



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук**

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

06.08.2014 № 91217

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
ФТИ им. А.Ф.Иоффе
д.ф.-м.н., профессор



С.В.Лебедев

« 06 августа 2014 г. »

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Шишпанова Александра Игоревича

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ,

ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ПРОБОЕ ДЛИННОЙ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ В

АЗОТЕ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ», выполненную в Федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
профессионального образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Разряд низкого давления широко используется в современной технике и технологиях, а также при исследовании свойств неравновесной плазмы и процессов столкновений в ней. Важнейшей стадией формирования разряда является пробой. Детально исследованы и описаны в статьях, монографиях и учебниках два типа пробоя: таунсендовский (лавинный) и стримерный. Первый из них реализуется при небольших перенапряжениях и при геометрии разрядного промежутка, соответствующей формированию близкого к однородному электрического поля. Стримерный пробой имеет место при большом перенапряжении на промежут-

ке. В случае тлеющего разряда пониженного давления в длинных разрядных трубках реализуется третий тип пробоя – пробой, инициируемый волной ионизации. Длинными считаются трубки, в которых расстояние между электродами намного больше их размеров и диаметра трубки. Этот механизм пробоя исследован значительно меньше двух других: список соответствующих публикаций насчитывает не более двух десятков статей и двух-трех монографий, а в учебной литературе он не описан совсем. В то же время тлеющий разряд в длинных трубках используется в газоразрядных источниках света (люминесцентных лампах, в том числе современных, компактных, модификациях) и в электроразрядных лазерах, а также при лабораторных исследованиях плазмы. Поэтому тематику диссертации следует считать весьма актуальной.

Диссертация включает 5 глав, введение, заключение и список литературы.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации. Приводится информация о явлениях, исследованию которых в основном посвящена работа, и которые сопровождают пробой: волна ионизации, «эффект памяти» разрядного промежутка, «темная фаза» эволюции положительного столба тлеющего разряда. Дается список публикаций по теме разряда.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации. Рассматриваются работы, посвященные изучению пробоя в длинных трубках, начиная с классических немецких статей 20-х годов и кончая исследованиями последних лет, выполненными на современном экспериментальном оборудовании. Описываются результаты экспериментальных и теоретических работ по изучению волн ионизации, играющих ключевую роль при пробое в длинных трубках. Рассматривается методика и результаты исследования «эффекта памяти» разрядного промежутка (влияния предыдущего разрядного импульса на задержку пробоя). Основная роль в изучении этого эффекта принадлежит группе сербских исследователей. Отмечается, что все эксперименты по изучению этого явления проводились для коротких разрядных промежутков, где пробой носит принципиально иной характер, чем в длинных трубках.

Во **второй главе** дано описание экспериментальной установки и процедуры проведения экспериментов. Приводятся соответствующие схемы, результаты измерений иллюстрируются графиками. Используемая аппаратура позволяет проводить синхронизированные электрические, оптические и спектроскопические измерения с высоким (~ 10 нс) временным разрешением. В частности, благодаря этому удалось измерить напряженность электрического поля во фронте волны ионизации, ширина которого во временной шкале менее 100 нс, а скорость движения достигает 10^8 см/с. В известной степени уникальным можно считать высоковольтный источник питания с линейно растущим фронтом обеих полярностей и регули-

руемой крутизной, достигающей 10^8 В/с. Отметим также процедуру определения динамического напряжения пробоя, позволяющую проводить измерение и обработку в автоматическом режиме.

В **третьей главе** диссертации изучается т.н. «темная фаза» (промежуток времени, в течение которого отсутствует свечение плазмы) эволюции положительного столба тлеющего разряда в азоте. Это явление было ранее обнаружено при исследовании импульсного разряда в инертных газах. В этом случае оно имело достаточно простое и количественно подтвержденное объяснение. Главным фактором здесь была повышенная, в сравнении со стационарной, концентрация электронов в момент непосредственно после пробоя. Источник этих электронов – реакции ионизации с участием метастабильных атомов. Исследования, проведенные диссертантом, показали наличие темной фазы и в азоте. В этом случае, однако, расчет показал, что ионизация с участием метастабильных молекул не может обеспечить избыточное количество электронов. Анализ экспериментальных данных привел к выводу, что здесь эти электроны генерируются предпробойной волной ионизации. Такой механизм позволяет объяснить все особенности наблюдаемой картины, в частности, ее зависимость от полярности приложенного напряжения.

В **четвертой главе** диссертации рассматривается форма разрядного тока в момент пробоя и непосредственно перед ним. Поведение тока обнаруживает в ряде случаев две особенности: ненулевой ток перед пробоем (предпробойный ток) и выброс в момент пробоя. Этот выброс очень узкий (< 100 нс), а его амплитуда заметно превышает не только ток стационарного разряда, но и максимальный ток, который может протекать в разрядной цепи. Для прояснения этой парадоксальной ситуации была проведена серия специальных измерений, из результатов которых следует, что этот выброс наблюдается только в цепи заземленного катода. Наличие как выброса на токе, так и предпробойного тока коррелирует с прохождением волны ионизации через трубку. Совокупность этих данных приводит автора к выводу о том, что основной причиной наблюдаемых особенностей может являться перенос объемного заряда при движении фронта волны ионизации.

Пятая глава, самая объемная из всех глав диссертации, посвящена изучению «эффекта памяти» разрядного промежутка. Новизна постановки проблемы состоит в том, что впервые этот эффект изучается при пробое длинной разрядной трубки. «Память» промежутка в описываемых экспериментах проявляется во влиянии предыдущего разрядного импульса на напряжение пробоя. При этом исследуется либо периодическая последовательность импульсов варьируемой частоты и с различной скоростью роста напряжения, либо последовательность пар импульсов с варьируемым интервалом между ними. Одновременно проводятся измерения скорости движения волны ионизации. Из полученных закономерностей

наиболее интересным является существование диапазона условий с т.н. аномальным эффектом памяти, когда напряжение пробоя увеличивается под влиянием предыдущего разрядного импульса, причем пробой в этих условиях происходит необычным образом – без волны ионизации.

В **Заключении** перечисляются основные результаты, полученные в работе.

Список литературы содержит 69 наименований и является исчерпывающим.

В диссертационной работе набран большой и интересный экспериментальный материал. Диссертация написана ясно и логично и хорошо иллюстрирована рисунками, отражающими основные результаты исследования. Вместе с тем, диссертация не лишена некоторых недостатков:

1. В главе 2 следовало бы уделить больше внимания описанию возможных искажений сигналов измерительной аппаратурой при проведении временных измерений (роли паразитной емкости входных цепей осциллографов и т.п.).

2. В главе 3 нужно было бы объяснить, почему в области темной фазы разрядный ток превышает стационарный уровень (рис. 3.2).

3. Одной из целей изучения формы тока является выяснение, существует ли корреляция между наличием выброса на токе и возникновением темной фазы (глава 4, стр. 56). Однако далее этот вопрос не рассматривается.

Диссертация достаточно хорошо и аккуратно оформлена, однако:

4. При оформлении диссертации допущен ряд опечаток. Например, на рис. 3.3 в наименовании оси ординат должны быть вольты, а не киловольты; в подписях к рис. 3.6, 3.7 и 3.9 вместо МОм (мегаом) написано мОм (миллиом).

Оценивая диссертационную работу А.И.Шишпанова в целом, можно утверждать, что она представляет собой полноценное оригинальное научное исследование. Полученные в ней результаты существенно углубляют понимание механизмов электрического пробоя длинных разрядных трубок при пониженном давлении газа. Обнаружение таких закономерностей, как существование аномального эффекта памяти и безволнового пробоя, меняют общепринятые представления о процессе пробоя. Полученные результаты имеют и практическое значение, в частности, для разработки современных газоразрядных источников света. Приведенные замечания не влияют на высокую оценку работы. Полученные результаты представляются вполне достоверными, они докладывались на различных международных и российских конференциях и семинарах, где обсуждались с признанными специалистами по этой тематике. Результаты работы могут быть использованы в исследованиях, проводимых в СПбГУ, ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, МФТИ, ТРИНИТИ, ИНХС РАН, при чтении курсов лекций «Физика низкотемпературной плазмы» и «Физика газового разряда».

В заключение, можно утверждать, что диссертационная работа «Экспериментальное исследование явлений, происходящих при пробое длинной разрядной трубки в азоте при низком давлении» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением № 842 Правительства РФ от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Шишпанов Александр Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Основные результаты работы своевременно опубликованы в ведущих научных журналах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация обсуждена и одобрена на семинаре лаборатории Физики низкотемпературной плазмы ФТИ им.А.Ф.Иоффе _04_ августа 2014 г., протокол №_6_.

Заведующий лабораторией
к.ф.-м.н.

/Школьник С.М./

Ст.н. сотр., к.ф.-м.н.

/Марциновский А.М./

