10*] была проанализирована трансформация субнаносекундных импульсов при их передаче в однородной ПЛ (без усилителя поля). Для различных газов атмосферного давления определены значения амплитуд и длительностей импульсов, при которых ещё не заметны

или уже проявляются пробойные явления. Для воздуха такой пример представлен на рис. 45г. Здесь видна реакция (спад) отражения U_{ref2} от КЗ на конце ПЛ при увеличении амплитуды U_{in} всего лишь на 3%, но это ещё далеко не пробой. Напряженность электрического поля на катоде ПЛ при этом составляла 186 кВ/см, и для этого случая, согласно классической работе [107], “breakdown formative time” не должно превышать 100 пс. Противоречия, однако, нет, так как в наших условиях не было объёмной фотонной предионизации газа в промежутке, и импульс не имел плоской вершины, на которой уже после фронта в цитированной работе отсчитывалось “formative time”. При многоэлектронном инициировании с катода от интенсивности потока УЭ зависит динамика развития пробоя, что наблюдалось в [66*] при уменьшении тока УЭ в 2 раза. Между тем, как показано в [67*], если импульс напряжения короткий, то он регистрируется после отражения без искажений (рис. 45д). То есть, даже эмиссия и прохождение УЭ до анода не приводит к формированию сильно ионизованной области в промежутке ПЛ, отражающей падающий импульс.

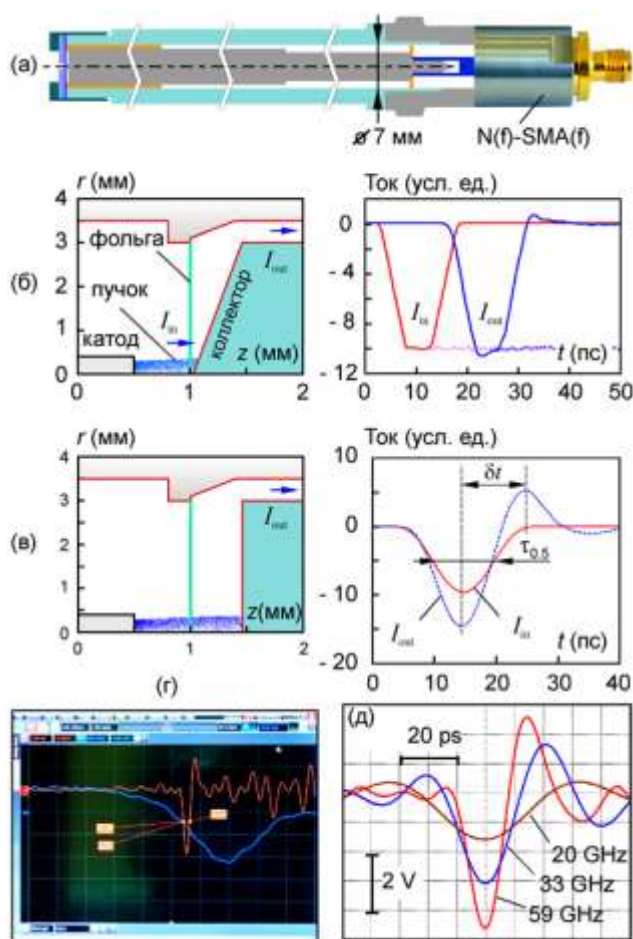


Рис. 46. (а) Коллекторный датчик тока УЭ. (б) Моделирование [40] отклика датчика с коническим коллектором. (в) То же для коллекторного блока в виде плоской дисковой ПЛ. (г) Токковый импульс УЭ на экране осциллографа с полосой 60 ГГц (50 пс/дел.). (д) Трансформация сигнала тока при снижении частотной полосы регистрации.

В промежутке с типичными электродными системами, показанными на [рис. 42а](#), при резко неоднородном распределении электрического поля и отсутствии фокусировки поток УЭ напоминает скорее расходящийся слой [\[108\]](#), чем пучок. Моделирование [\[109\]](#) экспериментов [\[54*, 67*\]](#) показало, что этот слой тонкий, так как поток имеет длительность порядка 10 пс. По этой причине регистрация тока УЭ широкоапертурным коллектором не может воспроизвести импульс тока с реальной длительностью, так как параксиальные электроны и периферийные попадают на коллектор в разное время. В этих условиях интегрированием сигнала по времени определяется заряд фракции УЭ, достигшей коллектора. Информацию о длительности тока можно получить только при его коллимации диафрагмой с отверстием малого диаметра. Однако и в этом случае, применение широкополосного осциллографа не решает вопрос корректного воспроизведения импульса тока УЭ, так как есть проблема согласования коллекторного блока с регистрационным трактом. При указанной длительности тока коллекторный блок с радиальными размерами в единицы миллиметров представляет длинную (неоднородную) дисковую линию передачи.

Как показано в работе [\[68*\]](#), малые искажения импульса тока обеспечиваются для тонкого параксиального сгустка электронов с помощью датчика ([рис. 46а](#)), если коллекторный блок представляет дисковую коническую линию постоянного импеданса ([рис. 46б](#)). Она согласована с низкоомным входом ступенчатой ПЛ, подключаемой на 50-омном выходе к осциллографу. Такой коллектор реализуется только в расчётной модели ([рис. 46б](#)), потому что между плоской анодной фольгой (или сеткой, прозрачной для электронов) и коллектором на оси должен быть очень узкий зазор. На практике его приходится увеличивать, как было представлено в [\[56**, 52*\]](#). В пределе зазор выполняется плоским [\[69*\]](#) и коллектор оказывается рассогласованным с ПЛ. В последнем случае ([рис. 46в](#)) численное моделирование показало [\[68*\]](#), что трапецеидальный сигнал тока (или в форме гауссовой огибающей) даёт на выходе датчика биполярный сигнал, где амплитуда неинвертированного лепестка завышена по сравнению с реальным импульсом тока ([рис. 46б](#)). Важно, однако, что интеграл по времени (то есть, заряд сгустка) одинаков в обоих случаях. Зная заряд, и учитывая привязку пиков биполярных лепестков к фронтам тока сгустка (то есть, оценивая его длительность на полувысоте τ_{05} с учётом коррекции [\[92\]](#)) можно определить значение пикового тока, поделив заряд на τ_{05} ([рис. 46в](#)). В эксперименте [\[69*\]](#) при использовании коллимирующей диафрагмы с диаметром отверстия 1 мм такие импульсы тока УЭ с длительностью на полувысоте ≈ 10 пс регистрировались осциллографом с полосой ≈ 60 ГГц ([рис. 46г](#)). Использовался конический стальной катод с углом раствора 90° ; промежуток до анода составлял 6 мм. На [рис. 46д](#) показано, как огибающая импульса тока трансформируется при недостаточной частотной полосе осциллографа. Представленные данные о длительности тока УЭ подтверждались в численном моделировании соавторов [\[69*\]](#). Им также не противоречат измерения токовых импульсов УЭ в альтернативных экспериментах [\[110\]](#). В работе [\[69*\]](#) было обосновано предположение, что механизмом, определяющим столь быстрое прекращение тока УЭ, является снижение напряженности электрического поля ниже E_c . Это происходит на границе плазмы, возникающей за время, сравнимое с необходимым для ударной ионизации молекул газа в поле порядка E_c , при котором УЭ появились.

В предыдущем эксперименте коллимированную диафрагмой фракцию потока УЭ можно назвать пучком, так как при характерной энергии порядка 200 кэВ длина 10-пс сгустка (≈ 2 мм) вдвое больше диаметра. Однако определение «пучок» более корректно применять, если такой сгусток «существует» без коллимации, и не в субмиллиметровом зазоре между анодной фольгой и коллектором, а в ускоряющем промежутке и затем - на участке дрейфа за анодом. Такая ситуация реализуется по аналогии с вакуумным КДМИ [2*] при наложении сильного магнитного поля B_z , когда электроны замагничены. В эксперименте [70*], где в конфигурации как на рис. 43г использовался конический стальной катод с углом раствора 40° и импульс питания (5 на рис. 36) с амплитудой -155 кВ, выполнялся нелокальный критерий убегания электронов [59*] по всему промежутку до анода ($D = 30$ мм). Судя по свечению люминофора (рис. 47а), установленного на таком расстоянии от

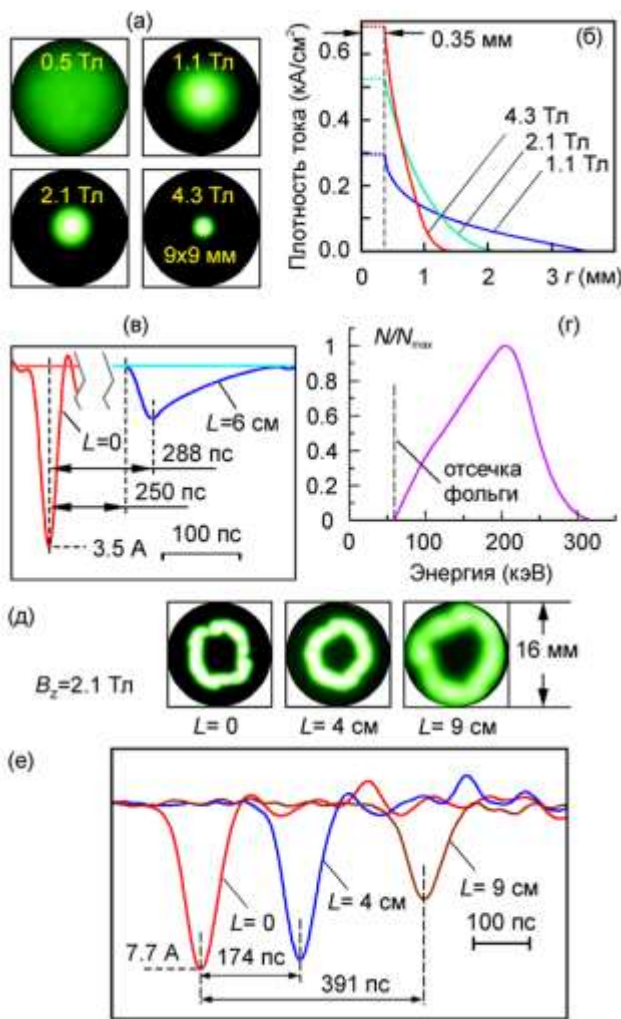


Рис. 47. (а) Свечение люминофора под воздействием параксиального замагниченного сгустка УЭ и распределение его плотности тока по сечению (б). (в) К времяпролётной оценке энергии в пике тока УЭ и спектр энергий после дрейфа (г). (д) Свечение люминофора при дрейфе трубчатого замагниченного сгустка и импульсы тока в разных сечениях (е).

катода в области анодного сужения, магнитное поле $B_z = 1 \div 4.3$ Тл обеспечивало регистрацию полного тока сгустка датчиком с коллектором диаметром 9 мм. Амплитуда тока была около 5 А при $\tau_{05} \approx 23$ пс. Значение τ_{05} определялось полосой осциллографа 33 ГГц, как на рис. 46д. При регистрации тока за диафрагмами с различными отверстиями получено радиальное распределение плотности тока сгустка (рис. 47б), которая при $B_z = 4.3$ Тл в параксиальной области диаметром 0.7 мм достигла рекордной для УЭ в воздухе величины ≈ 0.65 кА/см². Времяпролётным методом [71*] при смещении коллектора на 6 см было установлено, что в пике тока кинетическая энергия электронов ≈ 200 кэВ (рис. 47в). При этом в спектре рис. 47г, рассчитанном в предположении формы импульса тока до дрейфа ($L = 0$) в виде δ -функции, присутствуют УЭ с энергией, > 300 кэВ. Аналогичный эффект увеличения энергии УЭ (из-за компрессии электрического поля фронтом волны ионизации [111-113]) до значений, больших чем это определяется напряжением ХХ на катоде, был получен во времяпролётных измерениях для пучков УЭ, ускоряемых от острокромочных трубчатых стальных катодов [71*]. Например, при диаметре катода 8 мм

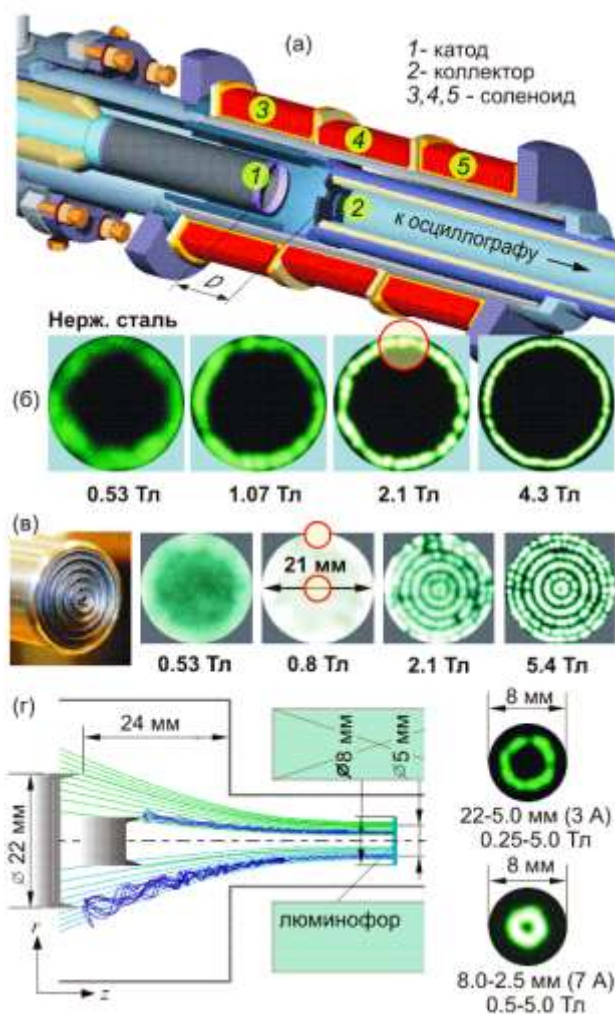


Рис. 48. (а) Воздушный промежуток с катодом диаметром 22 мм и однородным B_z . (б) Автографы пучка УЭ на люминофоре. Кружок – положение коллектора при измерении стабильности по времени. (в) Концентрические графитовые катоды и автографы дискового сгустка УЭ. (г) Сжатие трубчатого пучка УЭ в нарастающем магнитном поле. Указаны перепады диаметра пучков УЭ и магнитного поля, а также токи на коллекторе.

(рис. 47д и 47е), ток, заряд и энергия УЭ составили $8 \div 12$ А, ≈ 0.5 нКл и ≈ 285 кэВ, соответственно. С учётом размеров свечения на рис. 47д при $L = 0$ плотность тока УЭ оценивается в ≈ 40 А/см².

В работах [9*, 72*, 114**] описаны эксперименты, где диаметр стального трубчатого катода был увеличен до 22 мм (рис. 48а). Так как длина эмиссионной кромки большая, при амплитуде $U_{in} = -155$ кВ в магнитном поле 2.1 Тл (рис. 48б) ток УЭ достиг ≈ 40 А, а его заряд $3 \div 4.5$ нКл. В случае графитового катода такого же диаметра свечение люминофора было более однородным при малых B_z , но менее ярким, чем на рис. 48б, так как ток и заряд сгустка снизились до $14 \div 16$ А и ≈ 0.8 нКл из-за раннего автоэмиссионного инициирования ионизации газа. Между тем, УЭ эмиттировались стабильно: стандартное отклонение было около 2 пс, что на порядок меньше, чем для стали. Последнее определяется неоднородной структурой центров АЭЭ на стали, в окрестности которых с увеличенным разбросом по времени формируются дискретные струи УЭ, хорошо различимые на автографах в сильных полях B_z (рис. 48б).

Эффект стабильной по времени эмиссии УЭ с графита позволил получить дисковый сгусток УЭ, у которого диаметр в несколько раз превышал аксиальную длину [73*]. Применялась система концентрических катодов (рис. 48в) где

каждый трубчатый усилитель поля имел индивидуальное положение по «z» (чем меньше радиус, тем больше выступ к аноду) и радиус скругления кромки. Эти параметры подобраны в расчётах [71*, 104] так, чтобы сложение фронта падающего импульса (4 на рис. 3б) и его отражения к моменту начала эмиссии УЭ выравнивало потенциал одновременно на всех шести усилителях. Действительно, разбросы моментов эмиссии в различных областях по радиусу (это два кружка на рис. 48в при $B_z = 0.8$ Тл) оказались меньше 2 пс, а их абсолютный сдвиг (< 10 пс) определялся выступом параксиального усилителя поля к аноду (2.5 мм). В сильных магнитных полях сгусток состоял из набора дискретных струй, а

наиболее однородная структура получалась при $B_z = 0.8$ Тл. Для этого варианта полный заряд сгустка по измерениям широкоапертурным коллектором был в диапазоне $0.9 \div 1.2$ нКл, а с учётом коррекций измеренной длительности τ_{05} , ток сгустка составил $40 \div 50$ А.

В дальнейшем работа с широкоапертурными сгустками УЭ проводилась с целью увеличения их заряда (1) и плотности тока на аноде (2), что будет кратко представлено в Разделе 8.1. В качестве предварительного обоснования второго направления был использован эксперимент [74*], идея которого понятна из сравнения автографов УЭ при $L = 0$ или 6 см с картиной на выходе соленоида при $L = 9$ см (рис. 47д). Здесь диаметр замагниченного потока УЭ возрастает из-за расхождения силовых линий поля. Понятно, что возможна обратная ситуация, если ускорение УЭ будет происходить в магнитном поле, адиабатически нарастающем к области сгущения силовых линий (рис. 48г). Подобное реализуется, например, в электронных пушках гиротронов, где в области эмиссии электрическое поле почти ортогонально магнитному. В нашей ситуации УЭ выходят из области слабого поля под разными углами к магнитной силовой линии и имеют большой разброс начальных поперечных скоростей. Соответственно, для части из них может реализоваться отражение (магнитное зеркало) от области сильного поля или на пути к ней. Факторами появления зеркала является степень перепада магнитного поля, его абсолютное значение и начальный угол траектории электрона к силовой линии. На рис. 48г приведены по 5 траекторий для двух диаметров и положений катодов при указанных перепадах магнитного поля для набора углов вылета частицы от $\pm 90^\circ$ в переднюю полусферу. Как видно, с катода диаметром 22 мм на коллектор попадает 1 частица. Прошедший ток в этих условиях затягивается по длительности. При 8-мм катоде отражений нет. Пучок УЭ сжимается по радиусу втрое, сохраняет трубчатую структуру, а его ток на коллекторе оказывается значительно короче и вдвое больше по амплитуде (7 А). Плотность тока на коллекторе достигает 100 А/см^2 .

8. Применение коротких импульсов напряжения, пучков и СВЧ излучения

8.1. Источники пучков для исследований импульсной катодолюминесценции

В последние 2-3 десятилетия сильноточные пучки с длительностью в единицы наносекунд, энергией электронов 100–200 кэВ и плотностью тока за анодной фольгой вакуумного диода $100\text{--}200 \text{ А/см}^2$ широко используются для изучения импульсной катодолюминесценции диэлектриков [115]. В отличие от других способов возбуждения люминесценции, ИКЛ характеризуется относительно высокой яркостью и информативностью спектра, а также специфической кинетикой излучения [75*]. Отчасти с учётом потребностей работ по направлению ИКЛ, в своё время была выполнена разработка электронного ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ [29**, 76*], который входит в состав анализатора ИКЛ-спектров CLAVI [77*] (рис. 49а).

С появлением источников УЭ с токами амперного диапазона возник интерес к их применению в задачах ИКЛ. Поскольку длительность импульсов тока УЭ пикосекундная, они имеют на порядки меньшее энергосодержание, чем сильноточные взрывоэмиссионные пучки, т.е., характеризуются «неинвазивным» воздействием на объект анализа. Согласно [70*], несмотря на длительность порядка 20 пс, плотность тока (j) замагниченных

параксиальных сгустков УЭ (рис. 46б) оказалась сравнима с параметрами сильноточных пучков, выводимых за анодную фольгу вакуумного ВЭЭ-диода. За счёт изменения однородного магнитного поля в эксперименте [75*] по схеме на рис. 50а было показано, что при $B_z \approx 1$ Тл, когда в параксиальной области $j \geq 300$ А/см², ИКЛ возбуждается в тестовых кристаллах стабильно. Её спектр и кинетика затухания полностью совпадают с таковыми при облучении сильноточным наносекундным пучком. Отличие состоит в задержке появления люминесценции после воздействия сгустка УЭ, обусловленной её разгоранием при малом вводимом заряде, составлявшем ≈ 0.15 нКл. Усреднённая по поперечному сечению плотность заряда сгустка при этом была ≈ 1 нКл/см².

Представлялось целесообразным без снижения последнего параметра увеличить заряд УЭ, вводимый в образец. На первом этапе мы воспользовались результатом работы [73*], но поместили систему соосных графитовых катодов (рис. 48в) в неоднородное (нарастающее) магнитное поле, отключив первую из обмоток соленоида (3 на рис. 48а). Так было получено умеренное радиальное сжатие дискового сгустка УЭ (рис. 50б), в то время как заряд сгустка мало изменился: с $(0.7 \div 1)$ до 0.74 нКл. Когда соосные графитовые катоды были заменены на аналогичные из стали [72*], увеличилось напряжение эмиссии УЭ на фронте импульса питания и их кинетическая энергия, а заряд в однородном $B_z \approx 2$ Тл возрос до $(2.9 \div 3.4)$ нКл. В дальнейшем соосные стальные катоды использовались в комбинации с магнитной системой из катушек Гельмгольца (рис. 50в), располагаясь снаружи – в области слабого поля. Между катушками однородное B_z втрое больше. Это зона доступа, где размещается облучаемый образец, датчики тока или излучения. В отличие от схемы на рис. 50а, излучение регистрируется не только «на проход» через образец, но и «на отражение». При снижении амплитуды напряжения питания до уровня, доступного наиболее компактному источнику РАДАН-А4 (рис. 49б), заряд сгустков, сжатых в относительно слабых магнитных полях (рис. 50г), оказался ≈ 1.5 нКл. Это вдвое больше, чем для системы графитовых концентрических катодов (рис. 50б). Плотность заряда на аноде составила ≈ 1.2 нКл/см², что не меньше, чем для параксиального сгустка УЭ (рис. 50а), в то время как полный заряд возрос в 10 раз. Отметим, что конструкция на рис. 50в предназначена для интегрирования с источником РАДАН-А4 (рис. 49б). Этот источник может дополняться срезающим



Рис. 49. (а) Импульсный катодолуминесцентный спектроскоп CLAVI на основе драйвера РАДАН-ЭКСПЕРТ с отпаянным вакуумным электронным диодом ИМА3-150Э. (б) Современная версия наиболее компактного 2-нс драйвера РАДАН-А4, обеспечивающего на 50-омной нагрузке (ПЛ) формирование импульсов (в), укорачиваемых коаксиальным атмосферным разрядником рис. 45а в режиме инициирования с УЭ (Рис. 45в).

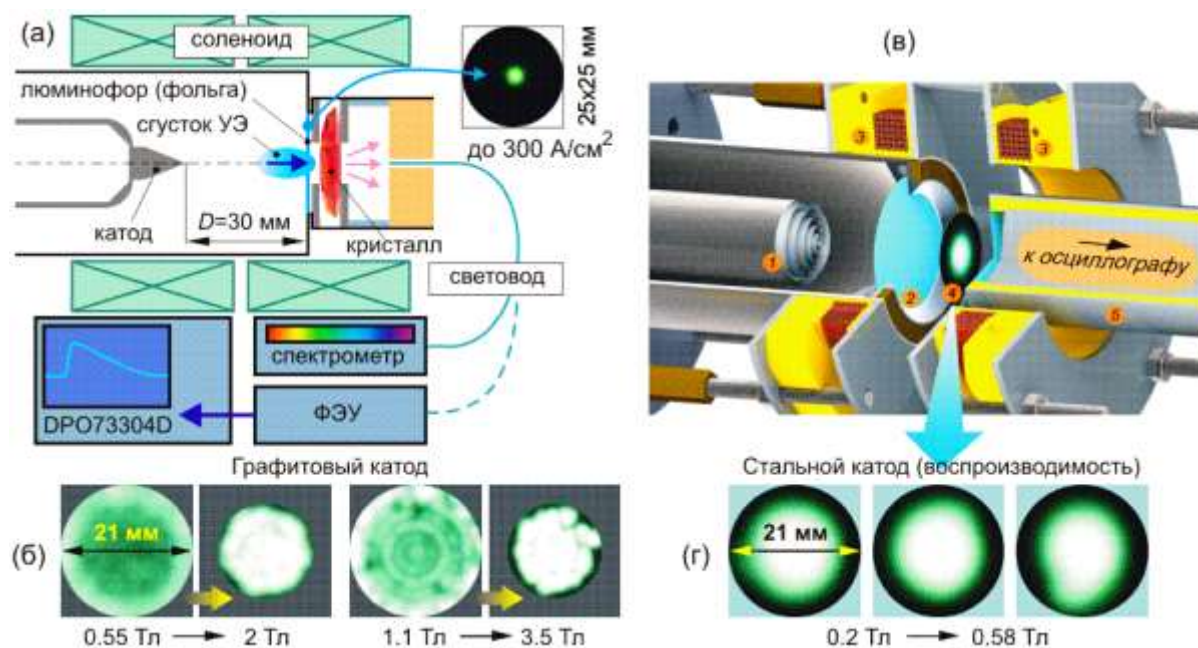


Рис. 50. (а) ИКЛ под воздействием параксиального сгустка УЭ. (б) Сжатие дискового сгустка УЭ от соосных графитовых катодов нарастающим магнитным полем. (в) Воздушный промежуток со стальными катодами (1) и фольгвым окном (2) для ускорения УЭ в нарастающем магнитном поле на периферии катушек Гельмгольца (3). В зоне с однородным магнитным полем показано положение люминофора/облучаемого образца (4) и коллектор датчика тока/заряда УЭ. (г) Воспроизводимость свечения люминофора при $U_{in} = -135$ кВ.

разрядником, построенным по принципу на [рис. 45а](#) и [45в](#). Тогда, в зависимости от высоты радиального выступа в ПЛ, импульс может укорачиваться ([рис. 49в](#)). В этом случае его можно использовать для генерации субнаносекундного вакуумного ВЭЭ-пучка с уменьшенным тепловым и радиационным воздействием на облучаемый образец.

8.2. Излучение полупроводниковых лазерных мишеней

Высоковольтные импульсы и сильноточные пучки с длительностью в доли наносекунды востребованы для изучения воздействия на полупроводниковые лазерные мишени, где может быть получена генерация интенсивного индуцированного излучения [116, 117]. Она возникает при выполнении определенных требований к ПЛМ и параметрам накачки, когда под действием электронного пучка или сильного ($\geq 10^6$ В/см) электрического поля происходит лавинообразная ионизация атомов решетки и образуются электронно-дырочные (e-h) пары, при рекомбинации которых испускаются фотоны.

Для лазерной генерации в ПЛМ использовались высоковольтные импульсы типа 4 и 5 на [рис. 36](#). Сильное электрическое поле в мишени создавалось электродной системой [рис. 51а](#) в атмосферном воздухе. Электронные пучки формировались в коаксиальном вакуумном диоде без магнитной фокусировки с типичной конфигурацией, показанной на [рис. 51б](#). Диагностика излучения включала фоторегистрацию, спектрометрию и измерение мощности фотокатодом ФЭК-22. Фотохронография излучения выполнялась стрек-камерой CORDIN-173 с применением двух схем синхронизации развёртки ЭОП ([рис. 51в](#) и [51г](#)).

В экспериментах [78*, 79*] изучалось воздействие субнаносекундных импульсов напряжения с амплитудой $-(20 - 250)$ кВ на плоскопараллельные ПЛМ толщиной 1-2 мм из объемного монокристалла ZnSe. Оптический резонатор был образован параллельными плоскостями таких пластин. При напряжении -100 кВ расчётная [104] напряженность поля на кромке катода, примыкающей к ПЛМ (рис. 51а) достигала 6×10^6 В/см. Согласно [117], при такой напряженности концентрация возникающих e-h пар в широкозонных полупроводниках при наличии оптического резонатора достаточна для лазерной генерации. В отличие от стримерных лазеров [117], сильное поле обеспечивает распространение разряда не по межкристаллическим плоскостям, а в направлении силовых линий к аноду, то есть, зона возбуждения резко уменьшается и улучшается направленность излучения. Лазерная генерация наблюдалась [78*] при напряжениях $|U_{in}| > 40$ кВ. В диапазоне 50÷100 кВ спектральный максимум смещался с 477 до 480 нм, уширяясь с 3 до 10 нм. Направленность излучения была около 3° (вставка 20х20 мм на рис. 52а). Для ПЛМ из CdS в [79*] при U_{in} вплоть до -170 кВ наблюдался широкий спектр (рис. 52б), обусловленный как индуцированным излучением материала ПЛМ (530 нм), так и свечением прикатодной плазмы (желтое свечение на вставке диаметром 18 мм, рис. 52б).

Попытка определить мощность лазерной генерации была предпринята в экспериментах [80*, 81*] при полевой накачке ПЛМ из ZnSe, CdS и их твёрдых растворов, причём проводилось сравнение с возбуждением электронным пучком (рис. 51б), имевшим после коллимации диаметр 1 мм. Пиковая мощность оказалась максимальной (6 кВт) при полевой накачке образца ZnSe толщиной 1 мм, на одну плоскость которого нанесено покрытие с коэффициентом отражения 0.95. Однако полученное значение мощности воспринималось как нижняя оценка, поскольку измерения фотокатодом ФЭК-22 давали сигналы (рис. 52в), на порядок более длинные по основанию (до 5 нс), чем приложенный импульс напряжения или ток пучка. Действительно, в измерениях датчиком на базе PIN-диода длительность импульсов излучения различных мишеней оказалась гораздо короче: 100÷300 и 150÷500 пс при накачке полем или пучком, соответственно [82*].

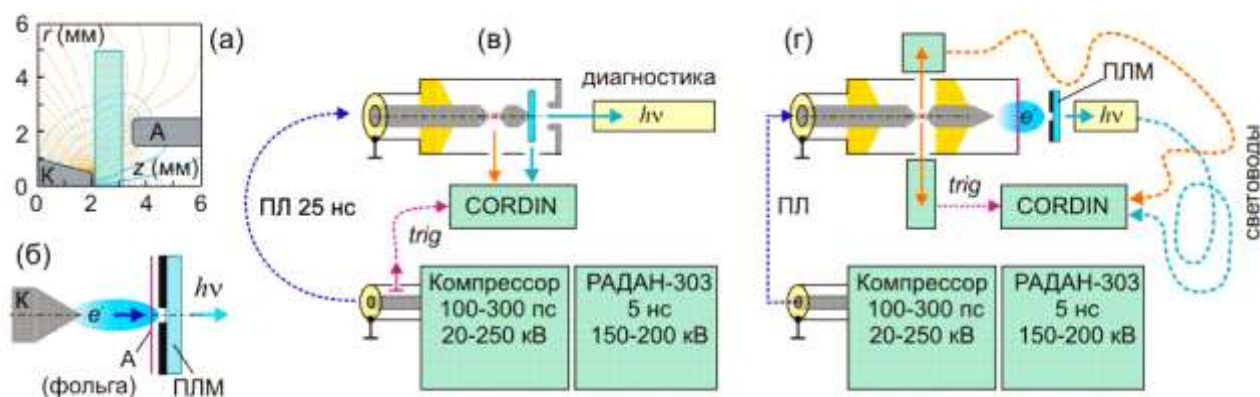


Рис. 51. Конфигурации электродных промежутков при полевом (а) и пучковом (б) возбуждении ПЛМ. (в) Схема установки для получения фотохронограмм излучения ПЛМ с синхронизацией стрек-камеры за счёт задержки высоковольтного импульса в ПЛ. (г) Синхронизация обеспечена задержкой анализируемого излучения длинным световодом.

Дальнейший анализ пикосекундной динамики излучения ПЛМ в воздушном электродном промежутке выполнялся стрек-камерой. Особенность этих измерений – необходимость опережающего на 25 нс запуска развёртки ЭОП камеры и проблема привязки генерации к фронту напряжения на катоде электронного промежутка или электронного

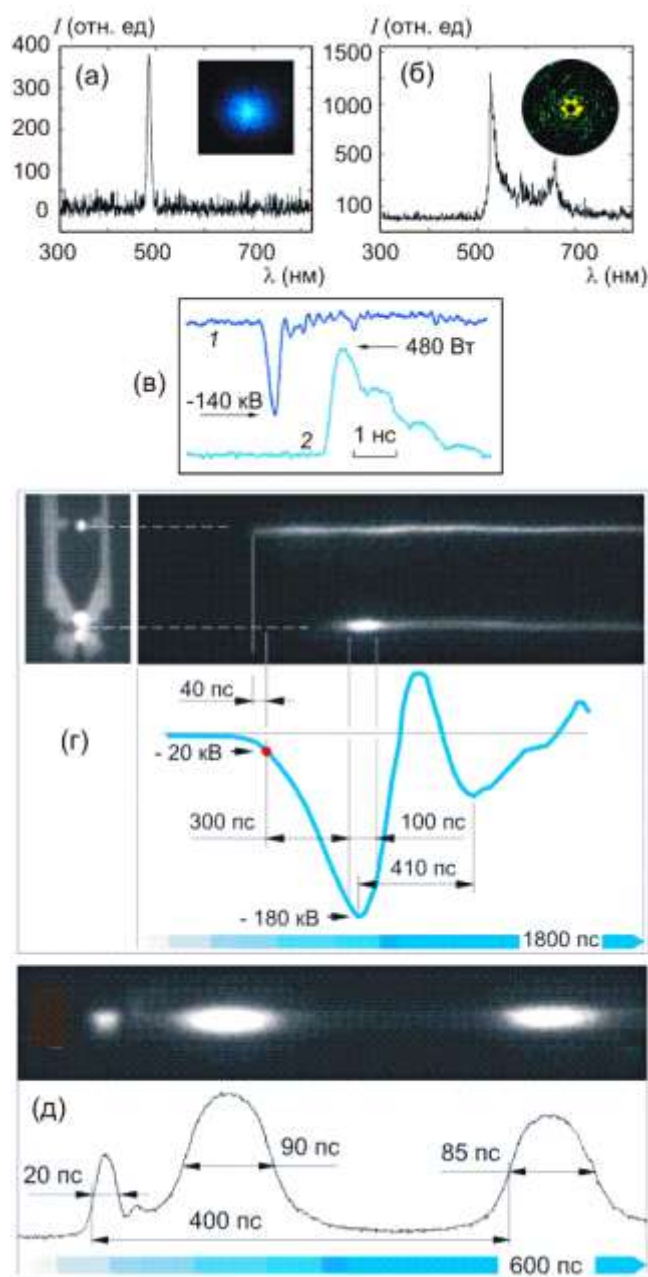


Рис. 52. Полевое возбуждение ПЛМ (рис. 51а): (а) спектр генерации ZnSe и излучение на экране в дальней зоне (4 см). Спектр излучения CdS в отсутствие генерации: свечение плазмы у кромки катода и «зародыши» генерации. (г) Привязка фотохронограммы к импульсу питания катода. (д) Генерация в ZnSe на двух импульсах напряжения и короткий лидирующий всплеск.

диода. В схеме рис. 51в стрек-камера запускалась сигналом с датчика напряжения в начале длинной ПЛ, по которой высоковольтный импульс поступал на катод с задержкой 25 нс [83*]. Перед катодом на расстоянии 12 мм имелся субмиллиметровый искровой промежуток, настроенный на пробой при -20 кВ. Свет искры давал опорный сигнал на экране стрек-камеры. Расчёт [40] трансформации высоковольтного импульса при доставке на катод позволял установить, при каком напряжении в условиях полевой накачки начиналась лазерная генерация (рис. 52г). Судя по фотохронограммам, иногда возникала повторная генерация (рис. 52д) на отраженном импульсе напряжения. При некоторых значениях воздушного зазора от катода до мишени сначала наблюдался короткий (15÷20 пс) всплеск излучения (рис. 52д). Его появление связывалось с эмиссией потока убегających электронов, которые в резко неоднородном поле на дистанции в доли миллиметров от катода до мишени набирают энергию в десятки килоэлектронвольт, а плотность их тока может быть здесь значительной [70*]. Действительно, в эксперименте [84*] было установлено, что при вариации давления в электродном промежутке от 0.1 до ≈ 3 Торр происходит укорочение лазерного импульса до 20 пс. Это коррелирует с данными на рис. 12 о диапазоне давлений, где ВЭЭ-механизм эмиссии электронов в вакууме переходит в режим убегания в газе.

Для исследования возбуждения лазерной генерации ($\lambda = 522$ нм) в ПЛМ из CdS высокоинтенсивным субнаносекундным электронным пучком с энергией 70÷150 кэВ применялся вариант установки на [рис. 51г](#). Здесь запуск стрек-камеры производился по короткому кабелю импульсом напряжения, «преобразованным» из света искры в воздушном зазоре ПЛ перед катодом. Эта же искра, как и в предыдущем случае, давала опорный сигнал для временной привязки изображения камеры. Необходимая задержка (25 нс) обеспечивалась разницей длин световодов, по которым оптические сигналы (опорный и генерации) поступали на объектив камеры. Для измерения энергии лазерного излучения использован пирозлектрический датчик J3S10. Пиковая мощность излучения оценивалась с учетом энергии и длительности импульса. Мишень, изготовленная из монокристаллической пленки CdS, была закреплена на сапфировом диске. Толщина плёнки выбиралась с учётом глубины проникновения пучка. На поверхностях пленки нанесены отражающие покрытия, образующие оптический резонатор. ПЛМ устанавливалась за анодной Al-Be фольгой ВД после диафрагмы с диаметром отверстия 1 мм. В экспериментах [\[85*\]](#) были получены зависимости удельной мощности (интенсивности) коллимированного пучка ([рис. 53а](#)) и энергии лазерного излучения ([рис. 53б](#)) от амплитуды напряжения, питающего ВЭЭ-катод. Максимальная интенсивность лазерного излучения ПЛМ из CdS при длительности импульса на полувысоте 250 пс составила $3 \cdot 10^7$ Вт/см² при пиковой мощности 10 МВт и эффективности $\approx 10\%$, т.е., была не меньше рекордной величины для полупроводниковых

лазеров. Была предпринята в целом успешная попытка [\[86*\]](#) использовать этот результат при облучении ВЭЭ-пучком увеличенного сечения многоэлементной ПЛМ из CdS.

Судя по фотохронограммам, лазерный импульс после возникновения генерации с некоторой задержкой на фронте повторяет форму импульса питающего напряжения (и тока пучка). Эта информация и режим повторной генерации на [рис. 52д](#) инициировали эксперимент [\[87*\]](#), где был применён высоковольтный импульс [\[45**\]](#) с несколькими периодами амплитудной модуляции на частоте ≈ 5 ГГц. Фронт тока пучка и длительность пиков на полувысоте составили ≈ 100 пс. Из сравнения результатов ([рис. 53в](#)) в отсутствие и при наличии ВЧ модуляции следует, что во втором случае отсутствие генерации на первом пике связано с недостаточной плотностью мощности

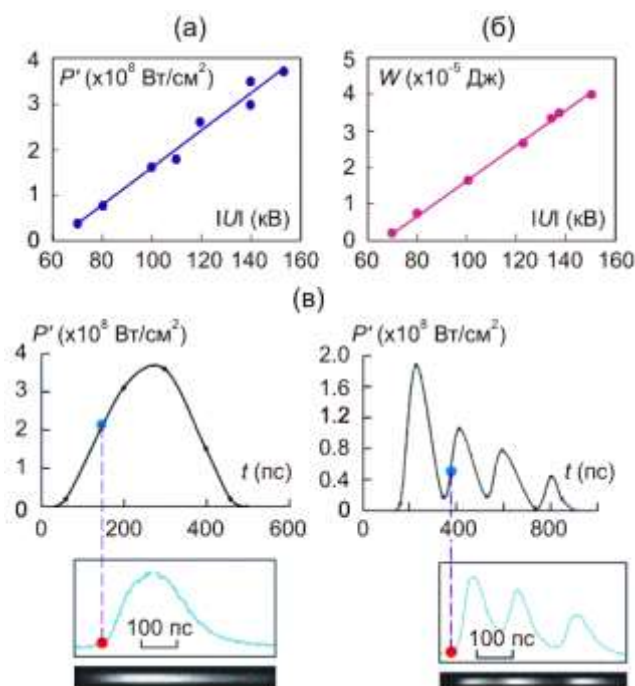


Рис. 53. Плотность мощности пучка (а) и энергия лазерного излучения ПЛМ из CdS (б) в зависимости от амплитуды импульса питания катода. (в) Временная структура лазерной генерации при питании катода моноимпульсом напряжения и при амплитудной модуляции.

пучка для накопления в ПЛМ неравновесных носителей заряда (e-h пар, или возбуждённых состояний). Их пороговая для лазерной генерации концентрация достигается на втором всплеске тока пучка. В результате, начиная с этого момента, реализуется режим генерации периодических пиков излучения.

8.3. Высокоградиентное ускорение электронов полем микроволнового сверхизлучения

Резистивность электродинамических систем к воздействию экстремальных электрических полей с переходом к субнаносекундным экспозициям должна проявляться не только при генерации микроволновых импульсов гигаваттной мощности [32*, 33*, 88**], но и в «обратных» задачах - при ускорении заряженных частиц в структурах, накачиваемых СВЧ излучением. Известно, что при микросекундной накачке УС длинноволновыми клистрономы рабочий градиент ускоряющих полей составляет 30-50 МВ/м (рекордные значения не превышают 100 МВ/м). К эффектам, ограничивающим этот параметр, относится ВЧ нагрев микронного слоя металла УС [118], вызывающий деградацию поверхности [119] и последующее инициирование ВЭЭ процессов [120], что приводит к развитию вакуумных СВЧ пробоев.

Как отмечалось в Разделе 5, СВЧ пробой (рис. 33г), инициированные в полях ≈ 2 МВ/см на стенке ЗС [32*], не препятствовали выводу из СИ ЛОВ импульса излучения с длиной волны ≈ 1 см при его мощности 2 ГВт и длительности ≈ 300 пс. За времена в сотни пикосекунд переход от АЭЭ к ВЭЭ только начинается и расширение возникающей ВЭЭ-плазмы было недостаточным, чтобы обеспечить поглощение излучения. Аналогичная резистивность наблюдалась для 38-ГГц СИ ЛОВ с мощностью ≈ 1 ГВт [88**]. На рис. 54а

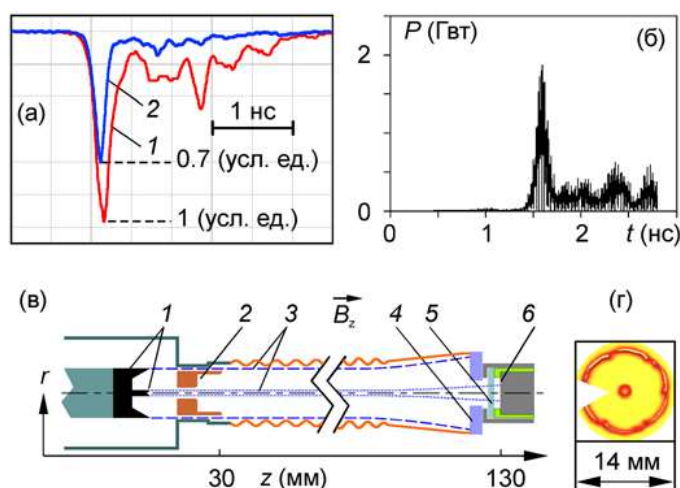


Рис. 54. (а) Сигналы с детектора для импульсов СИ (38 ГГц) без пробоя вакуумного окна (1) и с пробоем (2). (б) Мощность импульса СИ в численной модели [40]. (в) Схема генераторно-ускорительного блока с замедляющей системой СИ ЛОВ: 1 – катоды; 2 – резонатор; 3 – пучки; 4 – коллектор внешнего пучка; 5 – Al-фильтр; 6 – датчик тока. (г) Отпечатки пучков перед коллектором 4.

представлен такой детектированный импульс СИ (1), когда удлиненный импульс напряжения питания (2 на рис. 36) обеспечивал генерацию лидирующего пика СИ и последующих всплесков, близких по форме к расчётным (рис. 54б) [40]. Если вакуумное окно рупорной антенны не было защищено электропрочным газовым объёмом (SF_6), возникал пробой воздуха, укорачивающий основной пик и отсекающий эти пост-импульсы излучения (2 на рис. 54а). Аналогичная отсечка имела бы место, если пробой возникал в вакуумной ЭДС, где на кромке рефлектора (рис. 22б) при мощности СИ ≈ 1 ГВт достигалась напряженность поля ≈ 3 МВ/см.

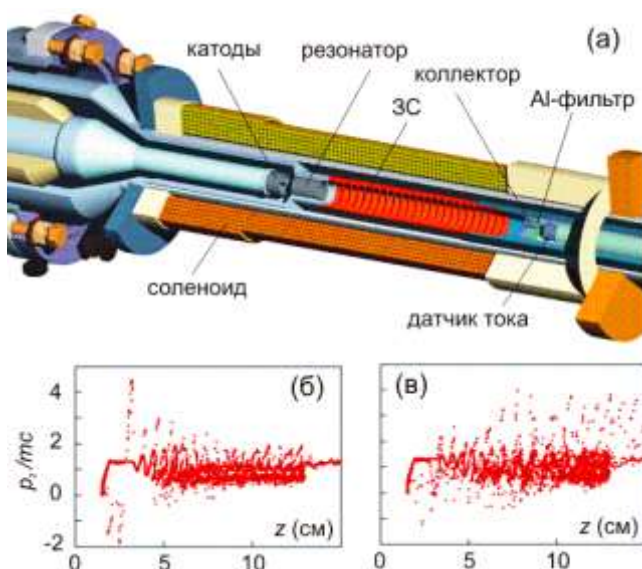


Рис. 55. (а) Конструкция блока генератор - ускоритель. Расчёт фазовых портретов ускоренных сгустков в моменты времени 1.03 нс (б) и 1.37 нс (в) от начала эмиссии катодов.

ускорительный канал. По этой причине была применена одноканальная схема генераторно-ускорительного блока (рис. 54в) со «свободным» выводом ускоренных сгустков для диагностики. Использована система коаксиальных взрывоэмиссионных катодов. Внешний трубчатый пучок с энергией ≈ 300 кэВ и током ≈ 2.3 кА генерирует импульс СИ, который, распространяясь навстречу электронному потоку, накачивает короткий полуволновый резонатор, расположенный перед входом в ЗС. Резонатор подвешен на радиальных фольговых ламелях и пучок здесь дробится на азимутальные сегменты (рис. 54г). Это, однако, не препятствует генерации СИ (мода TM_{01}). Для проводки генераторного трубчатого пучка в радиальной щели (0.5 мм) над резонатором использована методика [20*]. С внутреннего катода инжектируется параксиальный пучок с несколько меньшей энергией ≈ 250 кэВ (из-за более высокого потенциала относительно стенки), ток которого мог регулироваться в широких пределах (единицы-сотни ампер), при изменении аксиального положения эмиссионной кромки. Этот пучок инжектируется в резонатор через отверстие в торцевой стенке. Здесь он ускоряется, а затем проходит вдоль ЗС и, незначительно расширяясь по силовым линиям фокусирующего соленоида, выводится в зону диагностики.

Конфигурация разработанного генераторно-ускорительного блока (рис. 55а) была в деталях воспроизведена для численного эксперимента [88*], выполненного с помощью кода КАРАТ [40]. Единственное отличие расчётной модели от реальной конструкции состояло в замене системы подвески резонатора с ламелей на фольгу, прозрачную для электронов. На рис. 55б показаны расчётные фазовые портреты комбинации обоих пучков сначала в момент максимума накачки резонатора, а затем – когда эти ускоренные электроны максимальных энергий достигают области диагностики. На интервале между этими моментами энергия частиц периодически варьировалась из-за несинхронного взаимодействия с отраженным от резонатора попутным импульсом СИ, который электроны обгоняют. Как видно, в начальный

Представленные выше данные послужили основанием для проведения эксперимента по высокоградиентному ускорению электронных сгустков в экстремальных полях импульса сверхизлучения 8-мм диапазона длин волн на стадии задержки СВЧ пробоя. В принципе, для этой задачи могла быть применена установка с двумя синхронизированными каналами, как на рис. 40а. Ускоряющий низкодобротный полуволновый резонатор, накачиваемый импульсом СИ, мог быть установлен взамен ЗС ведомой СИ ЛОВ. Однако проблему в этом случае представляет диагностика ускоренных сгустков, которая конфликтует с квазиоптическим трактом ввода излучения в

момент достигается нормированный продольный импульс электронов $p_z/mc = 4.4$ (m – масса электрона; c – скорость света). С учётом известной связи импульса релятивистского электрона с кинетической энергией (ϵ_k), для этого случая получаем $\epsilon_k \approx 1.8$ МэВ. То есть, прирост ϵ_k от начальных 250 кэВ составил 1.55 МэВ. С учётом глубины резонатора 4 мм, градиент ускорения достиг ≈ 400 МВ/м.

В эксперименте [89*] с помощью «медленного» коллекторного датчика (разрешение ≈ 0.1 нс) определена задержка (≈ 0.7 нс) появления ускоренной фракции электронов параксиального пучка (5 на рис.56) по отношению к фронту их полного тока ≈ 150 А (4 на рис.56). Задержка находится в достаточном соответствии с результатом численного моделирования. В этом измерении параксиальный пучок проходил на коллектор через Al-фильтр 400 мкм, то есть, в наблюдавшемся импульсе тока с амплитудой 44 А и длительностью на полувысоте ≈ 500 пс содержались электроны с энергией > 300 кэВ. Их суммарный заряд достигал ≈ 25 нКл. В дальнейшем этот импульс был записан (рис.57) коллекторным датчиком [68*] с разрешением не хуже 10 пс. Наблюдать дискриминированную последовательность ускоренных сгустков не представлялось возможным. Во-первых, сгустки после фильтров низких энергий имеют широкий спектр энергий и размыты по времени. Вторая причина связана с отражениями в области коллектора

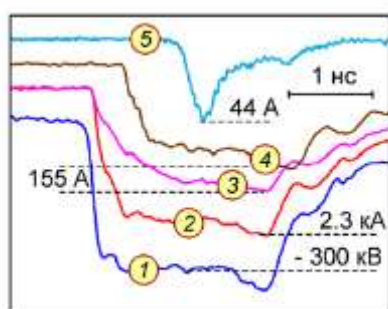


Рис. 56. Импульсы напряжения на катоде (1) и тока пучков: (2) внешний генерирующий пучок; 3, 4 – параксиальный пучок на входе и выходе ЗС, соответственно; (5) фракция параксиального пучка, ускоренная до энергий более 300 кэВ. Все импульсы синхронизированы по времени.

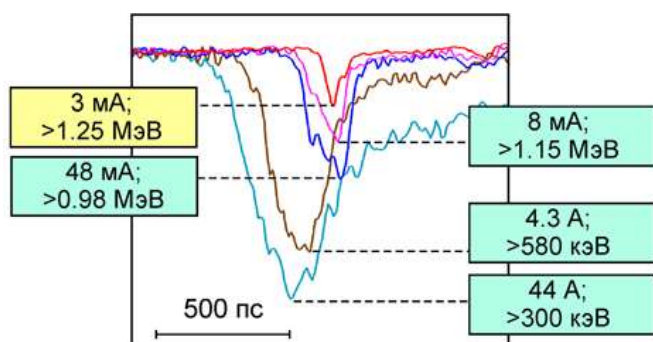


Рис. 57. Сигналы импульсов тока ускоренного пучка за фильтрами (Al) с энергией отсечки до 1,25 МэВ.

датчика (рис. 46,в) из-за чего отрицательный пик электронного тока сопровождается положительным всплеском.

Импульсы тока ускоренных электронов наблюдались вплоть до энергии отсечки Al-фильтра ≈ 1.25 МэВ (толщина Al-фильтра 2,65 мм). На рис.57 видно, что ток фракций больших энергий укорачивается и «встраивается» в огибающую тока, включающего менее энергичные частицы. Для электронов с $\epsilon_k \geq 1,25$ МэВ длительность тока оказалась не более суммы (3–4) периодов ускоряющего СВЧ поля, его амплитуда составляла ≈ 3 мА, а интегральный заряд сгустка был ≈ 0.2 пКл. Задние фронты регистрируемых импульсов тока находятся в узком интервале времени, что характерно, если в некоторый момент накачки резонатора начинается пробой и ускорение прекращается. Такой срыв высокоградиентного ускорения не зависел от вакуума в диапазоне $10^{-2} \div 10^{-4}$ Торр. Отметим, однако, что восстанавливать

поверхность «пробитого» медного резонатора перед следующим включением не было необходимости. Учитывая разницу в максимальных энергиях сгустков после резонатора и в области коллектора при численном моделировании (1.8 и 1.4 МэВ, соответственно), можно предположить, что в эксперименте максимальная энергия электронов на выходе резонатора была на сотни килоэлектронвольт выше, чем измеренная датчиком после ЗС. То есть, полученное значение $\epsilon_k \approx 1.25$ МэВ, близкое к расчетному (1,4 МэВ), является оценкой снизу. Таким образом, экспериментально показано пятикратное увеличение энергии сгустков с 250 кэВ до 1.25 МэВ и достижение рекордного градиента ускорения электронов 250 МВ/м импульсом СИ диапазона 8-мм волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанные малогабаритные источники высоковольтных наносекундных импульсов типа РАДАН продемонстрировали высокую результативность в исследованиях быстропротекающих эмиссионных и электроразрядных процессов, при изучении механизмов формирования потоков УЭ в газе, вакуумных сильноточных электронных пучков и генерации с их помощью мощных СВЧ импульсов. Важную роль играла трансформация наносекундных высоковольтных импульсов в более короткие, имеющие субнаносекундный фронт или полную длительность, с помощью индуктивно-емкостного преобразователя. Обостряющий и срезающий разрядники преобразователя допускают оперативную плавную перестройку параметров и способны работать на частотах повторения в единицы килогерц.

1. Определена область давлений в КДМИ с холодным катодом, где ВЭЭ-механизм формирования сильноточного пучка сменяется на убегание электронов в остаточном газе. Субмикросекундное инициирование ВЭЭ-катода*¹ коротким импульсом напряжения позволило увеличить ток пучка в КДМИ до 4-х раз и получить на фронте темп нарастания $35 \div 55$ кА/нс за счёт зарядовой нейтрализации пучка в ионизованном канале, возникающем (в зависимости от давления остаточного газа) из-за разлета катодной ВЭЭ-плазмы или плазмы, возникающей при ионизации молекул электронным ударом. Когда использовался инициирующий импульс с опережением в единицы наносекунд или низковольтный предимпульс, малоинерционный переход АЭЭ в ВЭЭ позволил в высоком вакууме увеличить ток пучка и темп его нарастания за счёт предварительной «наработки» ВЭЭ-плазмы у катода.

2. Методом динамической рефлектометрии с пикосекундной привязкой к напряжению на катоде определены эмиссионный ток и динамический импеданс КДМИ, в том числе, при вариации зазора до анода. Продemonстрировано влияние крутизны фронта напряжения на момент возникновения ВЭЭ с графита и динамика деградации эмиссии стального катода при тренировке. Показано, что при определённых параметрах предимпульса и крутизне фронта напряжения фронт тока пучка обостряется за счёт кинематического эффекта, а при дрейфе в продольном магнитном поле на фронте формируется всплеск тока. Зарегистрирован связанный с обострённым фронтом пучка электромагнитный сигнал, который можно интерпретировать как затравочный для возбуждения фазово-стабильной генерации мощных черенковских СВЧ приборов. Реализовано снижение диапазона энергий электронов на фронте сильноточного пучка за счёт разделения функций эмиссии и ускорения в двух последовательных промежутках КДМИ.

3. Экспериментально продемонстрирована трансформация режимов генерации наносекундной релятивистской ЛОВ 8-мм диапазона от квазистационарного к хаотическому при изменении превышения рабочего тока пучка над стартовым с удлинением замедляющей структуры, с увеличением сопротивления связи электронного потока с синхронной волной за счёт вариации диаметра трубчатого пучка, а также влияние на эту трансформацию обострения фронта ускоряющего напряжения (и тока). В последнем случае из-за связанного с фронтом тока ЭМ возмущения наблюдалось сокращение времени переходного процесса

¹ Здесь и ниже в экспериментах, отмеченных*, использовались двухканальные установки с прецизионной синхронизацией драйверов РАДАН.

ЛОВ. Отмеченные эффекты соответствуют классическим теоретическим представлениям. Предложен и реализован метод вариации диаметра трубчатого пучка за счёт различия времени диффузии импульсного магнитного поля в области КДМИ через стальную стенку и через медную стенку замедляющей системы ЛОВ. В плазменном мазере инвертированной геометрии в режиме однопроходного усиления шумов замагниченным 2-нс сильноточным пучком ускорителя на базе РАДАН-303 с энергией ≈ 270 кэВ за счёт вариации плотности плазмы в пространстве взаимодействия получена перестройка частоты излучения в диапазоне трёх октав (3-25 ГГц). Полная энергия излучения составила ≈ 0.85 Дж, а его импульсная мощность (450 МВт) была близка к мощности пучка.

4. Техника формирования коротких трубчатых электронных пучков стала основой экспериментов, подтвердивших теоретические представления об эффекте микроволнового СИ протяженных (в масштабе длины волны) электронных потоков в волноведущих системах. В диапазоне длин волн ≈ 8 мм эффект СИ продемонстрирован при пиковой мощности до мегаватта для магнитотормозных (циклотронного и ондуляторного) механизмов электронно-волнового взаимодействия, а также при встречном рассеянии волны накачки электронным пучком*. В случае черенковского механизма, при генерации СИ в виде встречной пучку моды TM_{01} , достигнута пиковая мощность на 2-3 порядка больше и доказана когерентность импульса СИ, мощность которого нарастала квадратично заряду электронного потока. Вариация заряда выполнялась перестройкой длительности пучка. Экспериментально осуществлена нелинейная компрессия импульса микроволнового СИ в процессе его усиления «квазистационарным» электронным потоком синхронизированного ускорителя на базе РАДАН-303.* Импульс микроволнового СИ 8-мм диапазона был сжат до 4-х периодов осцилляций на полувысоте при росте амплитуды в 4 раза – до 200 МВт. В сверхразмерных электродинамических структурах с 1-D и 2-D периодической гофрировкой стенки волновода получены пики СИ с центральной частотой ≈ 140 и ≈ 95 ГГц и рекордными для СИ этих частотных диапазонов мощностями 50-70 и ≈ 150 МВт, соответственно.

5. Изучены условия стабилизации фазы генерации СИ в релятивистских ЛОВ диапазонов длин волн 8÷10 мм. Получены данные о перестройке частоты в течение импульса СИ при вариации энергии и тока электронного пучка и продемонстрировано, что фаза излучения удерживается на протяжении лидирующего пика СИ (≈ 1 нс по основанию). Установлено, что для периода излучения ≈ 30 пс, пикосекундный разброс фаз в сериях включений связан с наличием области фронта катодного напряжения с производной не менее 0.8 МВ/нс, но может достигаться при более длинном фронте и значительном разбросе амплитуд, если инициирование ВЭЭ обеспечивается на предимпульсе напряжения, а за ним следует быстро нарастающий стабильный участок, определяющий кинематическое обострение фронта пучка, где формируется мощный затравочный электромагнитный сигнал. Экспериментально доказано, что фазу генерации СИ можно задать внешним затравочным сигналом, который может быть коротким (второй импульс СИ*) или протяженным (импульс магнетрона) и должен превышать по мощности затравку от фронта пучка. Важно, что такой режим отличается от усиления затравочного сигнала, так как его частота может не совпадать с частотой «автогенерации» СИ ЛОВ.

6. При изучении эффекта генерации быстрых электронов в атмосферном разрядном промежутке с неоднородным распределением электрического поля подтверждена классическая концепция непрерывного ускорения, согласно которой убегание электронов начинается в критическом электрическом поле с границы прикатодных плазменных образований, возникающих на стадии запаздывания импульсного пробоя из-за ударной ионизации газа автоэмиссионными электронами. Плавная регулировка амплитуды импульса напряжения на катоде позволила определить пороги эмиссии УЭ по полю и напряжению для различных конфигураций катодов. Демонстрировалось, что момент эмиссии УЭ на фронте напряжения, их ток/заряд и энергию на аноде можно варьировать, меняя конфигурацию, материал катода и зазор промежутка до анода. В двухзазорном промежутке получена эмиссия УЭ с малым разбросом по времени, а их ускорение - при амплитудном напряжении. Длительность параксиальной фракции УЭ в промежутке с острым коническим катодом оценена в 10 пс, что подтверждало механизм обрыва режима убегания из-за ионизации, снижающей поле у острия ниже критического. В удлинённых промежутках с задержкой наблюдались вторичные потоки УЭ с большим током/зарядом, а при давлениях ≈ 0.3 атм. получен режим убегания всех свободных электронов.

7. Продемонстрировано формирование направленных потоков убегающих электронов в коаксиальных атмосферных диодах с магнитным полем. При эмиссии «элементарного» сгустка УЭ вблизи острия конического стального катода в однородном продольном магнитном поле ≈ 4 Тл на аноде в параксиальной области диаметром 0,7 мм получена рекордная плотность тока $> 0,6$ кА/см². В максимуме импульса тока кинетическая энергия электронов, оцененная времяпролётным методом, составила ≈ 200 кэВ. Показано, что трубчатые замагниченные потоки УЭ состоят из дискретных элементарных сгустков (струй), имеют токи в десятки ампер и заряд в единицы нанокulon. С помощью системы коаксиальных трубчатых катодов в однородном магнитном поле в режиме синхронной эмиссии сформирован дисковый сгусток УЭ, радиальный размер которого кратно превышает аксиальный. Продемонстрировано радиальное сжатие таких потоков УЭ в неоднородном магнитном поле. Степень компрессии, достигавшая 4х, ограничена эффектом магнитного зеркала в нарастающем магнитном поле. В трубчатом пучке, сжатом до диаметра 2.5 мм, плотность тока УЭ достигла 100 А/см².

8. Результаты исследований по направлению короткоимпульсной электроники больших мощностей нашли применения для разработки новых устройств в смежных областях:

- Эмиссия УЭ с дискового выступа на центральном электроде коаксиальной воздушной линии более чем в 6 раз увеличила скорость нарастания разрядного тока при коммутации радиального зазора в поле бегущего импульса напряжения. Эффект использован для создания субнаносекундного срезающего разрядника атмосферного давления.
- Использование пикосекундного замагниченного сгустка УЭ на порядки по сравнению с взрывоэмиссионным пучком снижает энергию, поглощаемую диэлектрическим образцом, в котором возбуждается импульсная катодолуминесценция, но при этом её спектр и кинетика затухания полос совпадают с таковыми при значительно большей дозе облучения сильноточным пучком, когда возможно накопление радиационных дефектов.

- Прецизионная привязка субнаносекундного фронта напряжения на катоде газового диода с развёрткой стрек-камеры позволяет изучать пороговые характеристики накачки при возбуждении лазерной генерации под воздействием сильного электрического поля или коротких электронных сгустков на полупроводниковые кристаллы.
- Гигаваттный импульс 38-ГГц СИ ЛОВ использован для накачки полуволнового резонатора в оригинальном генераторно-ускорительном блоке с коаксиальными пучками, в котором параксиальные сгустки были ускорены с 250 кэВ до 1.25 МэВ при рекордном среднем ускоряющем градиенте ≈ 250 МВ/м.

9. Ряд результатов разработок и исследований, полученных с использованием высоковольтных источников семейства РАДАН, были транслированы в эксперименты с применением SOS-драйверов с полностью твердотельной системой коммутации и обострения импульсов напряжения, или с использованием гибридных систем с такими драйверами, дополненными ГНЛ или ФЛ с водородными обостряющими разрядниками:

- С помощью гибридной системы (SOS-драйвер + водородный обостряющий разрядник) получена стабильная генерация импульсов СИ ЛОВ с пиковой мощностью 300 МВт на частоте повторения до 3.5 кГц в пакетах длительностью 1 с. Аналогичная более мощная гибридная система в таких же пакетах продемонстрировала генерацию пиков СИ диапазона 10 ГГц с мощностью 3 ГВт на частотах повторения до 1 кГц. Стабильная по фазе генерация СИ получена в пакетах, следовавших с частотой до 100 Гц.
- В релятивистской ЛОВ с ускоряющим напряжением на катоде ~ 700 кВ получена генерация импульсов СИ с рекордной для частотного диапазона 29 ГГц пиковой мощностью 2-3 ГВт в условиях задержки СВЧ пробоя замедляющей структуры.
- 2-D решетка из 4-х автономных сфазированных СВЧ генераторов (38-ГГц СИ ЛОВ) при когерентном суммировании линейно поляризованных гауссовых волновых пучков обеспечила 16-кратное увеличение интенсивности излучения в интерференционном максимуме интегральной диаграммы направленности.
- Синхронизация волновых пучков двух 3-х наносекундных мультимегаваттных ЛОВ 8-мм диапазона со сдвинутыми на 1% частотами позволила в течение импульса получить суммирование с полным циклом квадратичных биений мощности во времени и сверхскоростное пространственное сканирование параксиальной области ДН интерференционным лепестком с 4-х кратно увеличенной интенсивностью.
- При питании атмосферного диода импульсом с фронтом/длительностью ≈ 100 пс амплитудой (в бегущей волне) до -900 кВ получен сгусток убегающих электронов, в составе которого имелаась фракция с максимальной энергией не менее 1.4 МэВ.

В заключение, диссертант выражает признательность за многолетнее плодотворное сотрудничество соавторам совместных работ, среди которых хотелось бы выделить сотрудников ИЭФ УрО РАН, ФИЦ ИПФ РАН, ИСЭ СО РАН, ФИАН, ТРИНИТИ, а также коллег из зарубежных университетов и лабораторий.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Wideröe, R.* Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen // Arch. Elektrotech. – 1928. – Vol. 21. – P. 387-406.
2. *Воробьев, Г. А.* Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов: монография / Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц. – М.: Госатомиздат, 1963. – 168 с.
3. *Месяц, Г. А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов / М.: Сов. радио, 1974. – 256 с.
4. *Бугаев, С.П.* Взрывная эмиссия электронов / С.П. Бугаев, Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский // УФН. – 1975. – Т. 115, №1. – С. 101–120.
5. *Цукерман, В.А.* Новые источники рентгеновских лучей / В.А. Цукерман, Л.В. Тарасова, С.И. Лобов // УФН. – 1971. – Т. 103, №2. – С. 319–337.
6. *Брейзман, Б.Н.* К теории фокусировки релятивистского электронного пучка в диоде / Б.Н. Брейзман, Д.Д. Рютов // ДАН СССР. – 1975. – Т. 225, №6. – С. 1308-1311.
7. *Рютов, Д.Д.* О критическом токе релятивистских электронных пучков // ЖТФ. – 1977. – Т.47, №4. – С. 709-715.
8. *Рухадзе, А.А.* Физика сильноточных релятивистских электронных пучков/ А.А. Рухадзе, Л.С. Богданкевич, В.Г. Рухлин, С.Е. Росинский. – М.: Атомиздат, 1980. – 163с.
9. *Ковалев, Н.Ф.* Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов / Н.Ф. Ковалев, М.И. Петелин, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский, Л.Э. Цопп // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – Т. 18, №4. – С. 232-235.
10. *Гапонов-Грехов, А.В.* Релятивистская высокочастотная электроника / А.В. Гапонов-Грехов, М.И. Петелин // Вестник АН СССР. – 1979. – №4. – С. 11-23.
11. *Бугаев, С.П.* Релятивистский многоволновый черенковский генератор / С.П. Бугаев, В.И. Канавец, А.И. Климов, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 9, №22. – С. 1385-1390.
12. *Богданкевич, Л.С.* Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов / Л.С.Богданкевич, А.А. Рухадзе // УФН. – 1971. – Т. 103, №4, – С. 609–640.
13. *Gold, S.H.* Review of high-power microwave source research / S.H. Gold; G.S. Nusinovich // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – Vol. 68, no. 11. – 3945–3974.
14. *Бычков, Ю.И.* Импульсный СО₂-лазер с энергией излучения 5 кДж / Ю.И. Бычков, Е.К. Карлова, Н.В. Карлов, Б.М. Ковальчук, Г.П. Кузьмин, Ю.А. Курбатов, В.И. Манылов, В.М. Орловский, А.М. Прохоров, А.М. Рыбалов // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2, № 5. – С. 212-216.
15. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии: Сб. статей под ред. Г.А. Месяца.- Новосибирск: Наука, 1983. – 169 С.
16. *Ковальчук, Б.М.* Генератор высоковольтных субнаносекундных электронных пучков / Б.М. Ковальчук, Г.А. Месяц, В.Г. Шпак // ПТЭ. – 1976. – № 6. – С. 73-75.
17. *Желтов, К. А.* Пикосекундные сильноточные электронные ускорители / М.: Энергоатомиздат, 1991. – 120 с.
18. *Королёв, Ю. Д.* Физика импульсного пробоя газов: монография / Ю. Д. Королёв, Г. А. Месяц. – М. : Наука, 1991. – 224 с.
19. *Белкин, Н.В.* Стабилизация напряжения зажигания искрового разряда в газах при больших давлениях / Н.В. Белкин, Э.А. Авилов // ЖТФ. – 1971. – Т.41, № 10. – С. 2167-2169.

20. Павловская, Н.Г. Малогабаритная трубка с холодным катодом для получения наносекундных импульсов быстрых электронов / Н.Г. Павловская, Т.В. Кудрявцева, Н.А. Дронь // ПТЭ. – 1973. – №1. – С. 22-24.
21. Дронь, Н. А. Рентгеновские импульсные трубки / Н.А. Дронь // В сб. статей под ред. Г.А. Месяца Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 129-135.
22. Комяк, Н.И. Импульсные рентгеновские аппараты серии МИРА / Н.И. Комяк, Л.Я. Морговский, Е.А. Пеликс // Дефектоскопия. – 1978. – № 3. – С. 108-110.
23. Ельчанинов, А. С. Генератор коротких электронных пучков с встроенным в линию источником высокого напряжения / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, Б. М. Ковальчук // В кн.: Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 119-123.
24. Коровин, С.Д. Трансформатор Тесла в сильноточных импульсно-периодических ускорителях / С.Д. Коровин // Томск: Препринт ИСЭ СО АН СССР № 47, 1988. – 38 с.
25. Ельчанинов, А.С. Исследование стабильности высоковольтного разрядника с потоком рабочего газа между электродами / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц // ПТЭ. – 1979. – №4. – С. 162-164.
26. Ельчанинов, А.С. Малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты и ускорители РАДАН / А.С. Ельчанинов, А.С. Котов, В.Г. Шпак, Я.Я. Юрике, М.И. Яландин // Электронная техника. Сер.4. – 1987. – № 2. – С. 33-37.
27. Шунайлов, С. А. Исследование, разработка и применение малогабаритных сильноточных генераторов нано- и субнаносекундного диапазонов длительности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 01.04.13. Екатеринбург. – 1999. – 140 с.
<https://www.dissercat.com/content/issledovanie-razrabotka-i-primenenie-malogabaritnykh-silnotochnykh-generatorov-nano-i-subnan>
- 28.** Mesyats, G.A. Compact high-current repetitive pulse accelerators / G.A. Mesyats, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov // Proc. 8th IEEE Int. Pulsed Power Conf., San-Diego, CA, USA. – 1991. – P.73-77. 1991.
- 29.** Mesyats, G.A. RADAN-EXPERT portable high-current accelerator / G.A. Mesyats, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov // Proc. 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA. – 1995. – P. 539-543.
- 30.** Shpak, V.G. 1000-pps Subnanosecond High-Voltage Generator / V.G. Shpak, M.I.Yalandin, M.R. Oulmascoulov, S.A. Shunailov // Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, ML,USA. – 1997. – P.1575-1580.
- 31.** Shpak, V.G. Subnanosecond Front, High Voltage Generator based on a Combined Pulsed Forming Line / V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Oulmascoulov, M.I.Yalandin // Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, ML,USA. – 1997. – P. 1581-1585.
- 32.** Mesyats, G.A. Desk-top subnanosecond pulser research, development and applications / G.A. Mesyats, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Proc. SPIE Int. Symp.: Intense Microwave Pulses, Los Angeles, CA, USA. – 1994. – Vol. 2154. – P. 262-268.
- 33.** Shpak, V.G. Investigations of compact high-current accelerators RADAN 303 synchronization with nanosecond accuracy / V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Proc.10th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA. – 1995. – P.544-549.
- 34.** Shpak, V.G. Desk-top repetitive sources of powerful electron beams, x-ray and microwaves for LAB investigations on radiation chemistry, physics and biology / V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov // Radiation Phys. Chem. – 1996. – Vol. 47, no.3. – P.491-495.
- 35.** Shpak, V.G. Preliminary Investigation of the Dynamics of Initiating Processes in Vacuum Breakdown in High Sub-Nanosecond Electric Fields / V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R.

- Ulmaskulov, M.I. Yalandin, I.V. Pegel, V.P. Tarakanov // Proc. 11th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'96), Prague, Czech Republic. – 1996. – P. 913-916.
36. *Ginzburg, N.S.* Generation of Ultrasoft Microwave Pulses based on Cyclotron Superradiance / N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, V.P. Tarakanov // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1999. – Vol. 27, no. 2. – P. 462-469.
 - 37.** *Ginzburg, N.S.* Experimental Observation of Cyclotron Superradiance under Group Synchronism Conditions / N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, I.V. Konoplev, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, S.J. Cook, P. Aitken, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78, no. 12. – P. 2365-2368.
 - 38.** *Яландин, М.И.* Черенковское сверхизлучение субнаносекундного электронного сгустка в секционированной замедляющей системе / М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, В.Г. Шпак, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, П. Айткен // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 24. – С. 14-19.
 - 39.** *Гинзбург, Н.С.* Генерация ультракоротких импульсов на основе эффекта сверхизлучения изолированных электронных сгустков / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, Ю.В. Новожилова, А.С. Сергеев, М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, С. Кук // Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 1998. – Т. 6, № 1. – С. 38-53.
 40. *Tarakanov, V.P.* Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web Conf. – 2017. – Vol. 149. – Art. no. 04024.
 - 41.** *Shpak, V.G.* Amplitude Compression of High-Voltage Pulses in Subnanosecond Formers on Gas Spark Gaps / V.G. Shpak, M.R. Oulmascoulov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Digest of Technical Papers 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Monterey, CA, USA. – 1999. – P. 692-695.
 42. *Grothaus, M.G.* Recovery characteristics of hydrogen spark gap switches / M.G. Grothaus, S.L. Moran, L.W. Hardesty // Proc. IX-th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA. – 1993. – P. 475-478.
 - 43.** *Гришин, Д.М.* 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. Словицкий, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, № 19. – С. 24-31.
 44. *Romanchenko, I.V.* 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 // Review Sci. Instrum. – 2012. – Vol. 83. – Art. no. 074705.
 - 45.** *Ulmaskulov, M.R.* Energy compression of nanosecond high-voltage pulses based on two-stage hybrid scheme / M.R. Ulmaskulov, G.A. Mesyats, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Rev. Sci. Instrum. – 2017. – Vol. 88, no. 4. – Art. no. 045106.
 46. *Афанасьев, К.В.* Импульсно-периодический источник мощного когерентного электромагнитного излучения 8-см диапазона с наносекундной длительностью импульсов / К.В. Афанасьев, Н.М. Быков, В.П. Губанов, А.А. Ельчанинов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, В.В. Ростов, А.С. Степченко // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, № 21. – С. 23-28.
 - 47.** *Гришин, Д.М.* Генерирование гигаваттных микроволновых импульсов диапазона 10 ГГц со стабильной фазой / Д.М. Гришин, С.К. Любутин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, С.П. Тимошенко, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г.

- Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 19. – С. 14-20.
48. Бычков, Ю. И. Инжекционная газовая электроника / Ю.И. Бычков, Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц, В.В. Осипов, В.В. Рыжов, В.Ф. Тарасенко - Новосибирск: Наука, 1982, 239 с.
 - 49.** Yalandin, M.I. 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, no. 1. – P. 34-38.
 - 50.** Яландин, М.И. 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, № 17. – С. 41-49.
 - 51.** Shpak, V.G. Preliminary Investigation of the Dynamics of Initiating Processes in Vacuum Breakdown in High Sub-Nanosecond Electric Fields / V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Oulmasculov, S.N. Ivanov, A.D. R. Phelps, K. Ronald, W. He, A.W. Cross // Digest of Technical Papers of Int. Workshop on High-Power Microwave Generation and Pulse Shortening, Edinburg, UK. – 1997. – P. 115-119.
 52. Баженов, Г.П. О влиянии предимпульса на величину тока, отбираемого с катода вакуумного диода, работающего в режиме взрывной эмиссии / Г. П. Баженов, В. П. Ротштейн. - В кн.: Г. А. Месяц (ред.) Мощные импульсные источники ускоренных электронов. Новосибирск: Наука, 1974. – С. 67-71.
 53. Жерлицын, А.А. Увеличение эффективности вывода энергии в электронный диод за счёт вспомогательного разряда, генерируемого предимпульсом / А.А. Жерлицын, Н.В. Цой // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 126-130.
 54. Brejzman, B.N. Powerful relativistic electron beams in a plasma and a vacuum / B.N. Brejzman, D.D. Ryutov // Nuclear fusion. – 1974. – Vol. 14, № 6. – P. 1589-1596.
 55. Белоусов, В.И. Генерация мощного микроволнового излучения потоком релятивистских электронов в режиме периодического следования импульсов / В.И. Белоусов, Б.В. Бункин, А.В. Гапонов-Грехов, А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, Н.Ф. Ковалев, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, М.Л. Осипов, М.И. Петелин, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, А.В. Сморгонский // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4, № 23. – С. 1443-1448.
 - 56.** Yalandin, M.I. 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. Ulmaskulov, V.V. Rostov, G.A. Mesyats // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2010. – Vol. 38, no. 10. – P. 2559-2564.
 - 57.** Sharypov, K.A. Time-domain reflectometry of high-voltage nonlinear loads with picosecond resolution / K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin // Rev. Sci. Instrum. – 2013. – Vol. 84, no. 5, – Art. no. 055110.
 - 58.** Ulmaskulov, M.R. Picosecond high-voltage pulse measurements / M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, E.M. Ulmaskulov // Rev. Sci. Instrum. – 2021. – Vol. 92, no. 3. – Art. no. 034701.
 59. Беломытцев, С.Я. Эффект экранировки в сильнотоочных диодах / С.Я. Беломытцев, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6, № 18. – С. 1089-1092.
 60. Rostov, V.V. A coherent two-channel source of Cherenkov superradiance pulses / V.V. Rostov, A.A. Elchaninov, I.V. Romanchenko, M.I. Yalandin / V.V. Rostov, A.A. Elchaninov, I.V. Romanchenko, and M.I. Yalandin. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100, no. 22. – Art. no. 224102.

61. Федосов, А.И. К расчету характеристик электронного пучка, формируемого в диоде с магнитной изоляцией / А.И. Федосов, Е.А. Литвинов, С.Я. Беломытцев, С.П. Бугаев // Изв. вузов. Физика. – 1977. – №10. – С. 134-135.
62. Бугаев, С.П. Формирование сильноточных релятивистских электронных пучков для мощных генераторов и усилителей СВЧ / С.П. Бугаев, В.П. Ильин, В.И. Кошелев, Г. А. Месяц, В.Е. Нечаев, Ю.П. Усов, М.И. Фукс, Б.Н. Яблоков. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – С. 5-75.
63. Ельчанинов, А.С. Сильноточные импульсно-периодические ускорители электронов для генераторов СВЧ-излучения / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.В. Ростов. - В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – С. 5-21.
64. Иванов, В.С. Релятивистский карсинотрон миллиметрового диапазона / В.С. Иванов, Н.Ф. Ковалев, С.И. Кременцов, М.Д. Райзер // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 14, № 4. – С. 817-820.
65. 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.
66. Быков, Н.М. Экспериментальное исследование мощного СВЧ-излучения в релятивистских карсинотронах миллиметрового диапазона / Н.М. Быков, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 1985. – Т.11, № 9. – С. 541-545.
- 67.** Yalandin, M.I. High-power repetitive millimeter range back-wave oscillators with nanosecond relativistic electron beam / M.I.Yalandin, G.T. Smirnov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA. – 1993. – P. 388-391.
68. Денис, В. Горячие электроны / В. Денис, Ю. Пожела. – Вильнюс: «Минтис», 1971. – 289с.
69. Yalandin, M.I. Experimental observation of modulation modes of powerful microwave pulses produced by a 5-nanosecond width Ka-band Backward Wave Oscillator / M.I. Yalandin, V.G. Shpak, V.P. Tarakanov // Digest of Technical Papers PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science Conf., Las Vegas, NV, USA. – 2001. – P. 544-547.
70. Куркан, И.К. О возможности снижения магнитного поля в релятивистской ЛОВ / И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 10. – С. 43-47.
71. Ростов, В.В. Мощные релятивистские СВЧ-генераторы на основе лампы обратной волны с модулирующим резонансным рефлектором / В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов, М.И. Яландин. // ЖТФ. – 2008. – Т. 78, № 11. – С. 85-92.
- 72.** Yalandin M.I. Highly Effective, Repetitive Nanosecond-Range Ka-band BWO / M.I. Yalandin, S.N. Rukin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, V.V. Rostov, G.A. Mesyats // Proc. 28th IEEE Int. Power Modulator Symp. and 2008 High Voltage Workshop, Las Vegas, NV, USA. – 2008. – P. 402-404.
73. Rostov, V.V. Two-wave Cherenkov Oscillator with Moderately Oversized Slow Wave Structure / V.V. Rostov, A.V. Gunin, R.V. Tsygankov, I V. Romanchenko, M.I. Yalandin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2018. – Vol. 46, no. 1. – P. 33-42.
74. Rostov, V.V. Two-wave Ka-band nanosecond relativistic Cherenkov oscillator / V.V. Rostov, E.M. Totmeninov, R.V. Tsygankov, I.K. Kurkan, O.B. Kovalchuk, A.A. Elchaninov, A.S. Stepchenko, A.V. Gunin, V.Y. Konev, A.Y. Yushenko, E.V. Emelyanov // IEEE Trans. on Electron Devices – 2018. – Vol. 65, no. 7. – P. 3019 – 3025.

75. *Samsonov, S.V.* First Experimental Results on Gyrotron Backward-Wave Oscillator With Zigzag Quasi-Optical Transmission Line / S.V. Samsonov, G.G. Denisov, A.A. Bogdashov, I.G. Gachev, M.V. Kamenskiy, K.A. Leshcheva, A.V. Savilov, E.M. Novak // *IEEE Electron Device Lett.* – 2024. – Vol. 45, no. 7. – P. 1333-1336.
76. *Самсонов, С.В.* Исследования гиротронной лампы бегущей волны со спирально гофрированными волноводами в ИПФ РАН: результаты и перспективы / С.В. Самсонов, А.А. Богдашов, И.Г. Гачев, Г.Г. Денисов. // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2019. – Т. LXII, № 7-8. – С. 508-519.
77. *Богданкевич, И.Л.* Управление спектром излучения плазменных релятивистских СВЧ-генераторов / И.Л. Богданкевич, О.Т. Лоза, Д.А. Павлов // *Физика плазмы.* – 2009. – Т. 35, № 3. – С. 211-218.
78. *Гинзбург, Н.С.* Циклотронное сверхизлучение движущегося электронного сгустка в условиях группового синхронизма / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев // *Письма в ЖЭТФ.* – 1994. – Т. 60, № 7. – С. 501-506.
79. *Dicke, R.H.* Coherence in spontaneous radiation processes // *Phys. Rev.* – 1954. – Vol. 99, no.1. – P.131–139.
80. *Gover, A.* Superradiant and stimulated-superradiant emission of bunched electron beams / A. Gover, R. Ianculescu, A. Friedman, C. Emma, N. Sudar, P. Musumeci, C. Pellegrini // *Rev. Mod. Phys.* – 2019. – Vol. 91. – Art. no. 035003.
81. *Гинзбург, Н.С.* Нелинейная теория эффекта когерентного сверхизлучения движущегося слоя возбужденных циклотронных осцилляторов / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова // *Письма в ЖТФ.* – 1989. – Т. 15, № 14. – С. 83-87.
82. *Freund, Y.P.* Coherent and incoherent radiation from free-electron lasers with an axial guide field / Y.P. Freund, P. Sprangle, D. Dillenburg, E.H. Da Jornada, B. Liberman, R.S. Schneider // *Phys. Rev. A.* – 1981. – Vol. 24, no. 4. – P. 1965-1979.
- 83.** *Ginzburg, N.S.* Experimental observation of superradiance in millimeter-wave band / N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, N.Yu. Novozhilova, N.Yu. Peskov, I.V. Konoplev, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, P. Aitken, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov. // *Nuclear Instrum. Methods in Phys. Research A.* – 1997. – Vol. 393, nos. 1-3. – P. 352-355.
84. *Гинзбург, Н.С.* О возможности генерации коротковолновых импульсов сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной волны накачки на электронном сгустке / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Р.М. Розенталь, М.И. Яландин // *Письма в ЖТФ.* – 2000. – Т. 26, № 15. – С.103-110.
- 85.** *Ginzburg, N.S.* 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 // *Phys. Rev. E.* – 1999. – Vol. 60, no. 3. – P. 3297-3304.
86. *Ельчанинов, А.А.* Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного потока / А.А. Ельчанинов, С.Д. Коровин, В.В. Ростов, И.В. Пегель, Г.А. Месяц, М.И. Яландин, Н.С. Гинзбург // *Письма в ЖЭТФ.* – 2003. – Т. 77, № 6. – С. 314-318.
87. *Korovin, S.D.* 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 // *Phys. Rev. E.* – 2006. – Vol.74, no.1. – Art. no. 016501.

- 88.** *Коровин, С.Д.* 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, № 3. – С. 68-74.
89. *Rostov V.V.* Modeling of a multi-gigawatt Ka-band superradiant source with a slow traveling wave / V.V. Rostov, M.I. Yalandin // IEEE Electron device Lett. – 2024. – Vol. 45, no. 7. – P. 1329 - 1332.
- 90.** *Yalandin, M.I.* Generation of Powerful Subnanosecond Microwave Pulses in the Range of 38-150 GHz / M.I.Yalandin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Oulmaskoulov, N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, Yu.V. Novozhilova, A.S. Sergeev, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, S.M. Wiggins, K. Ronald // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – Vol. 28, no. 5. – P. 1615-1619.
91. *Ginzburg, N.S.* 3D Quasioptical Theory of Terahertz Superradiance of an Extended Electron Bunch Moving Over a Corrugated Surface / N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, V. Yu. Zaslavsky, I.V. Zheleznov // Phys. Rev. Lett. – 2013. – Vol. 110, no. 18. – Art. no. 184801.
92. *Мейзда, Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. / Ф. Мейзда. – М.: Мир, 1990. – 535 с.
93. *Ельчанинов, А.А.* 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, № 1. – С. 125-130.
- 94.** *Rostov, V.V.* / Phase Control in Parallel Channels of Shock-Excited Microwave Nanosecond Oscillators / V.V. Rostov, A.A. El'chaninov, A.I. Klimov, V.Yu. Konev, I.V. Romanchenko, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ul'maskulov, M.I. Yalandin .. IEEE Trans. Plasma Sci. – 2013. – Vol. 41, no. 10. – P. 2735 – 2741.
- 95.** *Ростов, В.В.* Двухканальный генератор 8-миллиметрового излучения с импульсами субгигаваттного уровня / В.В.Ростов, А.А. Ельчанинов, И.В. Романченко, С.В. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.Н. Рукин, М.И. Яландин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 8-9. – С. 525-543.
- 96.** *Sharypov, K.A.* Coherent summation of Ka-band microwave beams produced by sub-gigawatt superradiance backward wave oscillators / K.A. Sharypov, A.A. El'chaninov, G.A. Mesyats, M.S. Pedos, I.V. Romancheko, V.V. Rostov, S.N. Rukin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 103. – Art. no. 134103.
- 97.** *Яландин, М.И.* Многоканальный генератор 8-миллиметрового диапазона длин волн на релятивистских лампах обратной волны со сдвинутыми частотами / М.И. Яландин, К.А. Шарыпов, М.С. Педос, И.В. Романченко, В.В. Ростов, С.Н. Рукин, М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // Изв. вузов Радиофизика. – 2016. – Т. 59, №. 8-9. – С. 698-708.
- 98.** *Rostov, V.V.* Review of Experiments on Microwave Beam steering in Arrays of High-Power Oscillators by the Control of Voltage Rise Time / V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, A.V. Gunin, M.S. Pedos, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2018. – Vol. 46, no. 10. – P. 3640-3647.
- 99.** *Ginzburg, N.S.* Coherent Summation of Emission From Relativistic Cherenkov Sources as a Way of Production of Extremely High-Intensity Microwave Pulses / N.S. Ginzburg, A.W. Cross, A.A. Golovanov, A.D.R. Phelps, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin, I.V. Zotova // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – Vol. 44, no. 4. – P. 377-385.

100. Dreicer, H. Electron and ion runaway in a fully ionized gas: II // Phys. Rev. – 1960. – Vol. 117, no. 2. – P. 329–342.
101. Гуревич, А. В. К теории эффекта убегающих электронов // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39, № 5. – С. 1296 – 1307.
102. Станкевич, Ю.Л. / Быстрые электроны и рентгеновское излучение в начальной стадии развития импульсного искрового разряда в воздухе // Ю. Л. Станкевич, В. Г. Калинин ДАН СССР. – 1967. – Т. 177, № 1. – С. 72 – 73.
103. Бабич, Л. П. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов / Л.П. Бабич, Т.В. Лойко, В.А. Цукерман // УФН. – 1990. – Т. 160, № 7. – С. 49-82.
104. Тиунов, М.А. SAM-Интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ / М.А. Тиунов, Б.М. Фомель, В.П. Яковлев // Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, Препринт № 89-159. 1989. – 66 с.
105. Гуревич, А.В. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды / А.В. Гуревич, А.Н. Караштин, В.А. Рябов, А.П. Чубенко, А.Л. Щепетов // УФН. – 2009. – Т. 179, № 7. – С. 779–790.
- 106.** Mesyats, G.A. Formation of 1.4 MeV runaway electron flows in air using a solid-state generator with 10 MV/ns voltage rise rate / G.A. Mesyats, M.S. Pedos, S.N. Rukin, V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // Appl. Phys. Lett. – 2018. – Vol. 112, no. 16. – Art. no.163501.
107. Felsenthal, P. Nanosecond-Time Breakdown in Gases / P. Felsenthal, J.M. Proud // Phys. Rev. – 1965. – Vol. 139, no. 6A, – P. A1796-A1804.
108. Лисенков, В.В. Численное исследование параметров пучка убегающих электронов в газовом диоде атмосферного давления с горячим каналом / В.В. Лисенков, В.А. Шкляев // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 43-49.
109. Беломытцев, С.Я. О начальной стадии пробоя газового промежутка в неоднородном поле / С.Я. Беломытцев, И.В. Романченко, В.В. Рыжов, В.А. Шкляев // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 9. – С. 10-16.
110. Тарасенко, В.Ф. Длительность пучка убегающих электронов при субнаносекундном фронте импульса напряжения / В.Ф. Тарасенко, Д.В. Белоплотов, Д.А. Сорокин // ЖТФ. – 2022. – Т. 92, № 5. – С. 694-703.
111. Askar'yan, G. A. /Acceleration of particles by the edge field of a moving plasma point that intensifies an electric field // G.A. Askar'yan JETP Lett. – 1965. – Vol. 1, – P. 97-99.
112. Бабич, Л.П. / Новый тип волны ионизации и механизм поляризационного самоускорения электронов в газовых разрядах при больших перенапряжениях // Л.П. Бабич ДАН СССР. – 1982. – Т. 273, №1. – С. 76-79.
113. Kozyrev, A. Why do Electrons with “Anomalous Energies” appear in HighPressure Gas Discharges? / A. Kozyrev, V. Kozhevnikov, N. Semeniuk // EPJ Web of Conf. – 2018. – Vol. 167. – Art. no. 01005.
- 114.** Mesyats, G.A. Runaway electron flows in magnetized coaxial gas diodes / G.A. Mesyats, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2064. – Art. no. 012006.
115. Соломонов, В.И. Импульсная катодолюминесценция и ее применение: монография / В. И.Соломонов, А. В. Спирина. – Beau Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 181с.
116. Богданкевич, О.В. Полупроводниковые лазеры: монография. О.В. Богданкевич, С.А. Дарзбек, П.Г. Елисеев. – М.: Наука, 1976. – 416с.

117. *Басов, Н.Г.* Генерация света в полупроводниках и диэлектриках, возбуждаемых электрическим полем / Н.Г. Басов, А.Г. Молчанов, А.С. Насибов, А.З. Обидин, А.Н. Печенов, Ю.М. Попов // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19, № 10. – С. 650 – 654.
118. *Nezhevenko, O. A.* On The Limitations of Accelerating Gradient in Linear Colliders Due to the Pulse Heating // Proc. 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, BC, Canada. – 1997. – P. 3013-3014.
119. *Вихарев, А.А.* Эксперименты по импульсному циклическому нагреву медной поверхности на основе мощного 30 ГГц МСЭ / А.А. Вихарев, Н.С. Гинзбург, И.И. Голубев, Ю.Ю. Данилов, Н.И. Зайцев, А.К. Каминский, А.П. Козлов, С.В. Кузиков, Э.А. Перельштейн, Н.Ю. Песков, М.И. Петелин, С.Н. Седых, А.П. Сергеев, А.С. Сергеев // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37, №3. – С. 16-22.
120. *Barengolts, S.A.* Mechanism of vacuum breakdown in radio-frequency accelerating structures / S.A. Barengolts, V.G. Mesyats, V.I. Oreshkin, E.V. Oreshkin, K.V. Khishchenko, I.V. Uimanov, M.M. Tsventoukh // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2018. – Vol. 21, no. 6. – Art. no. 061004.

СПИСОК РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1.* *Yalandin, M.I.* High peak power and high average power subnanosecond modulator operating at repetition frequency of 3.5 kHz / M.I. Yalandin, S.K. Lyubutin, M.R. Oulmasculov, S.N. Rukin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, B.G. Slovikovsky // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. – Vol. 30, no. 5. – P. 1700-1704.
- 2.* *Belomyttsev, S.Ya.* Magnetically Insulated Coaxial Vacuum Diode with Partial Space-Charge-Limited Explosive Emission from Edge-Type Cathode / S.Ya. Belomyttsev, V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, S.A. Shunailov, M.D. Kolomiets, G.A. Mesyats, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 119, no. 2. – Art. no. 023304.
- 3.* *Shunailov, S.A.* Fast Rise-Time High Current Electron Beam: Emission, Acceleration, Drift Motion / S.A. Shunailov, G.A. Mesyats, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, M.R. Ul'maskulov, M.I. Yalandin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2017. – Vol. 45, no. 10. – P. 2755 - 2761.
- 4.* *Коровин, С.Д.* Экспериментальное исследование взрывоэмиссионных графитовых катодов в импульсно-периодическом режиме работы / С.Д. Коровин, Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, А.М. Мурзакаев, В.В. Ростов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 19. – С. 30-39.
- 5.* *Sharypov, K.A.* Current waveform reconstruction from an explosively emissive cathode at a subnanosecond voltage front / K.A. Sharypov, M.R. Ul'masculov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, V.V. Rostov, M.D. Kolomiets // Rev. Sci. Instrum. – 2014. – Vol. 85, no. 12 – Art. no.125104.
- 6.* *Shunailov, S.A.* Activation of the explosive-emission cathode under various conditions of preinitiation / S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, K.A. Sharypov, M.D. Kolomiets, M.R. Ul'masculov, V.G. Shpak, V.V. Rostov, G.A. Mesyats // Vacuum. – 2017. – Vol. 143, no. 9. – P. 473-478.
- 7.* *Mesyats, G.A.* Effect of a submicrosecond-advanced voltage pulse on the formation of a high-current electron beam in a magnetically-insulated coaxial diode / G.A. Mesyats, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // Phys. Plasmas. – 2018. – Vol. 25, no. 10. – Art. no. 103118.
- 8.* *Гинзбург, Н.С.* Короткие сильноточные электронные пучки и мощные микроволновые импульсы в форвакуумном диапазоне давлений / Н. С. Гинзбург, И. В. Зотова, Н. М. Зубарев, В. В. Ростов, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2022. – Т. 65. № 5-6. – С. 331-341.
- 9.* *Mesyats, Gennady* Emission Features and Structure of an Electron Beam versus Gas Pressure and Magnetic Field in a Cold-Cathode Coaxial Diode / Gennady Mesyats, Vladislav Rostov, Konstantin Sharypov, Valery Shpak, Sergey Shunailov, Michael Yalandin, Nikolay Zubarev // Electronics. – 2022. – Vol. 11, no. 2. – Art. no. 248.
- 10.* *Sharypov, K.A.* Reflectometry of Picosecond Emission and Discharge Processes in a Gas-Filled High-Voltage Coaxial Line / K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2021. – Vol. 49, no. 9. – P. 2516-2523.
- 11.* *Шунайлов, С.А.* Рефлектометрия электронного диода с взрывоэмиссионным катодом / С.А. Шунайлов, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин, В.В. Ростов, М.Д. Коломиец // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. №11/3. – С. 307-311.
- 12.* *Шунайлов, С.А.* Эффект полировки металлических катодов при тренировке субнаносекундными импульсами напряжения / С.А. Шунайлов, К.А. Шарыпов, М.Р.

-
- Ульмаскулов, М.И. Яландин, В.В. Ростов, М.Д. Коломиец // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, Вып. 11/3. – С. 312-316.
- 13.* *Yalandin, M.I.* Suppression of shunting current in a magnetically insulated coaxial vacuum diode / M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106, no. 23. – Art. no. 233504.
- 14.* *Шунайлов, С.А.* Кинематические эффекты на фронте электронного пучка при вариации условий инициирования взрывоэмиссионного катода / С.А. Шунайлов, К.А. Шарыпов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин, В.В. Ростов // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, по.11/3. – Р. 317-320.
- 15.* *Lobanov, L.N.* A magnetically insulated coaxial vacuum diode providing a reduced energy spread in the leading edge of a high-current electron beam / L.N. Lobanov, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Phys. Plasmas. – 2023. – Vol. 30, no. 9. – Art. no. 093101.
- 16.* *Shunailov, S.A.* Electromagnetic noise of a nanosecond magnetized high-current electron beam / S.A. Shunailov, G.A. Mesyats, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 126, no. 16. – Art. no. 164504.
- 17.* *Любутин, С.К.* Релятивистская лампа обратной волны диапазона 38 GHz на основе модулятора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока / С.К. Любутин, Г.А. Месяц, С.Н. Рукин, Б.Г. Словицкий, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, № 9. – С. 89-95.
- 18.* *Яландин, М.И.* Экспериментальное исследование переходного процесса в импульсной релятивистской ЛОВ миллиметрового диапазона / М.И. Яландин, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, №10. – С.19-23.
- 19.* *Шарыпов, К.А.* Вариация характеристик излучения релятивистских ЛОВ миллиметрового диапазона во временной и частотной областях / К.А. Шарыпов, М.Д. Коломиец, В.В. Ростов, М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59, №. 9/3. С. – 156-159.
- 20.* *Boltachev, G.Sh.* Control of the Operation Mode of a Relativistic Ka-Band Backward-Wave Oscillator / G.Sh. Boltachev, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2015. – Vol. 43, no. 8. – P. 2613 - 2620.
- 21.* *Rostov, V.V.* Numerical and experimental investigation of 4 mm wavelength microwave oscillator based on high-current compact accelerator / V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, R.V. Tsygankov, A.Y. Yushenko, E.V. Emelyanov, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ul'maskulov, M.I. Yalandin // Phys. Plasmas. 2018. Vol. 25, no. 7. Art. no. 073110.
- 22.* *Ростов, В.В.* Эффективные релятивистские генераторы наносекундных импульсов в миллиметровом диапазоне длин волн / В.В. Ростов, Р.В. Цыганков, А.С. Степченко, О.Б. Ковальчук, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, №.7/8. – С. 522-527.
- 23.* *Buleyko, A.B.* Experimental Plasma Maser as a Broadband Noise Amplifier. 2: Short Pulse / A.B. Buleyko, A.V. Ponomarev, O.T. Loza, D.K. Ulyanov, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // Phys. Plasmas. – 2021. – Vol. 28, no. 2. – Art. no. 023304.
- 24.* *Ginzburg, N.S.* Experimental observation of wiggler superradiance under group synchronism condition / N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, N.Yu. Peskov, I.V. Zotova, A.D.R. Phelps, A.W.

- Cross, W. He, K. Ronald, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov // Nucl.Meth. & Instr. in Phys. Res. A. – 1999. – Vol. 429, no.1–3. – P. 94–100.
- 25.* *Реутова, А.Г.* Экспериментальное наблюдение эффекта сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильнооточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности / А.Г. Реутова, М.Р. Ульмаскулов, А.К. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, В.И. Белоусов, Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, И.В. Зотова, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 82, № 5. – С. 295-299.
- 26.* *Ginzburg, N.S.* Experimental observation of Cherenkov superradiance from an intense electron bunch / N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, Y.V. Novozhilova, I.V. Zotova, R.M. Rosenthal, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, P. Aitken, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov // Optics Communications. – 2000. – Vol.175, No.1-3. – P.139-146.
- 27.* *Wiggins, S.M.* Self-Amplification of Coherent Spontaneous Emission in a Cherenkov Free-Electron Maser / S.M.Wiggins, D.A.Jaroszynski, B.W.J.McNeil, G.R.M.Robb, P.Aitken, A.D.R.Phelps, A.W.Cross, K.Ronald, N.S.Ginzburg, V.G.Shpak, M.I.Yalandin, S.A.Shunailov, M.R.Ulmaskulov // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84, no. 11. – P. 2393-2396.
- 28.* *Шпак, В.Г.* Новый источник ультракоротких микроволновых импульсов, основанный на эффекте сверхизлучения субнаносекундных электронных сгустков / В.Г. Шпак, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, С.М. Виггинс // ДАН. – 1999. – Т. 365, №1. – С. 50-53.
- 29.* *Гинзбург, Н.С.* Теоретическое и экспериментальное исследование генерации импульсов сверхизлучения сильнооточными субнаносекундными электронными сгустками, движущимися в периодической замедляющей системе / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, Ю.В. Новожилова, А.С. Сергеев, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, №.1. – С. 83-91.
- 30.* *Klimov, A.I.* Highly Efficient Generation of Subnanosecond Microwave Pulses in Ka-Band Relativistic BWO / A.I. Klimov, S.D. Korovin, V.V. Rostov, M.R. Ulmaskulov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2002. – Vol. 30, no 3. – P.1120-1125.
- 31.* *Коровин, С.Д.* / 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, № 2. – С. 81-89.
- 32.* *Rostov, V.V.* Superradiant Ka-band Cherenkov oscillator with 2-GW peak power / V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, M.S. Pedos, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // Phys. Plasmas. – 2016. – Vol. 23, no. 9. – Art. no. 093103.
- 33.* *Ростов, В.В.* Достижение экстремально высокой мощности при генерации микроволновых импульсов диапазона 29 ГГц / В.В. Ростов, А.В. Гунин, И.В. Романченко, М.С. Педос, С.Н. Рукин, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 8. С. 55-60.
- 34.* *Ginzburg, N.S.* Generation of Sub-Terahertz Superradiance Pulses Based on Excitation of a Surface Wave by Relativistic Electron Bunches Moving in Oversized Corrugated Waveguides / N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, I.V. Zheleznov, I.V. Zotova, V.Yu. Zaslavsky, G.Sh. Boltachev, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 117, no. 20. – Art. no. 204801.

-
- 35.* *Ginzburg, N.S.* Generation of intense spatially coherent superradiant pulses in strongly oversized 2D periodical surface-wave structure / N.S. Ginzburg, V.Yu. Zaslavsky, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 117, No.18. – Art. no. 183505.
- 36.* *Яландин, М.И.* Генерация субнаносекундных импульсов сверхизлучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона / М.И. Яландин, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, К. Рональд, С.М. Виггинс // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – Т.25, № 23. – С. 1-7.
- 37.* *Яландин, М.И.* Эффект нелинейной компрессии ультракоротких микроволновых импульсов в процессе усиления квазистационарными электронными потоками / М.И. Яландин, А.Г. Реутова, М.Р. Ульмаскулов, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, Е.Р. Кочаровская, А.С. Сергеев // *Письма в ЖЭТФ.* – 2010. – Т. 91, № 11. – С. 620-625.
- 38.* *Гинзбург, Н.С.* Эффекты усиления, компрессии и самоиндуцированной прозрачности при распространении ультракоротких электромагнитных импульсов вдоль квазистационарных электронных потоков / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Е.Р. Кочаровская, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, К.А. Шарыпов, Н.М. Рыскин // *Изв. вузов Радиофизика.* – 2011. – Т. 54, № 8-9. – С. 588-606.
- 39.* *Ginzburg, N.S.* Formation of Solitons Under Cyclotron Resonance Interaction of Superradiance Pulses and CW Signals with Rectilinear Electron Beams / N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, E.R. Kocharovskaya, V.Yu. Zaslavsky, A.G. Sadykova, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // *Изв. вузов. Физика.* – 2014. – Т. 57, №. 12/2. – С. 29-32.
- 40.* *Шарыпов, К.А.* Двухканальная установка для экспериментов по резонансному взаимодействию мощного СВЧ импульса с релятивистским электронным пучком / К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, М.И. Яландин, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, Е.Р. Кочаровская, В.Ю. Заславский, А.А. Богдашев // *Изв. вузов. Физика.* – 2014. – Т. 57, № 12/2. – С. 318-323.
- 41.* *Rostov, V.V.* Phase and frequency structure of superradiance pulses generated by relativistic Ka-band backward-wave oscillator / V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, A.A. Elchaninov, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // *Phys. Plasmas.* – 2016. – Vol. 23, no. 8. – Art. no. 083111.
- 42.* *Ульмаскулов, М.Р.* Синфазные многоканальные ЛОВ диапазона миллиметровых волн / М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, М.С. Педос, И.В. Романченко, В.В. Ростов, С.Н. Рукин, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин. // *Изв. вузов. Физика* – 2014. – Т. 57 № 12/2. – С. 299-303.
- 43.* *Rostov, V.V.* Relativistic Ka-band backward-wave oscillators with stable phase / V.V. Rostov, A.V. Gunin, I.V. Romanchenko, M.S. Pedos, S.N. Rukin, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.R. Ul'masculov, M.I. Yalandin // *Phys. Plasmas.* – 2017. – Vol. 24, no. 6. – Art. no. 063111.
- 44.* *Sharypov, K.A.* A phase-stabilized superradiant Ka-band oscillator driven by nanosecond voltage pulses with amplitude variations and reduced rise rates / K.A. Sharypov, V.V. Rostov, A.G. Sadykova, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. – Vol. 113, no. 22. – Art. no. 223502.
- 45.* *Mesyats, G.A.* Phase-Imposing Initiation of Cherenkov Superradiance Emission by an Ultra-Short Seed Microwave Pulse / G.A. Mesyats, N.S. Ginzburg, A.A. Golovanov, G.G. Denisov, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin, I.V. Zotova // *Phys. Rev. Lett.* – 2017. – Vol. 118, no. 26. – Art. no. 264801.

- 46.* *Ginzburg, N.S.* Phase-Imposed Regime of Relativistic Backward -Wave Oscillators / N.S. Ginzburg, A.A. Golovanov, I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, M.I. Yalandin, I.V. Zotova // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 124, no. 12. – Art. no. 123303.
- 47.* *Шарыпов, К.А.* Развитие концепции мощных микроволновых генераторов со стабилизацией фазы внешним сигналом / К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, И.В. Романченко, В.В. Ростов, М.Р. Ульмаскулов, В.Г. Шпак, М.И. Яландин // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2019. – Т. 62, № 7/8. – С. 499-507.
- 48.* *Тарасенко, В.Ф.* Субнаносекундные пучки электронов, сформированные в газовом диоде / В.Ф. Тарасенко, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, В.М. Орловский, С.Б. Алексеев // *Письма в ЖТФ.* – 2003. – Т. 29, № 21. – С. 1-6.
- 49.* *Тарасенко, В.Ф.* Сверхкороткий электронный пучок и объемный сильноточный разряд в воздухе при атмосферном давлении / В.Ф. Тарасенко, С.Б. Алексеев, В.М. Орловский, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // *ЖТФ.* – 2004. – Т. 74, № 8. – С. 30-34.
- 50.* *Tarasenko, V.F.* Forming of an electron beam and a volume discharge in air at atmospheric pressure / V.F. Tarasenko, V.M. Orlovskii, S.A. Shunailov // *Russian Phys. J.* 2003. – Vol. 46, no. 3. – P. 325-327.
- 51.* *Месяц, Г.А.* О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде / Г.А. Месяц, С.Д. Коровин, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, № 1. – С. 35-44.
- 52.* *Месяц, Г.А.* Пикосекундные пучки убегающих электронов в воздухе / Г.А. Месяц, М.И. Яландин, А.Г. Реутова, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // *Физика плазмы.* – 2012. – Т. 38, № 1. – С. 34-51.
- 53.* *Тарасенко, В.Ф.* Получение мощных электронных пучков в плотных газах / В. Ф. Тарасенко, С. И. Яковленко, В.М. Орловский, А. Н. Ткачев, С.А. Шунайлов // *Письма в ЖЭТФ.* – 2003. Т. 77, № 11. – С. 737-742.
- 54.* *Месяц, Г.А.* Источник электронов и режим ускорения пикосекундного пучка в газовом диоде с неоднородным полем / Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // *Письма в ЖТФ.* – 2008. – Т. 34, № 4. – С. 71-80.
- 55.* *Mesyats, G.A.* Generation of a Picosecond Runaway Electron Beam in a Gas Gap with a Nonuniform Field / G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2008. – Vol. 36, no. 5. – P. 2497-2504.
- 56.* *Яландин, М.И.* Об ограничении длительности пучка убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным полем / М.И. Яландин, Г.А. Месяц, А.Г. Реутова, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов // *Письма в ЖТФ.* – 2011. – Т. 37, № 8. – С. 56-65.
- 57.* *Яландин, М.И.* О моменте инжекции убегающих электронов на фронте ускоряющего импульса в атмосферном диоде с неоднородным полем: от неустойчивости к определённости / М.И. Яландин, А.Г. Реутова, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, Г.А. Месяц // *Письма в ЖТФ.* – 2010. – Т. 36, № 18. – С. 1-9.
- 58.* *Zubarev, N.M.* Experimental and theoretical investigations of the conditions for the generation of runaway electrons in a gas diode with a strongly nonuniform electric field / N.M. Zubarev, M.I. Yalandin, G.A. Mesyats, S.A. Barengolts, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, O.V. Zubareva // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 51, no. 28. – Art. no. 284003.
- 59.* *Kozyrev, A.V.* Local and nonlocal conditions for electron runaway in a gas diode with a conical cathode with a variable opening angle / A.V. Kozyrev, L. N. Lobanov, G. A. Mesyats,

-
- N. S. Semeniuk, K. A. Sharypov, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin, N. M. Zubarev, O. V. Zubareva // *Phys. Plasmas*. – 2024. – Vol. 31, no. 103109.
- 60.* *Mesyats, G.A.* Control and Stabilization of Runaway Electron Emission at the Delay Stage of Pulsed Breakdown in an Overvolted Atmospheric Gap / G.A. Mesyats, A.G. Sadykova, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2013. – Vol. 41, no. 10. – P. 2863 – 2870.
- 61.* *Gurevich, A.V.* Laboratory demonstration of runaway electron breakdown of air / A.V. Gurevich, G.A. Mesyats, K.P. Zybin, A.G. Reutova, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M. I. Yalandin // *Physics Lett. A*. – 2011. – Vol. 375, no. 30-31. – P. 2845–2849.
- 62.* *Gurevich, A.V.* Observation of the Avalanche of Runaway Electrons in Air in a Strong Electric Field / A.V. Gurevich, G.A. Mesyats, K.P. Zybin, M.I. Yalandin, A.G. Reutova, V.G. Shpak, S.A. Shunailov // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 109, no. 8. – Art. no. 085002.
- 63.* *Yalandin, M.I.* Features of the secondary runaway electron flow formed in an elongated, atmospheric pressure air gap / M.I. Yalandin, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, O.V. Zubareva, N.M. Zubarev // *Phys. Plasmas*. – 2020. – Vol. 27, no. 10. – Art. no. 103505.
- 64.* *Садыкова, А.Г.* Пробой воздушного промежутка на убегающих электронах / А.Г. Садыкова, А.В. Гуревич, К.П. Зыбин, М.Д. Коломиец, А.Ф. Садыков, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // *Изв. вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57, №12/2. – С. 269-273.
- 65.* *Reutova, A.G.* Picosecond Processes at the Delay Stage of Pulse Breakdown in Overvoltage Atmospheric Gap / A.G. Reutova, G.A. Mesyats, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin // *Изв. вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55, № 10/3. – С. 320-323.
- 66.* *Садыкова, А.Г.* Пробой воздуха в поле бегущей ТЕМ - волны, ассистированный убегающими электронами / А.Г. Садыкова, Н.М. Зубарев, Г.А. Месяц, Е.А. Осипенко, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62, № 11. – С. 40-45.
- 67.* *Zubarev, N.M.* Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line / N.M. Zubarev, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, G.A. Mesyats, N.S. Semeniuk, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 29, no. 12. – Art. no. 125008.
- 68.* *Yalandin, M.I.* Picosecond Resolution Collector Sensor for Diagnostics of Subrelativistic Electron Bunches / M.I. Yalandin, L.N. Lobanov, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, N.S. Ginzburg, I.V. Zotova // *IEEE Trans. Instrument. Measur.* – 2023. – Vol. 72. – Art. no. 1008808.
- 69.* *Mesyats, G.A.* How short is the runaway electron flow in an air electrode gap? / G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116, no. 6. – Art. no. 063501.
- 70.* *Mesyats, G.A.* An ultra-short dense paraxial bunch of sub-relativistic runaway electrons / G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // *IEEE Electron Device Lett.* – 2022. – Vol. 43, no. 4. – P. 627 – 630.
- 71.* *Lobanov, L.N.* Time-of-flight technique for estimation of the energy of runaway electron bunches formed in magnetized gas diodes / L.N. Lobanov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // *Phys. Plasmas*. – 2024. – Vol. 31, no. 6. – Art. no. 063102.
- 72.* *Lobanov, L.N.* Formation of directed wide-aperture flows of runaway electrons in air-filled magnetized diodes / L.N. Lobanov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I.

- Yalandin, and N.M. Zubarev // Rev. of Sci. Instrum. – 2024. – Vol. 95, no. 9. – Art. no. 093301. <https://doi.org/10.1063/5.0218882>
- 73.* Lobanov, L.N. Disk-shaped bunch of runaway electrons formed in a magnetized air diode / L.N. Lobanov, G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev // IEEE Electron device Lett. – 2023. – Vol. 44, no. 10. – P. 1748-1751.
- 74.* Гашков, М.А. Компрессия потока убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным магнитным полем / М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 113, № 6. – С. 370 – 377.
- 75.* Яландин, М.И. Специфика импульсной катодолуминесценции при возбуждении электронным пучком наносекундной и субнаносекундной длительности / М.И. Яландин, В.И. Соломонов, А.В. Спирина, С.А. Шунайлов, К.А. Шарыпов, А.С. Макарова, А.И. Липчак // ДАН, Физика, технические науки. – 2023. – Т. 508, № 1. – С. 19-26.
- 76.* Афанасьев, В.Н. Параметры электронных пучков, генерируемых ускорителями РАДАН-220 и РАДАН-ЭКСПЕРТ / В.Н. Афанасьев, В.Б. Бычков, В.Д. Ларцев, В.П. Пудов, В.И. Соломонов, С.А. Шунайлов, Генералова В.В., Громов А.А. // ПТЭ. – 2005. – № 5. С. 88-92.
- 77.* Solomonov, V.I. / CLAVI Pulsed Cathodoluminescence Spectroscope / V.I. Solomonov, S.G. Michailov, A.I. Lipchak, V.V. Osipov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, M.R. Ulmaskulov // Laser Physics. – 2006. – Vol. 16, no. 1. – P. 126-129.
- 78.* Месяц, Г.А. Генерация лазерного излучения в монокристаллах селенида цинка под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения / Г.А. Месяц, А.С. Насибов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 3. – С. 213-214.
- 79.* Месяц, Г.А. Люминесценция и генерация лазерного излучения в монокристаллах селенида цинка и сульфида кадмия под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения / Г.А. Месяц, А.С. Насибов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133, № 6. – С. 1162-1168.
- 80.* Бережной, К.В. Излучение пластин селенида цинка при возбуждении импульсным электрическим полем / К.В. Бережной, А.С. Насибов, П.В. Шапкин, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 9. – С. 829-832.
- 81.* Насибов, А.С. Экспериментальная установка для возбуждения полупроводников и диэлектриков пикосекундными импульсами электронного пучка и электрического поля / А.С. Насибов, К.В. Бережной, П.В. Шапкин, А.Г. Реутова, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // ПТЭ. – 2009. – № 1. – С. 75-84.
- 82.* Бережной, К.В. Генератор пикосекундных лазерных импульсов / К.В. Бережной, А.С. Насибов, А.Г. Реутова, П.В. Шапкин, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2011. – № 3. – С. 11-14.
- 83.* Бережной, К.В. Установка для регистрации пикосекундной динамики излучения полупроводниковых мишеней в газовом диоде / К.В. Бережной, М.Б. Бочкарев, А.С. Насибов, А.Г. Реутова, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // ПТЭ. – 2010. – №2. – С. 124-130.
- 84.* Бережной, К.В. Излучение полупроводниковой мишени газового диода, возбуждаемой электронным пучком / К.В. Бережной, М.К. Бочкарев, Г.Л. Даниелян, А.С. Насибов, А.Г. Реутова, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Квантовая Электроника. – 2012. – Т. 42, № 1. – С. 34-38.

-
- 85.* *Насибов, А.С.* Эффективность лазерного излучения полупроводниковой мишени газового диода в пикосекундном диапазоне / А.С. Насибов, К.В. Бережной, М.Б. Бочкарев, А.Г. Садыкова, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – № 1. – С. 3-8.
- 86.* *Яландин, М.И.* Возбуждение субнаносекундным электронным пучком высокоинтенсивного лазерного излучения полупроводниковых мишеней / М.И. Яландин, М.Б. Бочкарев, С.А. Шунайлов, А.Г. Садыкова, А.С. Насибов, В.Г. Баграмов, К.В. Бережной, Б.И. Васильев // ПТЭ. – 2017. – № 5. – С. 100-105.
- 87.* *Насибов, А.С.* Комплекс для диагностики лазерного излучения полупроводниковых мишеней, возбуждаемых электронным пучком, модулированным высокой частотой / А.С. Насибов, К.В. Бережной, И.Д. Тасмагулов, М.И. Яландин, А.Г. Садыкова, М.Р. Ульмаскулов, С.А. Шунайлов. // ПТЭ. – 2019. – №. 6. – С.76-81.
- 88.* *Ginzburg, N.S.* Combined Generator-Accelerator Scheme for High-Gradient Electrons Acceleration by Ka-Band Subnanosecond Superradiant Pulses / N.S. Ginzburg, A.E. Fedotov, S.V. Kuzikov, A.M. Malkin, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, A.A. Vikharev, M.I. Yalandin, I.V. Zotova // Phys. Plasmas. – 2022. – Vol. 29, no. 12. – Art. no. 123101.
- 89.* *Ginzburg, N.S.* Demonstration of High-gradient Electron Acceleration Driven by Subnanosecond Pulses of Ka-band Superradiance / N.S. Ginzburg, A.E. Fedotov, S.V. Kuzikov, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, A.A. Vikharev, M.I. Yalandin, I.V. Zotova // Phys. Rev. Acceler. Beams. – 2023. – Vol. 26, no. 6. – Art. No. 060401.

СПИСОК ПАТЕНТОВ И АВТОРСКИХ СВИДЕТЕЛЬСТВ СОИСКАТЕЛЯ

- 1.** Авторское свидетельство № 1530053 СССР. Н 03 К 3/53, Н 05 Н 7/00. Высоковольтный импульсный источник питания. Заявка № 4390621/24-21. Приоритет от 09.03.1988. / В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин.
- 2.** Свидетельство на промышленный образец № 37499. Ускоритель сильноточный малогабаритный. Заявка № 59812. Приоритет от 29.04.1991 / В.Г. Шпак, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов.
- 3.** Патент РФ № 2079985. МКИ Н 05 Н 5/00. Вакуумный диод с бегущей волной (варианты). Заявка № 95106743. Приоритет от 03.05.1995. Опубликовано 20.05.1997, Бюл. № 14 / В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин.
- 4.** Патент РФ № 2095947. Н 05 G 1/06, Н 01 J 35/00. Малогабаритный импульсный рентгенаппарат. Заявка № 95100124. Приоритет от 05.01.1995. Опубликовано 10.11.1997, Бюл. № 31 / В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин.
- 5.* Патент РФ 2393602. Н 01 S 5/042. Полупроводниковый электроразрядный лазер. Заявка № 2008150670/28. Приоритет от 23.12.2008. Опубликовано 27.06.2010, Бюл. № 18 / К. В. Бережной, А. С. Насибов, А. Г. Реутова, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин.
- 6.* Патент РФ на полезную модель № 119114. G01N 21/66. Импульсный катодолюминесцентный спектрограф. Заявка № 2011127347. Приоритет от 04.07.2011. Опубликовано 10.08.2012, Бюл. № 22 / В.И. Соломонов, В.В. Осипов, А.В. Спирина, В.Г. Шпак, М.И. Яландин, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, Г.Е. Ведерников, Т.Г. Королёва, С.Г. Михайлов, А.И. Липчак.