**Иванов Степан Несторович. Исследования субнаносекундного пробоя сильноперенапряженных газовых промежутков: диссертация ... доктора физико-математических наук: 01.04.13 / Иванов Степан Несторович;[Место защиты: Институт электрофизики УрО РАН].- Екатеринбург, 2014.- 180 с.**

УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ

На правах рукописи УДК 537.521.7: 537.527

ИВАНОВ СТЕПАН НЕСТОРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЯ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ПРОБОЯ СИЛЬНОПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Екатеринбург, 2013

2 Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ 5
2. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ И ИСХОДНЫЕ ПУНКТЫ ДЛЯ ФОРМУЛИРОВКИ ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ 23
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СУБНАНОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ГАЗОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ 28
4. Введение 28
5. Схема синхронизации эксперимента 28
6. Генератор поджигающих импульсов 35
7. Высоковольтная линия задержки 43
8. Электронно-оптическая камера 48
9. Испытательная камера 52
10. Конструкция электродов разрядного промежутка 53
11. Выводы 55

4. ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕЧЕНИЯ СОПРОВОЖДАЮЩЕГО  
СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ  
СИЛЬНОПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ 57

1. Введение 57
2. Исследования свечения сопровождающего субнаносекундный пробой сильноперенапряженных газовых промежутков при давлениях газа от 4 до 15 атм. Экспериментальные результаты. 59
3. Моделирование процессов в газе при давлении от 4 до 15 атм на предпробойной стадии. 67
4. Исследования свечения сопровождающего субнаносекундный

3 пробой сильноперенапряженных газовых промежутков при давлении

газа от 30 до 40 атм. Экспериментальные результаты. 78

1. Моделирование процессов в газе при давлении от 30 до 40 атм на предпробойной стадии. 80
2. Выводы 83

5. ПЕРЕХОД ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМ НЕПРЕРЫВНОГО УСКОРЕНИЯ  
ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ В ГАЗАХ  
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ 84

1. Введение 84
2. Экспериментальная установка 87
3. Результаты экспериментов и их обсуждение 91
4. Выводы: 100

6. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГАЗОВОГО ПРОБОЯ ПОД  
ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ СУБНАНОСЕКУНДНОЙ  
ДЛИТЕЛЬНОСТИ 102

1. Введение 102
2. Экспериментальная установка 104
3. Измерение пороговых напряжений коммутации 108
4. Измерение времени формирования пробоя 125
5. Измерение времени коммутации 128 6.3. Выводы 132

7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СУБНАНОСЕКУНДНЫХ  
ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ 133

1. Введение. 133
2. Субнаносекундные компактные рентгеновские аппараты 135
3. Макет рентгеновского аппарата с гибким зондом-излучателем. 135
4. Коаксиальные кабели, использованные в макете

4

рентгеновского аппарата 138

1. Взрывоэмиссионный диод и режимы его работы 140
2. Ресурс работы гибкого рентгеновского зонда-излучателя 153
3. Выводы 153
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Основные результаты работы 156
5. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА 160

10. ЛИТЕРАТУРА 165

5

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** На момент начала исследований, описанных в настоящей диссертационной работе, в литературе имелось очень ограниченное число публикаций, которые относились бы к физике импульсного пробоя в газе в субнаносекундной области времен. Среди первых зарубежных публикаций можно отметить, например, работы [1-4]. Прежде всего, это связано с тем, что только ограниченное число исследовательских групп имеют в наличии высоковольтную субнаносекундную технику и одновременно имеют опыт исследований в физике импульсного пробоя газов. В этих и других работах главным образом используется метод осциллографической регистрации явлений при пробое.

Между тем, подобные исследования стимулируются как с точки зрения фундаментальных вопросов физики пробоя, так и со стороны практических применений. В частности, область уже освоенных применений наносекундных импульсов чрезвычайно широка [5-9]. Среди наиболее иллюстративных применений наносекундных импульсов можно указать осуществление модуляции добротности твердотельных лазеров, накачку полупроводниковых лазеров, генерацию электронных пучков и рентгеновского излучения, генерацию микроволнового излучения в приборах релятивистской СВЧ электроники и т.д.

В принципе, таковы же применения субнаносекундных импульсов [10]. Однако в этой области оказывается возможным получать и совершенно уникальные эффекты. Например, использование более коротких импульсов для генерации электромагнитного излучения позволяет осуществлять широкополосную радиолокацию. Субнаносекундные пучки электронов и рентгеновского излучения являются уникальным инструментом для исследования физики взаимодействия излучения с веществом, когда время импульсного воздействия становится соизмеримым и даже меньше, чем характерные времена некоторых переходных процессов в газах и твердых телах.

6 Важным фактором является то, что электрическая прочность практически любой среды возрастает при уменьшении длительности импульса. В итоге оказывается возможным создавать малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты и сверхминиатюрные рентгеновские трубки, которые имеют перспективы использования для внутриполостной диагностики.

Но при этом практическое использование субнаносекундных газовых разрядников значительно опережает понимание физики их работы. На сегодняшний день, по сути, нет полной физической картины их работы в субнаносекундном диапазоне, а сами разрядники разрабатываются эмпирически, путем проб и ошибок. А, следовательно, и не понятно, какую предельную скорость коммутации и за счет каких физических процессов можно получить. Т.е. до конца не ясны и возможности практического применения таких разрядников. Таким образом, исследования газового пробоя в субнаносекундном диапазоне времен, с одной стороны, представляют фундаментальный интерес для развития физики пробоя, а с другой стороны, сильно стимулируются потребностями высоковольтной импульсной техники. Фактически эти исследования проводились и проводятся сейчас параллельно с разработками генераторов высоковольтных импульсов с субнаносекундными фронтами.

Таким образом, предлагаемое направление работ в диссертации, безусловно, актуально.

**Цель работы.** Основным направлением работ в диссертации является исследование газового пробоя в условиях, когда реализуются субнаносекундные времена коммутации разрядного промежутка, а также исследование пробоя под воздействием импульсов субнаносекундной длительности. При этом будут использованы как традиционный метод осциллографической регистрации явлений при пробое, так и метод высокоскоростной электронно-оптической хронографии для наблюдения световых явлений в разряде. Особое внимание будет уделено изучению разряда в условиях, близким к условиям работы

7 субнаносекундных газовых разрядников. Подробнее конкретные цели работ будут

сформулированы во введениях к соответствующим главам.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые:

1. Методом высокоскоростной электронно-оптической хронографии было  
исследовано свечение, сопровождающее пробой газа (в диапазоне давлений от 4  
до 40 атм) под действием импульсов напряжения с фронтом 1 нс и короче.  
Оценены скорости волновых ионизационных процессов и изучена динамика  
развития волн ионизации на стадии формирования пробоя. Измерения  
проводились в условиях больших перенапряжений. На разрядный газовый  
промежуток от генератора импульсов подавались импульсы напряжения  
амплитудой 70 – 150 кВ.

1. Показано, что за счет распространения катодонаправленной волны ионизации, вблизи катода на предпробойной стадии на короткое время формируется область усиленного поля с напряженностью в 7-15 раз превышающей среднюю напряженность электрического поля в разрядном промежутке. В результате такого усиления поля, часть плазменных электронов может перейти в режим непрерывного ускорения.
2. Показано, что при субнаносекундном пробое сильноперенапряженных газовых промежутков высокого, вплоть до 40 атмосфер, давления в плазме газового разряда регистрируется пучок “быстрых” или “непрерывно ускоренных” электронов. При этом, “быстрые” электроны регистрируются во всех пробоях газового зазора, при которых между электродами образуется искра. Ранее при таких высоких давлениях газа “быстрые” электроны не регистрировались.
3. Впервые зарегистрирован откол материала с тыльной стороны анода под действием пучка быстрых электронов, формирующихся в газе высокого давления.
4. Проведен цикл экспериментов по измерению пороговых напряжений, при которых начинают регистрироваться существенные токи в газовом промежутке

8 при воздействии субнаносекундных импульсов напряжения. Измерены времена

формирования пробоя и времена и скорости коммутации в субнаносекундном

диапазоне. Массив данных получен для широкого диапазона давлений (от

атмосферного до 40 атм) и степени перенапряжения на разрядном газовом

промежутке и может быть использован в качестве справочного при

конструировании газовых разрядников высокого давления.

6. В субнаносекундном диапазоне получена зависимость потенциала зажигания в  
азоте от произведения давления на величину разрядного газового промежутка  
(кривая Пашена). Обнаружено, что в субнаносекундном диапазоне нарушен закон  
подобия. При одинаковом значении произведения давления на величину  
разрядного газового промежутка потенциал зажигания существенно зависит от  
давления газа в промежутке.

1. Показано, что в субнаносекундном диапазоне при неизменной ширине разрядного газового промежутка с ростом давления значительно падает перенапряжение на промежутке. При этом время формирования пробоя увеличивается лишь примерно на 40-50%, а время коммутации, и, соответственно, скорость коммутации остаются практически неизменными.
2. Показано, что за счет увеличения электрической прочности изоляционных элементов в субнаносекундном диапазоне можно создавать взрывоэмиссионные диоды диаметром до 9 мм, которые могут быть использованы в качестве рентгеновской трубки в компактных субнаносекундных рентгеновских аппаратах с гибким кабельным зондом-излучателем.
3. Показано, что взрывоэмиссионные диоды можно использовать в качестве источников субнаносекундного рентгеновского излучения в широком диапазоне амплитуд питающих диод субнаносекундных импульсов напряжения. При этом величина полученной дозы рентгеновского излучения в диодах с одинаковой конструкцией разрядного промежутка остается постоянной в широком диапазоне

9 условий: от высокого вакуума (остаточный вакуум 10-5 Па) до газа низкого

давления (1 Па).

**Практическая ценность** работы состоит в том, что:

во-первых, получены новые физические данные по механизмам инициирования и динамике развития субнаносекундного пробоя сильноперенапряженных газовых промежутков. Газовые разрядники высокого давления широко применяются в различной электрофизической аппаратуре нано и субнаносекундного диапазонов. Полученные данные могут быть полезными для разработчиков новых типов сверхбыстрых газовых коммутаторов;

во-вторых, экспериментально получен набор данных по пороговым напряжениям коммутации, временам формирования пробоя и временам и скоростям коммутации для широкого диапазона давлений газа и перенапряжений на промежутке. Эти данные оформлены в виде таблиц и графиков и могут быть непосредственно использованы при проектировании газовых коммутаторов в качестве справочного материала.

в-третьих, на базе малогабаритных генераторов импульсов напряжения серии РАДАН (РАДАН-303, РАДАН-ЭКСПЕРТ) разработаны лабораторные образцы субнаносекундного рентгеновского аппарата с миниатюрной трубкой-излучателем, соединенной с источником высоковольтных импульсов напряжения посредством серийно выпускаемого тонкого гибкого 50-Омного низковольтного радиочастотного коаксиального кабеля (РК50) длиной 1 м. В качестве рентгеновского излучателя использовались миниатюрные взрывоэмиссионные диоды, также разработанные в рамках диссертационной работы. Были получены дозы субнаносекундного рентгеновского излучения в несколько десятков миллирентген за импульс. Генераторы РАДАН способны работать с частотой следования импульсов до 100 Гц, что позволяет накапливать дозу рентгеновского излучения до значений, необходимых для практического применения. Взрывоэмиссионный диод может устойчиво работать в качестве

10 субнаносекундного рентгеновского излучателя в диапазоне условий в разрядном

промежутке: от высокого вакуума (остаточный вакуум 10-5 Па) до газа низкого

давления (1 Па). При этом величина полученной дозы рентгеновского излучения

остается постоянной. Основными преимуществами рентгеновского аппарата

субнаносекундного диапазона с миниатюрной трубкой-излучателем, соединенной

с источником высоковольтных импульсов напряжения посредством тонкого

гибкого коаксиального кабеля по сравнению с традиционными наносекундными

рентгеновскими аппаратами являются:

(а) Уменьшенные габариты и вес (от 10 до 32 кг в нашем исполнении). И эти  
параметры еще могут быть уменьшены при работе генератора импульсов при  
меньшем выходном напряжении в частотном режиме;

(б) Возможность подвести миниатюрную рентгеновскую трубку посредством  
гибкого тонкого длинного кабеля к труднодоступным объектам, облучение  
которых традиционными рентгеновскими аппаратами затруднено или  
невозможно.

Компактные субнаносекундные рентгеновские аппараты с гибким отпаянным зондом-излучателем, могут быть востребованными в медицине при близкофокусной рентгенотерапии онкологических заболеваний (тонкий рентгеновский зонд излучатель может быть доставлен к больному органу через небольшой хирургический разрез) и стать альтернативой изотопным зондам, применяемым в настоящее время. Кроме того, аппарат может использоваться в промышленности при неразрушающем контроле изделий с отверстиями малого диаметра и большой длины.

в-четвертых, разработанные для экспериментальных установок схемы субнаносекундной синхронизации, а также входящие в состав установок оригинальные приборы (например, генератор Аркадьева-Маркса с субнаносекундным фронтом и повышенной стабильностью временных параметров) и их отдельные узлы (например, кабельные линии задержки

11 высоковольтных субнаносекундных импульсов) могут быть использованы в

дальнейших экспериментах и в коммерческих версиях приборов.

Так с учетом полученного в диссертации опыта обострения фронта импульсов (от 20 нс до 0.3 нс, выходной узел генератора Аркадьева-Маркса) в лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН был по контракту изготовлен обостритель импульсов для университета в г. Сингапуре.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Субнаносекундная синхронизация высоковольтного генератора импульсов  
РАДАН 303 и электронно-оптической камеры, позволила впервые провести  
регистрацию свечения сопровождающего субнаносекундный пробой  
сильноперенапряженных газовых промежутков высокого давления. Были  
измерены скорости волновых ионизационных процессов и изучена динамика  
развития пробоя.

1. За счет распространения катодонаправленной волны ионизации, вблизи катода на предпробойной стадии на короткое (до 100 пс) время формируется область усиленного поля с напряженностью в 7-15 раз превышающей среднюю напряженность электрического поля в разрядном промежутке. В результате такого усиления поля, часть плазменных электронов может перейти в режим непрерывного ускорения.
2. Зарегистрирован пучок “быстрых” или “непрерывно ускоренных” электронов при субнаносекундном пробое сильноперенапряженных газовых промежутков высокого, вплоть до 40 атмосфер, давления. При этом, “быстрые” электроны регистрируются во всех пробоях газового зазора, при которых между электродами образуется искра. Ранее при таких высоких давлениях газа “быстрые” электроны не регистрировались.
3. Обнаружен откол материала с тыльной стороны анода под действием пучка “быстрых” электронов, формирующихся в газовом разряде высокого давления.

12

5. Получен массив данных по пороговым напряжениям коммутации, при которых  
начинают регистрироваться существенные токи в газовом промежутке при  
воздействии субнаносекундных импульсов напряжения; временам формирования  
пробоя; временам и скоростям коммутации в субнаносекундном диапазоне.  
Данные получены для широкого диапазона давлений (от атмосферного до 40 атм)  
и степени перенапряжения на разрядном газовом промежутке и могут быть  
использованы при проектировании газовых коммутаторов в качестве справочного  
материала.

6. Зависимость потенциала зажигания в азоте от произведения давления на  
величину разрядного газового промежутка (кривая Пашена) полученная для  
субнаносекундного диапазона показывает, что в субнаносекундном диапазоне  
нарушен закон подобия: при одинаковом значении произведения давления на  
величину разрядного газового промежутка потенциал зажигания существенно  
зависит от давления газа в промежутке.

7. Увеличение электрической прочности изоляционных элементов в  
субнаносекундном диапазоне позволило создать взрывоэмиссионные диоды  
диаметром до 9 мм, которые могут быть использованы в качестве рентгеновской  
трубки в компактных субнаносекундных рентгеновских аппаратах с гибким  
кабельным зондом-излучателем.

8. Величина полученной дозы рентгеновского излучения у взрывоэмиссионных  
диодов с одинаковой конструкцией разрядного промежутка остается постоянной в  
широком диапазоне условий: от высокого вакуума (остаточный вакуум 10-5 Па) до  
газа низкого давления (1 Па).

13 **Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции “Генерирование мощного микроволнового излучения и коротких импульсов (Int. Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening)” (Эдинбург, Великобритания, 1997); 13 Международной конференции “Газовые разряды и их применения” (Глазго, Великобритания, 2000); 12, 13, 14, 15 Международным симпозиумам по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2000, 2004, 2006, 2008); 20 Международной конференции “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество” (п. Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2005), 21 Международной конференции “Уравнения состояния вещества” (п. Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2006); 11 Международной конференции “Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул” (Томск, Россия, 2013); 11 Международной конференции “Газоразрядная плазма и ее применения” (Томск, Россия, 2013).

Исследования были поддержаны восемью грантами (в пяти из них диссертант был руководителем):

Гранты РФФИ:

№99-02-16462-а “Cубнаносекундный импульсный электрический пробой сильно перенапряженных вакуумных и газовых промежутков” (исполнитель);

№04-02-08038-офи “Разработка и создание лабораторного образца рентгеновского аппарата на основе миниатюрной рентгеновской трубки” (исполнитель);

№05-02-16477-а “Исследование пробоя сильно перенапряженных газовых промежутков при субнаносекундных временах нарастания тока” (руководитель);

№08-02-00982-а “Исследование динамики развития субнаносекундного импульсного электрического пробоя сильно перенапряженных газовых промежутков высокого давления” (исполнитель);

№09-08-00374-а “Исследование коммутационных характеристик нано и субнаносекундных газовых разрядников высокого давления” (руководитель);

14 №12-08-00282-а “Исследование перехода электронов в режим непрерывного ускорения при субнаносекундном импульсном электрическом пробое в газах высокого давления” (руководитель).

Гранты Уральского отделения РАН:

Интеграционный проект (2006-2008 гг.) фундаментальных исследований, выполняемых в УрО РАН совместно с учеными СО и ДВО РАН “Исследование импульсного электрического пробоя газовых промежутков высокого давления при больших перенапряжениях” (руководитель, задействовано 2 лаборатории: одна из ИЭФ УрО РАН и одна из ИСЭ СО РАН).

Интеграционный проект (2009-2011 гг.) фундаментальных исследований, выполняемых в УрО РАН совместно с учеными СО и ДВО РАН “Исследование механизмов инициирования импульсных и стационарных газовых разрядов” (руководитель, задействовано 4 лаборатории: 3 из ИЭФ УрО РАН и одна из ИСЭ СО РАН).

**Личный вклад автора.** Постановка задач исследований, проведение  
экспериментов и анализ полученных результатов; разработка основных  
конструктивных решений, использованных в экспериментальных установках и  
лабораторных макетах малогабаритных субнаносекундных рентгеновских  
аппаратов. В постановке задач по созданию экспериментальной установки для  
электронно-оптической регистрации свечения, сопровождающего

субнаносекундный пробой сильноперенапряженных газовых промежутков, принимали активное участие члены-корреспонденты РАН В.Г. Шпак и М.И. Яландин. Для экспериментов сотрудниками лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН были предоставлены генераторы РАДАН-303, РАДАН-ЭКСПЕРТ и субнаносекундный формирователь импульсов. Остальное нестандартное оборудование (генераторы Аркадьева-Маркса с субнаносекундным фронтом и повышенной стабильностью временных параметров, высоковольтные

15 линии задержки, экспериментальные камеры и т.д.) разрабатывалось и

изготавливалось автором диссертационной работы. В интерпретации

экспериментальных результатов по электронно-оптической регистрации свечения,

сопровождающего пробой сильноперенапряженных газовых промежутков,

принимал активное участие к.ф.-м.н. В.В. Лисенков. Соавторы, принимавшие

участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных

публикаций автора по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную

новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

**Публикации.** Основные результаты работы изложены в 31 публикации, в том числе в 16 статьях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, раздела “Используемая терминология и исходные пункты для формулировки задач диссертационной работы”, пяти глав и заключения. Она изложена на 180 страницах, включая 86 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 129 наименований.

**Краткое содержание диссертации.**

**Во ВВЕДЕНИИ** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, кратко раскрывается содержание рассматриваемых в ней задач, формулируются цели работы, ее научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

**В разделе** ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ И ИСХОДНЫЕ ПУНКТЫ ДЛЯ ФОРМУЛИРОВКИ ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ приведена общепринятая на сегодняшний день терминология описания импульсного газового пробоя. Кроме того, в разделе дан небольшой обзор наиболее важных из ранее полученных результатов по физике нано и субнаносекундного пробоя,

16 которые были использованы в качестве исходных пунктов при формулировке

задач настоящей диссертационной работы.

**В ПЕРВОЙ** главе дается описание специально разработанной и изготовленной для выполнения диссертационной работы экспериментальной установки, предназначенной для исследования динамики развития субнаносекундного электрического пробоя газовых промежутков методом высокоскоростной электронно-оптической хронографии. Установка позволяет проводить синхронную осциллографическую регистрацию нано и субнаносекундных импульсов напряжения (длительность импульса 0.2 - 4 нс) и тока в исследуемом газовом промежутке с электронно-оптической хронографией свечения, сопровождающего предпробойные и пробойные процессы в газе. Высокоскоростная электронно-оптическая хронография в настоящее время является единственным методом, позволяющим определить область зарождения пробоя внутри разрядного промежутка и исследовать динамику развития инициирующих пробой процессов.

Из-за большого объема изложенного материала и сложности входящих в установку приборов и узлов, описание установки было выделено в отдельную главу. Другие экспериментальные установки, разработанные для выполнения диссертации, описаны в соответствующих тематических главах в виде подразделов.

**Во ВТОРОЙ** главе впервые методом высокоскоростной электронно-оптической хронографии было исследовано свечение, сопровождающее пробой газа (в диапазоне давлений от 4 до 40 атм) под действием импульсов напряжения с фронтом 1 нс и короче. При этом на разрядный газовый промежуток от генератора импульсов подавались импульсы напряжения амплитудой 70 – 150 кВ. Т.е. эксперименты проводились в условиях высоких перенапряжений.

На предпробойной стадии в эксперименте наблюдались волновые процессы, развивающиеся в газовом промежутке. Были измерены скорости ионизационных

17 волн. Было показано, что длительность предпробойной стадии и динамика

волновых ионизационных процессов на предпробойной стадии коренным образом

зависят от начального распределения инициирующих электронов в разрядном

промежутке. Было показано, что за счет распространения катодонаправленной

волны ионизации, вблизи катода на предпробойной стадии на короткое время

формируется область усиленного поля с напряженностью в 7-15 раз

превышающей среднюю напряженность электрического поля в промежутке. В

результате такого усиления поля часть плазменных электронов может перейти в

режим непрерывного ускорения. Было проведено численное моделирование

развития процессов в газе в стадии запаздывания пробоя. При этом решалась

система уравнений баланса для концентраций электронов, ионов и возбужденных

молекул совместно с уравнением Пуассона. Кинетические коэффициенты,

зависящие от электрического поля, в том числе вероятность ухода электронов в

режим убегания, получались в результате моделирования движения электронов

методом Монте-Карло. Результаты моделирования находятся в качественном

согласии с результатами эксперимента.

Главными отличительными особенностями измерений, описанных в настоящей главе, от ранее выполненных методом электронно-оптической регистрации измерений в микро и наносекундном диапазонах [11-26] являются:

1. время запаздывания пробоя составляет 1 нс и менее, т.е. соизмеримо с  
длительностью фронта напряжения, прикладываемого к промежутку. В отличие  
от классических измерений, здесь напряжение на промежутке в стадии  
запаздывания не является постоянным. Фактически предпробойные явления  
развиваются одновременно с нарастанием напряжения на промежутке, т.е. пробой  
происходит непосредственно на фронте импульса напряжения. В этом состоит  
одна из трудностей, как в методике измерений, так и в интерпретации  
результатов;

2. более высокие давления газа (от 4 до 40 атм);

18 3. значительно более высокие перенапряжения (в 2-5 раз по сравнению со статическим пробоем).

**В ТРЕТЬЕЙ** главе были проведены эксперименты по регистрации “быстрых” электронов в азоте высокого, вплоть до 40 атм давления. Для этих целей была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка. Эксперименты проводились в условиях однородного поля в газовом промежутке.

Было показано, что при субнаносекундном пробое сильноперенапряженных газовых промежутков высокого, вплоть до 40 атмосфер, давления в плазме газового разряда регистрируется пучок “быстрых” электронов. При этом, “быстрые” электроны регистрируются во всех пробоях газового зазора, при которых между электродами образуется искра.

Ранее при таких высоких давлениях газа “быстрые” электроны не регистрировались. Поскольку все современные газовые разрядники работают при давлениях газа в десятки атм, а азот, в настоящее время, наиболее широко применяется в качестве рабочего газа в нано- и субнаносекундных разрядниках высокого давления, исследования режима непрерывного ускорения электронов при таких высоких давлениях, представляются крайне интересными. Создание оптимальных условий для перехода электронов в режим непрерывного ускорения может существенно увеличивать скорость формирования пробоя, что позволит создавать новые типы сверхбыстрых газовых коммутаторов высокого давления.

Впервые был зарегистрирован откол материала с тыльной стороны анода (алюминиевая фольга толщиной 9 мкм) под действием пучка быстрых электронов формирующихся в газе высокого давления. Пучок высокоэнергетичных электронов при прохождении через фольгу вызывает локальную деформацию материала и вырывает с обратной стороны фольги кусочки металла. При этом фольга остается целой. Отверстия в ней не образовываются. Процесс очень похож на откол материала с обратной стороны мишени, попавшей в нее пулей. Тыльный

19 откол материала анода под действием пучка непрерывно ускоренных электронов

в газах до настоящего времени не наблюдался.

**В ЧЕТВЕРТОЙ** главе проведены экспериментальные исследования поведения газового промежутка при приложении к нему субнаносекундных импульсов напряжения. В настоящее время в литературе практически нет работ по этой проблеме. Любая информация, даже просто определение пороговых напряжений пробоя при воздействии субнаносекундных импульсов амплитудой свыше 100 кВ, представляет существенный интерес. Поэтому здесь основная идея работы сводилась к накоплению новой экспериментальной информации по пробою под действием субнаносекундных импульсов.

В этих экспериментах на разрядный газовый промежуток подавался субнаносекундный импульс высокого напряжения с фиксированными в течение всего эксперимента параметрами. В эксперименте менялись величина зазора катод-анод (с шагом в 0.1 – 0.2 мм) и давление газа. Эксперимент начинался при минимальном зазоре в 0.25 мм и увеличивался при фиксированном давлении газа с указанным выше шагом до тех пор, пока газовый промежуток не переставал пробиваться. Потом этот эксперимент повторялся при другом давлении газа. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, 5 атм, 10 атм, 20 атм, 30 атм и 40 атм. В результате, был получен набор данных по пороговым напряжениям, при которых начинают регистрироваться существенные токи в газовом промежутке при воздействии субнаносекундных импульсов; временам формирования пробоя и временам и скоростям коммутации в зависимости от перенапряжения промежутка. Эти данные легко обрабатывать и обобщать, поскольку использовались один и тот же генератор импульсов, электроды и газовый зазор одной конфигурации, и одна схема регистрации. Следует отметить, что ранее такие эксперименты не проводились даже в хорошо изученном наносекундном диапазоне. Данные накапливались в разных экспериментах, в которых использовались генераторы разных типов, разная измерительная аппаратура, кабели, делители напряжения, а затем уже результаты обобщались. В

20 итоге, в данных, полученных различными экспериментальными группами, часто

наблюдались различия и не стыковки.

Была получена зависимость порогового напряжения коммутации в азоте от произведения давления p на величину разрядного газового промежутка d (кривая Пашена [27]) для субнаносекундного диапазона. В литературе [27] пороговые напряжения коммутации еще часто называют пробивающими напряжениями или потенциалом зажигания. При этом потенциал зажигания определяется только произведением pd. В этом проявляется закон подобия. Было показано, что в субнаносекундном диапазоне закон подобия нарушен. При одинаковом значении произведения давления на величину разрядного газового промежутка потенциал зажигания существенно зависит от давления газа в промежутке.

**В ПЯТОЙ** главе было показано одно из практических применений субнаносекундных импульсов напряжения. Известно, что электрическая прочность практически любой среды возрастает при уменьшении длительности импульса. В итоге в субнаносекундном диапазоне оказывается возможным создавать уникальные малогабаритные импульсные электрофизические устройства, разработка которых уже в наносекундном диапазоне оказывается невозможной. Одним из таких приборов является импульсный рентгеновский аппарат с миниатюрной трубкой-излучателем, соединенной с источником высоковольтных импульсов напряжения посредством тонкого длинного гибкого низковольтного коаксиального кабеля.

На базе малогабаритных генераторов импульсов напряжения серии РАДАН (РАДАН-303, РАДАН-ЭКСПЕРТ) были разработаны лабораторные образцы такого аппарата. Миниатюрная трубка-излучатель, соединялась с источником высоковольтных импульсов напряжения посредством серийно выпускаемого тонкого гибкого 50-Омного низковольтного радиочастотного коаксиального кабеля (РК50) длиной 1 м. В качестве рентгеновского излучателя использовались миниатюрные взрывоэмиссионные диоды. Были получены дозы субнаносекундного рентгеновского излучения в несколько десятков миллирентген

21 за импульс. Генераторы РАДАН способны работать с частотой следования

импульсов до 100 Гц, что позволяет накапливать дозу рентгеновского излучения

до значений, необходимых для практического применения. Основными

преимуществами рентгеновского аппарата субнаносекундного диапазона с

миниатюрной рентгеновской трубкой, соединенной с источником

высоковольтных импульсов напряжения посредством тонкого гибкого

коаксиального кабеля по сравнению с традиционными наносекундными

рентгеновскими аппаратами являются:

(а) Уменьшенные габариты и вес (от 10 до 32 кг в нашем исполнении). И эти  
параметры еще могут быть уменьшены при работе генератора импульсов при  
меньшем выходном напряжении в частотном режиме;

(б) Возможность подвести миниатюрную рентгеновскую трубку посредством  
гибкого тонкого длинного кабеля к труднодоступным объектам, облучение  
которых традиционными рентгеновскими аппаратами затруднено или  
невозможно.

Компактные субнаносекундные рентгеновские аппараты с гибким отпаянным зондом-излучателем, могут быть востребованными в медицине при близкофокусной рентгенотерапии онкологических заболеваний (тонкий рентгеновский зонд излучатель может быть доставлен к больному органу через небольшой хирургический разрез) и стать альтернативой изотопным зондам, применяемым в настоящее время. Кроме того, аппарат может использоваться в промышленности при неразрушающем контроле изделий с отверстиями малого диаметра и большой длины.

Было показано, что взрывоэмиссионные диоды можно использовать в качестве источников субнаносекундного рентгеновского излучения в широком диапазоне параметров питающих диод импульсов высокого напряжения. При этом взрывоэмиссионный диод может устойчиво работать в качестве субнаносекундного рентгеновского излучателя в широком диапазоне условий в

22 разрядном промежутке: от высокого вакуума (остаточный вакуум 10-5 Па) до газа

низкого давления (1 Па). При этом величина полученной дозы рентгеновского

излучения остается постоянной. На сегодняшний день нет серийно выпускаемых

рентгеновских трубок с холодным катодом, которые работают при таких высоких

давлениях газа в разрядном промежутке.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Впервые методом высокоскоростной электронно-оптической хронографии  
было исследовано свечение, сопровождающее пробой газа (в диапазоне давлений  
от 4 до 40 атм) под действием импульсов с фронтом около 1 нс и короче. Оценены  
скорости волновых ионизационных процессов и изучена динамика развития волн  
ионизации на стадии формирования пробоя. Измерения проводились в условиях  
больших перенапряжений. На разрядный газовый промежуток от генератора  
импульсов подавались импульсы напряжения амплитудой 70 – 150 кВ.

1. Показано, что за счет распространения катодонаправленной волны ионизации, вблизи катода на предпробойной стадии на короткое время формируется область усиленного поля с напряженностью в 7-15 раз превышающей среднюю напряженность электрического поля в разрядном промежутке. В результате такого усиления поля, часть плазменных электронов может перейти в режим непрерывного ускорения.
2. Показано, что при субнаносекундном пробое сильноперенапряженных газовых промежутков высокого, вплоть до 40 атмосфер, давления в плазме газового разряда регистрируется пучок “быстрых” или “непрерывно ускоренных” электронов. При этом, “быстрые” электроны регистрируются во всех пробоях газового зазора, при которых между электродами образуется искра. Ранее при таких высоких давлениях газа “быстрые” электроны не регистрировались. В экспериментах применялись электроды, обеспечивающие формирование в разрядном промежутке электрического поля с однородной конфигурацией. Переход электронов в режим непрерывного ускорения происходил за счет перераспределения поля и его локальных усилений при распространении в разрядном промежутке волн ионизации.

157

1. Впервые зарегистрирован откол материала с тыльной стороны анода под действием пучка быстрых электронов, формирующихся в газе высокого давления.
2. Проведен цикл экспериментов по измерению пороговых напряжений, при которых начинают регистрироваться существенные токи в газовом промежутке при воздействии субнаносекундных импульсов напряжения. Измерены времена формирования пробоя и времена и скорости коммутации в субнаносекундном диапазоне. Массив данных получен для широкого диапазона давлений (от атмосферного до 40 атм) и степени перенапряжения на разрядном газовом промежутке и может быть использован при конструировании газовых разрядников высокого давления в качестве справочного материала.

6. В субнаносекундном диапазоне получена зависимость потенциала зажигания в  
азоте от произведения давления на величину разрядного газового промежутка  
(кривая Пашена). Обнаружено, что в субнаносекундном диапазоне нарушен закон  
подобия. При одинаковом значении произведения давления на величину  
разрядного газового промежутка потенциал зажигания существенно зависит от  
давления газа в промежутке.

7. Показано, что в субнаносекундном диапазоне при неизменной ширине  
разрядного газового промежутка с ростом давления значительно падает  
перенапряжение на промежутке. При этом время формирования пробоя  
увеличивается лишь примерно на 40-50%, а время коммутации, и, соответственно,  
скорость коммутации остаются практически неизменными.

8. На базе малогабаритных генераторов импульсов напряжения серии РАДАН  
разработаны лабораторные образцы субнаносекундного рентгеновского аппарата  
с миниатюрной трубкой-излучателем, соединенной с источником  
высоковольтных импульсов напряжения посредством серийно выпускаемого  
тонкого гибкого 50-Омного низковольтного радиочастотного коаксиального  
кабеля (РК50) длиной 1 м. В качестве рентгеновского излучателя использовались  
миниатюрные взрывоэмиссионные диоды. Были получены дозы  
субнаносекундного рентгеновского излучения в несколько десятков миллирентген  
за импульс. Генераторы РАДАН способны работать с частотой следования

158

импульсов до 100 Гц, что позволяет накапливать дозу рентгеновского излучения до значений, необходимых для практического применения. Основными преимуществами рентгеновского аппарата субнаносекундного диапазона с миниатюрной трубкой-излучателем, соединенной с источником высоковольтных импульсов напряжения посредством тонкого гибкого коаксиального кабеля по сравнению с традиционными наносекундными рентгеновскими аппаратами являются:

(а) Уменьшенные габариты и вес (от 10 до 32 кг в нашем исполнении). И эти  
параметры еще могут быть уменьшены при работе генератора импульсов при  
меньшем выходном напряжении в частотном режиме;

(б) Возможность подвести миниатюрную рентгеновскую трубку посредством  
гибкого тонкого длинного кабеля к труднодоступным объектам, облучение  
которых традиционными рентгеновскими аппаратами затруднено или  
невозможно.

Компактные субнаносекундные рентгеновские аппараты с гибким отпаянным зондом-излучателем, могут быть востребованными в медицине при близкофокусной рентгенотерапии онкологических заболеваний (тонкий рентгеновский зонд излучатель может быть доставлен к больному органу через небольшой хирургический разрез) и стать альтернативой изотопным зондам, применяемым в настоящее время. Кроме того, аппарат может использоваться в промышленности при неразрушающем контроле изделий с отверстиями малого диаметра и большой длины.

9. Показано, что взрывоэмиссионные диоды можно использовать в качестве источников субнаносекундного рентгеновского излучения в широком интервале параметров питающих диод импульсов высокого напряжения. При этом величина полученной дозы рентгеновского излучения в диодах с одинаковой конструкцией разрядного промежутка остается постоянной в широком диапазоне условий: от высокого вакуума (остаточный вакуум 10-5 Па) до газа низкого давления (1 Па).

159

В заключение, выражаю свою глубокую признательность члену-корреспонденту РАН Валерию Григорьевичу Шпаку, заведующему лабораторией электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН, за внимание и помощь при выполнении данной работы; члену-корреспонденту РАН Михаилу Ивановичу Яландину и к.т.н. Сергею Афанасьевичу Шунайлову, за многочисленные советы и предоставленные для работы импульсные генераторы РАДАН-303 и РАДАН-ЭКСПЕРТ; Константину Анатольевичу Шарыпову за помощь в проведении измерений; д.ф.-м.н. Евгению Александровичу Литвинову, к.ф.-м.н. Василию Викторовичу Лисенкову и д.ф.-м.н. Юрию Дмитриевичу Королеву за полезное обсуждение результатов работы и помощь в их теоретической интерпретации; д.т.н. Вадиму Львовичу Кузнецову, д.т.н. Александру Леонидовичу Филатову и к.ф.-м.н. Виктору Васильевичу Уварину за помощь в изготовлении отпаянных взрывоэмиссионных рентгеновских трубок; Ольге Романовне Тимошенковой и к.ф.-м.н. Айдару Марксовичу Мурзакаеву за фотографии сделанные ими в растровом электронном микроскопе; к.ф.-м.н. Вячеславу Владимировичу Платонову за фотографии, выполненные на микроскопе OLYMPUS; Михаилу Евгеньевичу Балезину за анализ образцов поглощенной дозы фотонного и электронного излучений; д.ф.-м.н. Владимиру Васильевичу Осипову за ряд полезных замечаний; всем сотрудникам лаборатории электронных ускорителей за помощь и поддержку диссертационной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №99-02-16462-а, №04-02-08038-офи, №05-02-16477-а, №08-02-00982-а, №09-08-00374-а, №12-08-00282-а) и Уральского отделения РАН (2 гранта).