

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ШИШПАНОВ Александр Игоревич

**Экспериментальное исследование явлений,
происходящих при пробое длинной разрядной трубки
в азоте при низком давлении**

01.04.08 - физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ионих Юрий Зиновьевич

Официальные оппоненты:

Александров Николай Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский физико-технический институт, профессор;

Кучинский Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится «__» сентября 2014 года в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.232.45 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Ульяновская ул. д. 1, Малый конференц-зал физического факультета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Горького и на сайте: www.spbu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.232.45, доктор физ.-мат. наук _____ В. С. Сухомлинов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Глеющий разряд при низких давлениях широко применяется в разнообразных технических и технологических приложениях, а также в лабораторной практике при изучении свойств неравновесной плазмы, процессов столкновений в плазме и др. Очень часто при этом используется импульсно-периодический режим работы разряда. В каждом из импульсов разряд проходит через стадию пробоя газа, поэтому выполнение условий для пробоя является важнейшим фактором существования такой формы разряда. Процессы, происходящие при пробое, весьма многообразны, и в целом картина существенно зависит от большого числа факторов, таких, как род газа, его давление, геометрия разрядного промежутка, материал и размеры электродов, амплитуда и форма импульса напряжения. Хорошо известны и широко представлены в научной и учебной литературе два типа пробоя: лавинный (таунсендовский) и стримерный. Значительно менее известен и изучен третий вид – пробой, инициируемый волной ионизации. Этот механизм реализуется в т.н. длинных разрядных трубках – таких, в которых расстояние между электродами намного больше их размеров и диаметра трубки. Глеющий разряд именно в этих трубках используется в газоразрядных источниках света (люминесцентных лампах) и электроразрядных лазерах, а также в лабораториях при исследованиях плазмы.

Систематическое изучение пробойных явлений в длинных трубках началось лишь в конце 80-х годов, главным образом в связи с внедрением в производство компактных энергосберегающих газоразрядных ламп. Благодаря применению современной экспериментальной техники, картина пробоя в длинных трубках в основных чертах выяснена. Тем не менее, ряд существенных закономерностей выявлен далеко не полностью или не изучен совсем. Так, очевидно, что после окончания разрядного импульса в межэлектродном промежутке остаются заряженные и возбужденные частицы, которые могут оказывать влияние на следующий пробой («эффект памяти» разрядного промежутка). Этот факт подтвержден и изучен, но только для коротких (~1 см) разрядных промежутков, в условиях, когда пробой имеет таунсендовский характер. На разряд в длинных трубках, где картина пробоя принципиально иная, эти результаты не могут быть автоматически перенесены. До настоящего времени не исследовано влияние на характеристики пробоя крутизны фронта напряжения, подаваемого на электроды. Нет экспериментальных работ, в которых изучалась бы связь волны ионизации с характеристиками пробоя и разряда в послепробойной стадии. Отсутствие информации об этих закономерностях делает картину развития разряда не полной и препятствует созданию адекватной модели разряда. Данная работа посвящена получению такой информации, что определяет ее актуальность.

Цель диссертационной работы

Цель диссертационного исследования состояла в (1) обнаружении и установлении физической природы эффекта памяти при пробое длинной разрядной трубки, (2) нахождении взаимосвязи между эффектом памяти и предпробойной волной ионизации и (3) выяснении роли волны ионизации в формировании т.н. «темной фазы» (промежутка отсутствия свечения), возникающей в процессе эволюции разряда после пробоя. Для этого необходимо было решить следующие задачи.

- Исследовать электрические и оптические характеристики пробоя в длинной разрядной трубке в азоте при низком давлении.
- Найти диапазон условий, при которых наблюдается эффект памяти.
- Найти зависимость динамического напряжения пробоя от промежутка между разрядными импульсами и от скорости роста приложенного напряжения. Установить физическую природу эффекта памяти в азоте.
- Провести диагностику волны ионизации, инициирующей пробой, и найти зависимость ее скорости от напряжения пробоя и параметров импульсов. Выяснить возможность и условия реализации безволнового пробоя.
- Найти условия существования в азоте эффекта «тёмной фазы» развития положительного столба разряда, исследовать его закономерности и установить его природу.

Научная новизна

1. Измерена зависимость динамического напряжения пробоя от задержки относительно предыдущего разрядного импульса для обеих полярностей напряжения и различных значений скорости его роста. Показано, что в некотором диапазоне задержек напряжение пробоя последующего импульса может превосходить аналогичную величину для предыдущего.

2. Обнаружено, что в некоторых условиях наблюдается убывающая зависимость динамического напряжения пробоя от скорости роста напряжения.

3. Исследовано влияние эффекта памяти на волну ионизации, инициирующую пробой в длинной трубке. Обнаружена возможность безволнового пробоя в присутствии высокой концентрации электронов.

4. Измерена скорость волны ионизации одновременно с реализующимся значением динамического напряжения пробоя. Установлена корреляционная связь между этими величинами.

5. Впервые исследован эффект темной фазы развития положительного столба разряда в азоте. Выяснено, что его механизм связан с наработкой повышенной концентрации электронов во фронте ВИ.

Практическая значимость результатов работы

Результаты работы могут быть использованы при проведении исследований и разработке экономичных газоразрядных источников света в длинных разрядных трубках, в частности, при выборе оптимального диапазона частоты питающего напряжения.

Положения, выдвигаемые на защиту

1. Доказательство сложного характера «эффекта памяти» разрядного промежутка, который может как облегчать, так и затруднять пробой в длинной трубке.
2. Доказательство наличия участка спада на зависимости динамического напряжения пробоя от скорости роста подаваемого напряжения.
3. Доказательство и нахождение области существования пробоя, не инициированного волной ионизации.
4. Доказательство наличия корреляционной зависимости скорости волны ионизации от напряжения пробоя.
5. Экспериментальное подтверждение существования «темной фазы» развития положительного столба разряда в азоте, доказательство определяющей роли волны ионизации в её формировании.

Апробация результатов работы

Основные результаты настоящей диссертации опубликованы в 2-х статьях и представлены в 12 докладах на конференциях и семинарах: XXI Европейской конференции по атомной и молекулярной физике ионизированных газов (ESCAMPIG), 2012, Португалия; VI и VII Международных конференциях по физике плазмы и плазменным технологиям (PPPT), 2009, 2012, Минск; XXXVI, XXXVIII, XL и XLI Международных конференциях по физике плазмы и УТС, 2009, 2011, 2013, 2014, Звенигород; Всероссийских конференциях по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП), 2011, Петрозаводск, 2014, Казань; международном семинаре по физике плазмы, 2011, Грайфсвальд; семинаре «Получение, исследование и применение низкотемпературной плазмы», 2014, Москва, ИНХС; международных студенческих конференциях «Наука и прогресс», 2012, 2013, СПбГУ; 20-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, 2013, Архангельск.

Личный вклад соискателя

Получение экспериментальных материалов и их обработка проведены автором. Представленные теоретические оценки и аналитические построения проводились автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации

Диссертация представлена на 117 страницах, в том числе 80 рисунках. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 69 наименований.

Содержание работы

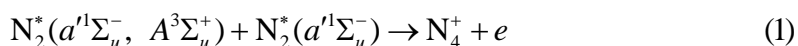
Во введении показана актуальность темы исследований, обоснована их научная новизна и практическая значимость. Определен объект исследований и поставлены основные задачи исследований. Приведены защищаемые положения.

Первая глава посвящена обзору научной литературы по затрагиваемым темам. В частности, изложены основные представления о пробое, его характеристиках. Более подробно освещен механизм пробоя, связанный с волной ионизации, ее наблюдение в эксперименте и подходы к теоретическому описанию и моделированию. Приведены некоторые основные результаты исследований эффекта памяти в коротких разрядных промежутках, описан метод «кривых памяти».

Вторая глава содержит информацию об экспериментальной установке и измерительной аппаратуре, а также о методике проведения эксперимента. Исследования проводились в трубке с расстоянием между электродами 40 см и внутренним диаметром 3 см, в азоте при давлении ~ 1 Торр. Осуществлялась непрерывная прокачка газа через разрядную трубку. Разряд зажигался при подаче на электроды высоковольтных импульсов положительной или отрицательной полярности. Импульсы формировались с помощью электронного ключа (разработка А.В.Мещанова) и имели линейно-растущий передний фронт. Система регистрации данных включала устройства для диагностики электрических величин (токи в цепях заземленного и высоковольтного электродов и напряжение на разрядной трубке) и для оптических и спектроскопических измерений. Сигналы регистрировались с помощью цифровых осциллографов с выходом на компьютер. При спектроскопических измерениях использовался многоканальный счетчик фотонов, разработанный Г.В.Жувикиным и В.А.Ивановым. Временное разрешение при регистрации электрических и оптических сигналов достигало 10 нс, при спектроскопических измерениях – 1 мкс. Динамическое напряжение пробоя определялось по осциллограммам напряжения на трубке. Пробойным потенциалом считался тот уровень напряжения, после которого наблюдался резкий спад на осциллограмме. Средняя скорость волны ионизации на участке трубки определялась по разнице моментов регистрации сигналов от двух разнесенных вдоль трубки световодов, передающих импульсы излучения фронта волны.

Третья глава посвящена исследованию эффекта «темной фазы» развития положительного столба разряда в азоте.

Ранее темная фаза (ТФ) была обнаружена и исследована в разряде в инертных газах [1, 2]. При пробое после первоначального всплеска интенсивности излучения разряда наступала пауза свечения всех спектральных линий и полос. Ее длительность могла достигать нескольких миллисекунд, по прошествии которых свечение выходило на стационарный уровень. Было доказано, что причина ТФ – повышенная, в сравнении со стационарной, концентрация электронов. Расчет показал, что источник этих электронов – реакции ионизации с участием метастабильных атомов. Поскольку в разряде в азоте процессы с участием метастабильных молекул:



также играют большую роль, можно было ожидать существование такого эффекта и в этом случае. Проведенные в работе исследования показали, что он действительно наблюдается, однако необходимая избыточная концентрация электронов в этом случае нарабатывается во фронте ВИ, а не в ходе процесса (1).

Условия эксперимента варьировались в следующих пределах: по давлению от 0,5 до 2 Торр, по току в разряде от 4 до 15 мА, по напряжению источника от 2,8 до 4,0 кВ; исследовались обе полярности напряжения. Пробой производился импульсами с фронтом шириной от 25 до 100 мкс, длительностью 10 мс и частотой 5 Гц.

Во всем диапазоне условий ТФ регистрировалась только при положительной полярности напряжения. Ее длительность составляла ~ 100 мкс и зависела от величины разрядного тока, давления газа, а также точки наблюдения вдоль оси трубки.

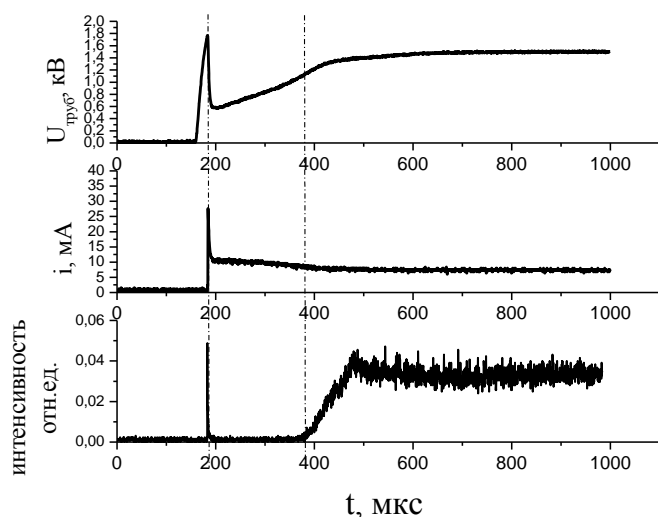


Рис. 1. Синхронные осциллограммы напряжения на трубке, разрядного тока и интегральной яркости при заземленном катоде. $p = 1$ Торр, $R_0 = 260$ кОм, $U_0 = 3,0$ кВ, период повторения импульсов 200 мс.

Синхронно с провалом свечения разряда на осциллограммах тока в цепи катода наблюдалась область плато, превышавшая уровень тока в стационарном разряде, а также провал на осциллограммах межэлектродного напряжения (рис.1). В момент пробоя, отвечающий резкому спаду напряжения, регистрируется узкий выброс тока в цепи катода и возникает короткий всплеск интенсивности, после которого следует ТФ. При отрицательной полярности все эти особенности не наблюдаются (рис.2).

Длительность ТФ возрастала с повышением давления, но снижалась с

ростом тока. Зависимость длительности ТФ от точки наблюдения вдоль оси трубки

выражалась в том, что для давлений, меньших 2 Торр, пауза свечения длилась дольше у катода. При $p > 2$ Торр наблюдалась обратная картина.

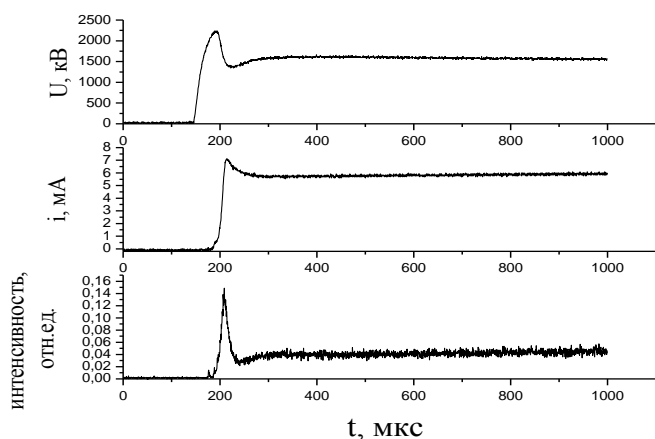


Рис.2 Синхронные осциллограммы напряжения на трубке, разрядного тока и интегральной яркости при заземленном аноде. Условия те же, что на рис.1.

Отдельно был исследован пик яркости оптического излучения на переднем фронте разрядного импульса. При положительной полярности напряжения он имеет малую длительность (ширина на полувысоте ~ 100 нс) и перемещается вдоль оси трубки от высоковольтного электрода. Скорость этого движения возрастала при приближении к катоду; в зависимости от условий, она менялась от $\approx 3 \cdot 10^6$ до $\approx 10^8$ см/с.

Минимальная зарегистрированная полуширина пика составляла 70 – 80 нс (рис.3). Эта величина порядка времени жизни короткоживущих состояний $N_2(C^3\Pi_u)$ (≈ 40 нс) и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ (≈ 60 нс), переходы с которых (вторая положительная (2 п.с.) и первая отрицательная (1 о.с.) системы соответственно) наблюдаются в спектре излучения пика (рис.2). Яркости полос в пике получились примерно одинаковыми, несмотря на большое различие энергий состояний $N_2(C^3\Pi_u)$ и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$, что свидетельствовало о большой величине приведенной напряженности электрического поля E/N . Из соотношения интенсивностей полос можно найти величину E/N в пике, которая составила ≈ 800 Тд, что на порядок больше, чем в положительном столбе установившегося разряда. Представленные факты дают право ассоциировать подвижный пик интенсивности с излучением из фронта ВИ.

При отрицательной полярности напряжения ширина пика больше почти на два порядка, чем в случае положительной полярности. Наблюдаемый широкий максимум яркости не проявляет движения вдоль трубки, а величина поля в нем не отличается от поля в разряде. Отдельные исследования показали, что в момент пробоя непосредственно над срезом катода возникает узкий всплеск свечения с высоким значением поля. Двигаясь вдоль оси трубки, он сильно расплывается и становится неразличимым с широким максимумом после прохождения первой трети ее длины.

Анализ литературных источников показывает, что в условиях невысоких напряжений отрицательные ВИ могут сильно затухать или вовсе не возбуждаться.

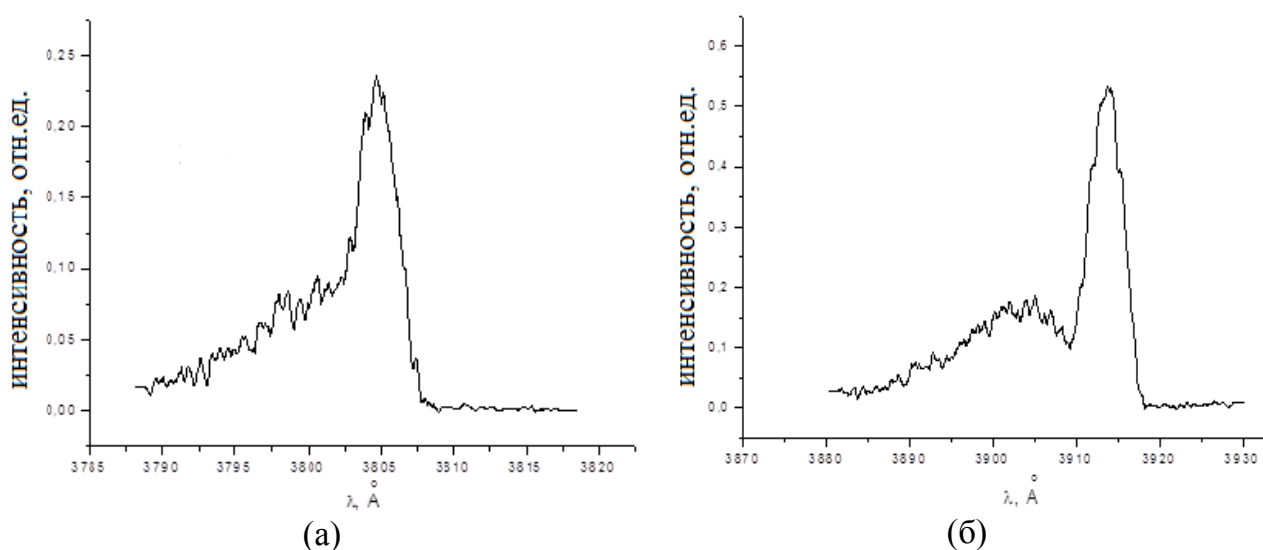


Рис. 3. Контуры полос излучения а) 2 п.с. (0 - 2) и б) 1 о.с. (0 - 0) азота в пике интенсивности. Давление 1Торр, $U_0 = 3$ кВ, $R_0 = 520$ кОм.

Н.А.Дятко разработал расчетную модель [3], описывающую развитие разряда после пробоя на основе согласованного решения уравнений для концентраций электронов, ионов, населенностей возбужденных состояний молекул и атомов, уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям и уравнения для электрической цепи. В стандартном варианте в этой модели бралось нулевое начальное условие для концентрации электронов. В этом случае модель показала невозможность возникновения ТФ в азоте за счет процесса (1) и воспроизвела оптические и электрические характеристики разряда при отрицательном напряжении. Для того, чтобы модель смогла воспроизводить ТФ, потребовалось задать начальную концентрацию электронов бóльшую, чем в стационарном разряде. Источником этих избыточных электронов может быть положительная волна ионизации. В этом случае модель удовлетворительно воспроизводит кривые, представленные на рис.1.

Глава 4 обобщает результаты исследований узкого (ширина на полувысоте ~ 100 нс) выброса на переднем фронте импульса тока в цепи заземленного катода, совпадающего с моментом пробоя трубки. Его амплитуда превосходит не только ток в стационарном разряде, но и максимально возможное значение тока для данной электрической цепи.

На рисунке 4а представлена развертка переднего фронта типичного сигнала тока в цепи заземленного катода. На кривой можно выделить две части: узкую (ширина ≈ 100 нс) на фронте кривой и медленно (за времена ~ 1 мкс) спадающую к току установившегося разряда. Если же заземленным электродом был анод, то

картина радикально менялась (рис.4б). Наблюдался широкий (~10 мкс) максимум тока, незначительно превосходящий ток установившегося разряда.

Обнаружена связь выброса тока в цепи заземленного катода с оптическим сигналом от ВИ. Выброс возникал после того, как фронт волны достигал заземленного электрода. Точнее, как выяснилось при измерениях непосредственно над срезом катода, происходило запаздывание оптического сигнала ВИ относительно выброса тока, которое составляло ≈ 50 нс.

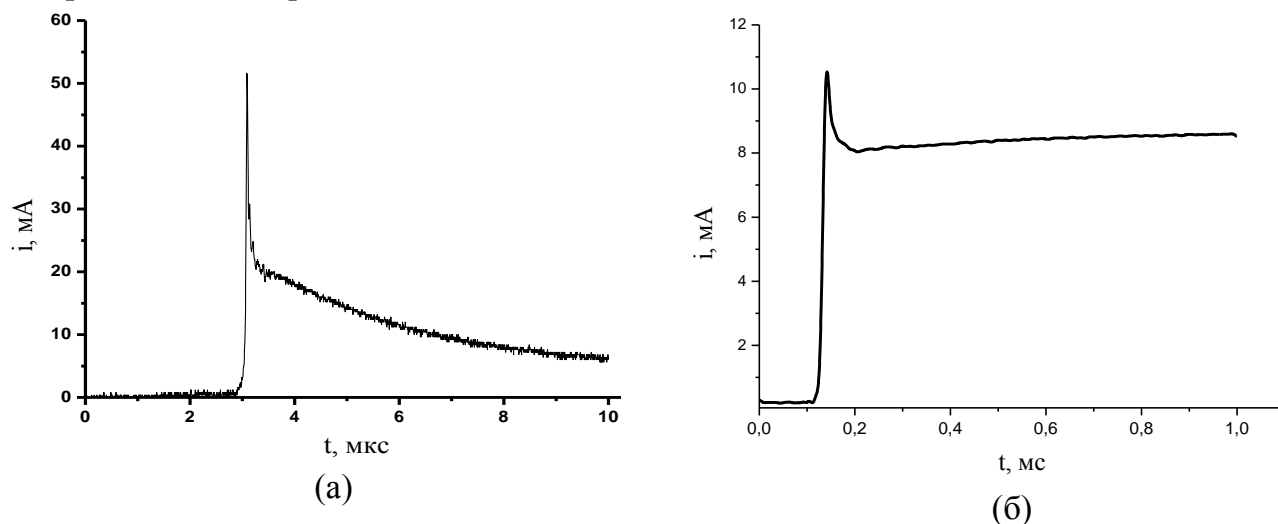


Рис. 4. Выброс тока для $p = 1$ Торр, $R_6 = 520$ кОм: а) $U_0 = +3$ кВ; б) $U_0 = -3$ кВ

Были проведены измерения тока в цепи высоковольтного анода с целью определить присутствие узкого выброса тока во всей цепи. Применялись схемы с индуктивной и резисторной развязкой; достаточной разрешающей способностью обладала лишь последняя. Эксперимент показал, что узкая компонента токового сигнала регистрируется исключительно в цепи заземленного электрода.

Еще одна особенность тока цепи заземленного катода – наличие предпробойной составляющей, появление которой коррелирует с движением волны ионизации от анода. Предпробойный ток можно связать с движением объемного заряда, который образуется во фронте ВИ и наводит слабый электрический ток во внешней цепи.

Выброс тока может иметь следующие причины. Во-первых, он может быть связан с разрядкой распределенной емкости трубки на землю через цепь катода в момент прибытия на него ВИ. Этот процесс моделировался как замыкание разрядного промежутка при срабатывании быстрого ключа, который подключал малое сопротивление плазмы и разряжал через него емкость. В результате в цепи катода возникает максимум тока.

Такой подход позволил воспроизвести широкую часть сигнала в цепи заземленного катода и максимум тока в цепи заземленного анода. Причем для

получения удовлетворительной аппроксимации предполагалось, что при пробое положительным напряжением проводимость возникающей плазмы на порядок выше, чем при пробое отрицательным. Этот результат хорошо согласуется с выводами модели ТФ в главе 3.

Узкая часть выброса тока не воспроизводится описанной моделью. Его природа может быть связана с передачей в цепь заземленного катода объемного заряда фронта ВИ. Из предположения о том, что ВИ ведет себя как уединенная волна электрического поля гауссовой формы, а также из электростатической теоремы Гаусса можно было приближенно связать объемный заряд фронта с полем и, соответственно, получить уединенную волну электрического заряда. Принимая полуширину узкой части выброса тока за время передачи заряда на катод, можно воспроизвести ход тока во времени:

$$i(t) = \pi \varepsilon_0 \frac{\varphi_0 r_0}{\Delta t} \exp \left\{ - \left(\frac{L/V - t}{\Delta t} \right)^2 \right\}$$

где φ_0 - пробойный потенциал (2 кВ), r_0 – радиус трубки вблизи катода (3 см), ε_0 – электрическая постоянная, $\Delta t = 30$ нс – полуширина контура волны, V – скорость ВИ, L – длина разрядного промежутка. Результат моделирования обеих (широкой и узкой) составляющих осциллограммы тока приведен на рисунке 5.

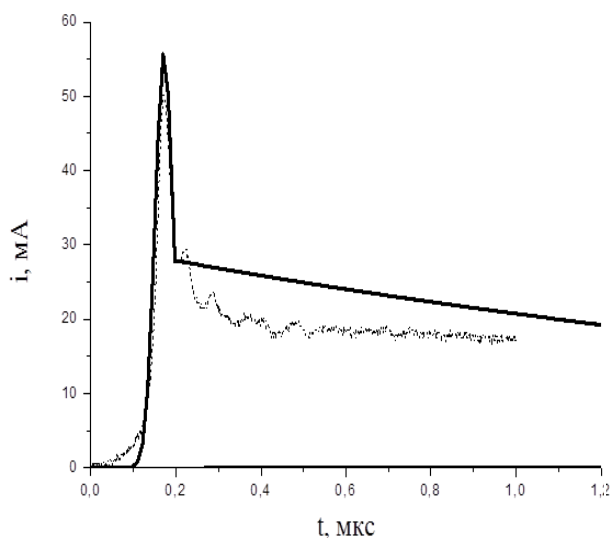


Рис.5. Зависимость от времени тока в цепи катода. Прерывистая линия – результат эксперимента, сплошная – результат расчета. $p = 1$ Торр, $R_6 = 260$ кОм, $U_0 = 2,7$ кВ.

Глава 5 посвящена эффекту памяти (ЭП) длинной трубки при пробое в азоте. Исследовались два режима пробоя: 1) последовательностью одиночных импульсов напряжения с фиксированной амплитудой и изменяемым периодом; 2) последовательностью пар импульсов напряжения фиксированной амплитуды и частоты повторения, изменяемым параметром была временная задержка между импульсами внутри пары. В обоих режимах применялись импульсы с линейно-растущим фронтом и с длительностью импульса 10 мс. Крутизна фронта изменялась в пределах $(0,5 - 80) \cdot 10^6$ В/с. Одиночные импульсы следовали с частотой от 0,1 до 30 Гц, пары импульсов подавались с частотой 5 Гц и с промежутком от 0.5 до 64 мс между импульсами пары.

Как отмечалось выше, ЭП ранее изучался в работах по исследованию коротких разрядных промежутков(см. обзор [4] и ссылки в нем). При этом он наблюдался как

влияние предшествующего разряда на время запаздывания τ_d пробоя относительно переднего фронта импульса напряжения. В настоящей работе ЭП наблюдался как зависимость динамического напряжения пробоя U_b от временной задержки относительно предыдущего разрядного импульса. Очевидно, что при заданной крутизне переднего фронта импульса напряжения (dU/dt) величина U_b однозначно связана с τ_d .

В первом режиме пробоя изучался характер зависимости U_b от dU/dt для различных периодов T повторения импульсов. При отсутствии влияния предыдущего импульса на пробой величина U_b должна расти с ростом dU/dt [4]. Это обусловлено наличием конечного времени запаздывания пробоя. В данной работе такая зависимость действительно наблюдалась в случае редких импульсов (для положительной полярности импульсов – при $T = 1$ с). При меньших периодах эта зависимость демонстрировала резкий спад (рис.6). Одновременно наблюдалось заметное снижение статистического разброса напряжения пробоя. Форма кривых не зависела от балластного сопротивления и слабо менялась при сближении импульсов в диапазоне $T = 50 - 200$ мс. Т.о., наблюдался ЭП с характерным временем ~ 100 мс. В случае пробоя отрицательным напряжением добиться сильного разброса и возрастания U_b с dU/dt не удалось даже при периоде 10 с.

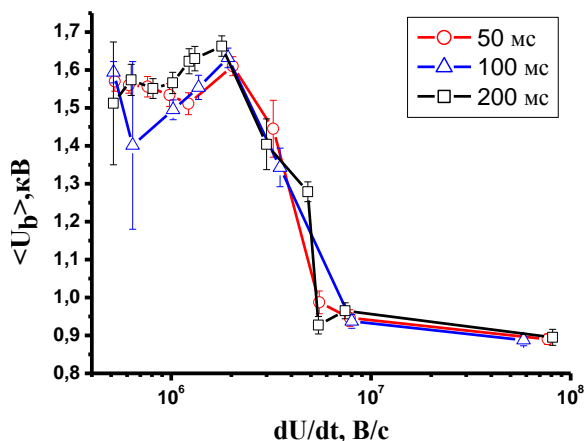


Рис.6. Зависимость среднего пробойного напряжения от dU/dt . $p = 0.6$ Торр, периоды повторения импульсов 50, 100, 200 мс, $R_b = 260$ кОм

Одновременно с напряжением пробоя измерялась скорость предпробойной волны ионизации $v_{ВИ}$. В предыдущих работах по исследованию пробоя длинных трубок [5, 6] находилась зависимость этой величины от амплитуды импульса приложенного напряжения. При этом пробойное напряжение оставалось неизвестным. Измерения, проведенные в данной работе, позволили сопоставить величину скорости ВИ с реализующимся динамическим напряжением пробоя при различных значениях dU/dt .

Эксперименты проводились в режиме зажигания разовых импульсов с периодом не менее 1 мин., т.е. при заведомом отсутствии ЭП.

В этих условиях наблюдался значительный статистический разброс как значений U_b , так и $v_{ВИ}$. Оказалось, тем не менее, что между ними существует явно выраженная корреляционная связь (рис.7). Семейство кривых $v_{ВИ}(U_b)$ для различных dU/dt демонстрирует слабую зависимость от этого параметра, за исключением минимальных его значений (5 В/мс).

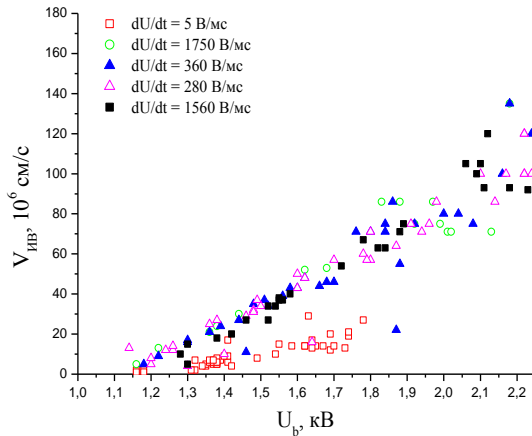


Рис.7. Зависимость скорости ВИ от величины динамического напряжения пробоя. $p = 0,6$ Торр, $R_0 = 260$ кОм.

Во втором режиме пробоя были получены зависимости $U_b(\Delta t)$ для диапазона задержек Δt от 0,5 до 70 мс и различных значений dU/dt . При положительной полярности импульсов для всех dU/dt в области задержек 4 – 5 мс наблюдалось превышение динамического напряжения пробоя второго импульса U_{b2} над пробойным напряжением первого импульса U_{b1} . Для этого, довольно необычного, явления в работе использован термин «аномальный эффект памяти» (АЭП). В

области $dU/dt < 10^7$ В/с АЭП возникал в узком диапазоне $\Delta t - 3 \div 5$ мс и наблюдался в виде максимума на кривой $U_{b2}(\Delta t)$, который превосходил среднее значение U_{b1} на 400 В (рис.8). Увеличение Δt приводило к снижению U_{b2} и выходу кривой на уровень среднего значения U_{b1} . При низких dU/dt и минимальных задержках, вплоть до области АЭП, регистрировался существенный предпробойный ток.

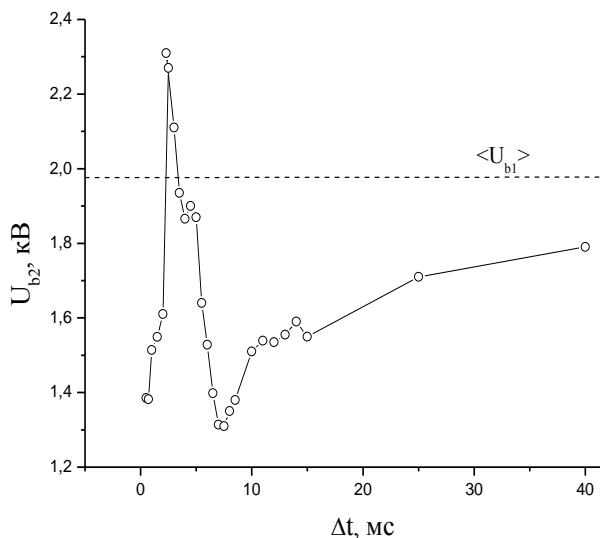


Рис.8. График зависимости $U_{b2}(\Delta t)$, $p = 1$ Торр, $R_0 = 260$ кОм, $dU/dt = 5,1 \cdot 10^6$ В/с

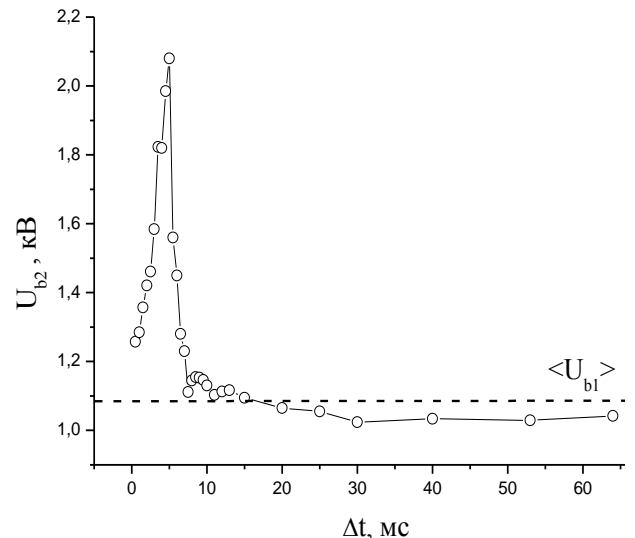


Рис.9. График зависимости $U_{b2}(\Delta t)$, $p = 1$ Торр, $R_0 = 260$ кОм, $dU/dt = 13 \cdot 10^6$ В/с

При более высоких значениях параметра dU/dt область АЭП расширялась до диапазона от 0,5 до 15 мс (рис.9). При этом в максимуме U_{b2} его превышение над U_{b1} достигало ≈ 1000 В. Повышение скорости роста напряжения приводило к снижению максимума на кривых $U_{b2}(\Delta t)$, так же как и повышение разрядного тока. Волна ионизации всегда регистрировалась перед первым импульсом, а ее присутствие перед вторым импульсом зависело от задержки. Графики на рис.10 показывают зависимости

$U_{b2}(\Delta t)$ и $v_{ВИ}(\Delta t)$ для второго импульса. Кривая для скорости ВИ начинается от $\Delta t = 4$ мс, в области АЭП. При меньших задержках волна не регистрировалась, отсутствовали выбросы в цепи заземленного катода и резкие перепады напряжения на трубке в момент пробоя.

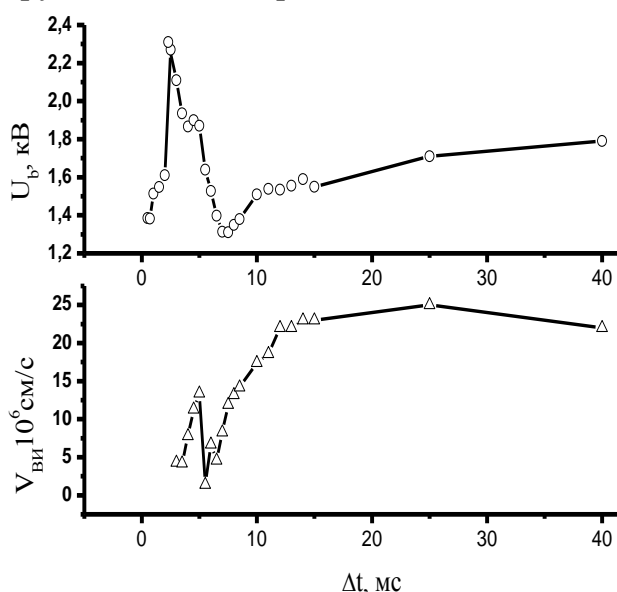


Рис.10. Зависимости напряжения пробоя и скорости ВИ во втором импульсе от задержки.

$$p = 1 \text{ Торр}, R_0 = 260 \text{ кОм}, dU/dt = 6 \cdot 10^6 \text{ В/с}$$

напряжения, наблюдаемая для большого периода повторения импульсов, вполне ожидаема и наблюдалась ранее для коротких разрядных промежутков. Ситуация, когда $U_{b2} < U_{b1}$ («обычный» эффект памяти), также объяснима: оставшиеся от предыдущего импульса электроны сокращают время запаздывания пробоя и этим уменьшают пробойный потенциал. Противоположный случай аномального ЭП ($U_{b2} > U_{b1}$) характерен отсутствием волны ионизации для соответствующих задержек Δt (рис.10). Подавление генерации волны может происходить из-за недостаточно большого скачка потенциала между анодом и стенкой ввиду наличия остаточных электронов в этой области. С другой стороны, заряженные частицы, оставшиеся в объеме и на стенке, концентрирует внешнее поле внутри трубки, аналогично тому, как это происходит в активной фазе разряда [7]. Это обеспечивает возможность развития разряда за счет объемной ионизации во всей трубке, без участия ВИ. Низкая эффективность этой, распределенной по объёму, ионизации в сравнении с ионизацией во фронте ВИ может быть причиной аномального эффекта памяти. Его преодоление связано с восстановлением условий генерации ВИ.

Падающий характер зависимости пробойного напряжения от dU/dt , появляющийся при сближении импульсов до ~ 100 мс (рис.6), свидетельствует о наличии ЭП такого временного масштаба. В работах по изучению ЭП в коротких

разрядных промежутках в азоте [4] рассматривают для таких временных интервалов два возможных механизма появления электронов, инициирующих пробой: ионно-электронная эмиссия и эмиссия при гетерогенной рекомбинации атомов азота. В случае пробоя длинной трубки можно использовать такое рассмотрение применительно к первичному пробую между высоковольтным электродом и близлежащим участком стенки трубки. Согласно современным представлениям [6], этот пробой формирует волну ионизации и таким образом инициирует пробой всей трубки. Оценки показывают, что в рассматриваемых условиях первый из этих процессов может обеспечить более интенсивный поток электронов и, следовательно, более низкий потенциал пробоя. При $\Delta t \sim 100$ мс ионы, которые до включения электрического поля двигались в режиме свободной диффузии, переходят в режим дрейфа, производя при взаимодействии со стенкой вторичную эмиссию. Однако, если напряжение на аноде растет не достаточно быстро, то все ионы уходят из промежутка еще до того, как поле достигнет достаточного для пробоя значения. Тогда источником инициирующих электронов становится второй механизм – гетерогенная рекомбинация атомов. Эффективность эмиссии при этом падает, что приводит к росту напряжения пробоя.

В **Заключении** формулируются основные результаты, полученные при выполнении работы.

1. Проведены исследования влияния предыдущего разрядного импульса на характеристики пробоя («эффект памяти»). Установлено, что предыдущий импульс влияет на: 1) величину динамического напряжения пробоя; 2) зависимость величины напряжения пробоя от крутизны фронта напряжения, подаваемого на электроды; 3) скорость предпробойной волны ионизации. Установлена зависимость исследованных характеристик от полярности приложенного напряжения.

2. Обнаружено, что предыдущий импульс может приводить не только к облегчению, но и к затруднению пробоя, повышая пробойное напряжение («аномальный эффект памяти»).

3. Установлено, что в условиях существования аномального эффекта памяти реализуется особый, безволновой, механизм пробоя.

4. Впервые проведены одновременные измерения напряжения пробоя и скорости волны ионизации. Установлено наличие корреляции между этими величинами.

5. Обнаружено, что в области действия «эффекта памяти» увеличение скорости роста напряжения, прикладываемого к электродам, может приводить к резкому уменьшению динамического напряжения пробоя.

6. Обнаружен и исследован эффект «тёмной фазы» развития разряда в азоте. Необходимым условием его существования является положительная полярность приложенного напряжения. Показано, что возникновение тёмной фазы в азоте обусловлено избыточной концентрацией электронов, остающихся после прохождения волны ионизации.

7. Даны объяснения наблюдаемых явлений, подтвержденные оценками, модельными или численными расчетами.

Цитированная литература

1. *Ионих Ю.З., Уткин Ю.Г., Чернышева Н.В., Евдокименко А.С.* // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С.289.
2. *Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П.*// Физика плазмы, 2005. Т.31. С.939.
3. *Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П., Шишпанов А.И.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 544.
4. *Rejović M.M., Ristić G.S., Karamarković J.P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002 V. 35. P. R91.
5. *Suzuki. T.* // J.Appl.Phys.1977. V. 48. P. 5001.
6. *Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В.* // УФН. 1994. Т.164. С. 263.
7. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992 г.

Список публикаций по теме диссертации

1. *Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П., Шишпанов А.И.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 544-559.
2. *Шишпанов А.И., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Дятко Н.А.*// Физика плазмы. 2014. Т.40. №6. С. 548-562.
3. *Shishpanov A., Meshchanov A., Ionikh Y.*// ESCAMPIG XXI.Viana do Castelo, Portugal, 2012. Poster № P3.9.4.
4. *Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П., Шишпанов А.И.*// Труды VI Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям. Минск, 2009, с.23-26.
5. *Шишпанов А.И., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Кучугура М.Д.*//Труды VII Международной конференции по физике плазмы и плазменным технологиям. Минск, 2012., т.1, с.279-282.
6. *Томберг Д.С., Шишпанов А.И., Блашков В.И., Мещанов А.В., Ионих Ю.З.* //Труды XXVI Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2009, с.235

7. Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П., Шишпанов А.И.//Труды XXVIII Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2010, с.195.
8. Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Напартович А.П., Шишпанов А.И.//Труды XXXI Международной конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2013.
9. Ионих Ю.З., Мещанов А.В., Шишпанов А.И.// Труды конференции по физике низкотемпературной плазмы. Петрозаводск, 2011, т.1, с.117-122.