

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ
В ВОЗДУХЕ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСОВ ТРИЧЕЛА

© 2008 г. В. И. Карась, В. И. Голота, О. В. Болотов, Б. Б. Кадолин, Д. В. Кудин

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”**Национальной академии наук Украины*

Поступила в редакцию 06.02.2008 г.

Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в электродной геометрии типа “игла-сфера” выявили две области излучения: наряду с существованием общеизвестной области излучения вблизи острейшего электрода, показано наличие прианодной области, интенсивность излучения из которой существенно зависит от формы анода. Обнаружена задержка излучения из прианодной области по отношению к началу токового импульса Тричела, причем длительность такой временной задержки зависит от длины разрядного промежутка и величины приложенного высоковольтного напряжения. Излучение из прианодной области разряда в диапазоне длин волн 300–400 нм идентифицировано как спектры излучения второй положительной системы азота (переход $C^3P_u - B^3P_g$).

PACS: 52.25.Os, 52.80.-s, 52.80.Hc.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования коронного разряда не утратили своей актуальности, поскольку не удается построить замкнутую модель, удовлетворительно описывающую формирование и развитие разряда.

Особый интерес представляет изучение отрицательной короны в коротких разрядных промежутках при атмосферном давлении. Такой разряд является самостоятельным и формируется в сильно неоднородных электрических полях, характерных для электродных систем типа “игла-плоскость” при подаче на игольчатый электрод потенциала отрицательной полярности, достаточного для поддержания горения разряда. В некотором интервале напряжений разрядный ток представляет собой установившуюся последовательность импульсов, получивших название импульсов Тричела [1]. Увеличение напряжения на разрядном промежутке при фиксированных внешних условиях приводит к снижению амплитуды импульсов Тричела и увеличению частоты следования импульсов. При достижении определенного значения приложенного напряжения можно реализовать переход разряда в диффузную стадию [2], характеризующуюся протеканием постоянного тока через разрядный промежуток [3].

Обычно при построении модели отрицательного коронного разряда разрядный промежуток условно разделяют на две области. Яркая светящаяся область разряда, расположенная непосредственно вблизи (до 1мм) коронирующего элект-

рода, называется генерационной зоной коронного разряда. Генерационная зона характеризуется высокими значениями приведенной напряженности электрического поля, и в ней интенсивно протекают процессы рождения заряженных частиц. Остальная область разрядного промежутка называется зоной дрейфа. В этой области разрядного промежутка приведенная напряженность электрического поля недостаточна для набора частицами энергий, необходимых для интенсивной ионизации, и вследствие чего в этой зоне дрейфа осуществляется дрейф к аноду преимущественно отрицательно заряженных частиц. Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения из генерационной зоны разряда при низких давлениях приведены в работе [4]. В работе [5] предложена модель, позволившая описать установление последовательности токовых импульсов Тричела в воздухе при быстром приложении напряжения к межэлектродному промежутку. Среди многих работ, посвященных теоретическому анализу механизмов формирования импульсов Тричела, можно отметить работы [6, 7]. Численное моделирование отрицательного коронного разряда при малых токах, проведенное в работе [8], позволило воспроизвести последовательность импульсов Тричела в воздухе. При этом расчетные временные параметры отдельного импульса Тричела хорошо согласуются с экспериментальными данными, однако частота следования импульсов, полученная из численного моделирования имеет расхождение с экспериментальными данными. Расхождение

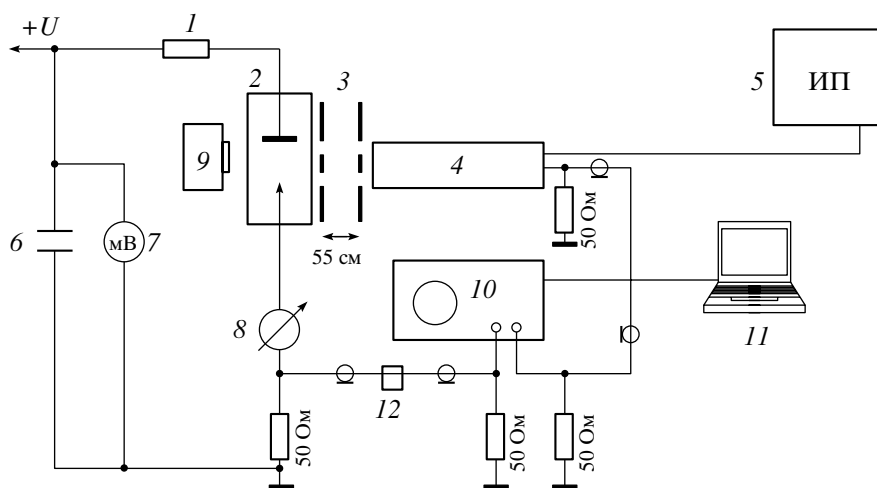


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 – балластный резистор 130 кОм; 2 – разрядная ячейка; 3 – щель; 4 – фотозумножитель ФЭУ-36; 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ; 6 – емкостной фильтр напряжения 2200 пФ; 7 – киловольтметр С196; 8 – микроамперметр М906; 9 – фотоаппарат Olympus C7070; 10 – осциллограф Tektronix TDS-210; 11 – компьютер IBM PC; 12 – линия задержки 38 нс.

между результатами экспериментов и предложенными моделями указывает на необходимость продолжения экспериментального изучения отрицательной короны, и в особенности изучения пространственно-временных характеристик процессов, протекающих в дрейфовой части разрядного промежутка.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования пространственных характеристик излучения отрицательной короны в воздухе атмосферного давления проводились на основе детектирования фотозумножителем (ФЭУ) излучения разряда из различных участков разрядного промежутка. Регистрация излучения осуществлялась из прикатодной и прианодной областей разрядного промежутка. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

В качестве источника питания использовался стабилизированный источник высоковольтного напряжения с амплитудой до 30 кВ. Напряжение на разрядном промежутке измерялось киловольтметром С196. Средний ток разряда контролировался микроамперметром М906. Для стабилизации постоянного высоковольтного напряжения на разрядном промежутке в электрическую цепь параллельно включался высоковольтный конденсатор 6, емкостью 2200 пФ. В экспериментах использовалась электродная система типа “игла–сфера”. Катод представлял собой вольфрамовую иглу длиной 10 мм с радиусом закругления вершины 20 мкм. Анодом служила сфера, выполненная из нержавеющей стали, диаметром 8 мм. Величина межэлектродного зазора составляла

7 мм, 10 мм, и 15 мм. Перед проведением экспериментов производилась специальная обработка игольчатого и сферического электродов для поддержания устойчивого горения разряда. Показателем устойчивого горения разряда была стационарная форма регистрируемого во внешней цепи токового импульса Тричела, формирование которого обусловлено процессами, протекающими в разрядном промежутке. Стационарные формы токового импульса и частоты следования токовых импульсов соответствовала устойчивому режиму горения разряда, в условиях которого контролировались осциллограммы токовых импульсов Тричела.

Для регистрации временных и амплитудных характеристик сигналов использовались калиброванные шунты, сигналы с которых подавались на входы цифрового осциллографа Tektronix TDS210. Частота дискретизации осциллографа составляла 1 GHz. Временные характеристики излучения из выбранных областей разряда, исследовались с помощью ФЭУ 36 с временными параметрами: разброс времени пролета электронов по фотокатоду 2 нс., время нарастания импульса 3 нс. Область максимальной спектральной чувствительности ФЭУ 36 300–600 нм. Выделение излучения из приэлектродных областей разрядного промежутка осуществлялось с помощью системы щелей. Щели были выполнены в двух непрозрачных экранах, разнесенных друг от друга на расстояние 55 мм, в каждом из которых были вырезаны по две щели размером 20 × 1 мм. Экраны располагались относительно разрядного промежутка и друг относительно друга так, что через систему щелей были видны только выбранные

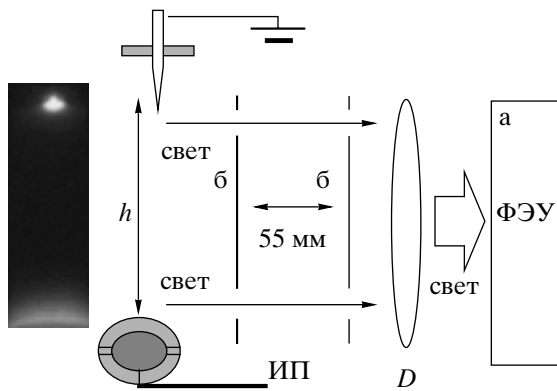


Рис. 2. Фотография коронарного разряда отрицательной полярности и упрощенная оптическая схема эксперимента, где h – межэлектродный промежуток; а – фотокатод ФЭУ 36; б – щели, в – кварцевая линза.

участки разрядного промежутка. На рис. 2 приведена упрощенная схема эксперимента.

В экспериментах одновременно производилась регистрация импульса тока разряда и сигнала с ФЭУ, на фотокатод которого фокусировалось излучение из прикатодной и прианодной областей разрядного промежутка. Через щели проходило световое излучение только из областей расположенных на расстоянии 1 мм от поверхности соответствующего электрода. Для синхронизации токового сигнала и сигнала ФЭУ в цепь измерения разрядного тока вводилась линия задержки с постоянной времени равной 38 нс, которая компенсировала запаздывание сигнала с ФЭУ, обусловленное временем пролета электронов через ФЭУ.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально показано, что в коронарном разряде при атмосферном давлении для геометрии “игла-сфера” в режиме импульсов Тричела, в разрядном промежутке происходит две световые вспышки. Сначала регистрируется достаточно короткий импульс излучения из генерационной зоны, и только через некоторое время начинает светиться область непосредственно прилегающая к сферическому аноду. Размер светящейся области у сферического анода увеличивается с ростом приложенного напряжения и может расширяться до середины разрядного промежутка, в то время как свечение с острейного электрода локализовано в малой окрестности вблизи острия. На рис. 3 приведена типичная осциллограмма разрядного тока в режиме импульсов Тричела (верхний луч) и синхронизованная с ней осциллограмма токового сигнала с ФЭУ (нижний луч).

В экспериментах регистрировался световой сигнал только из областей, непосредственно при-

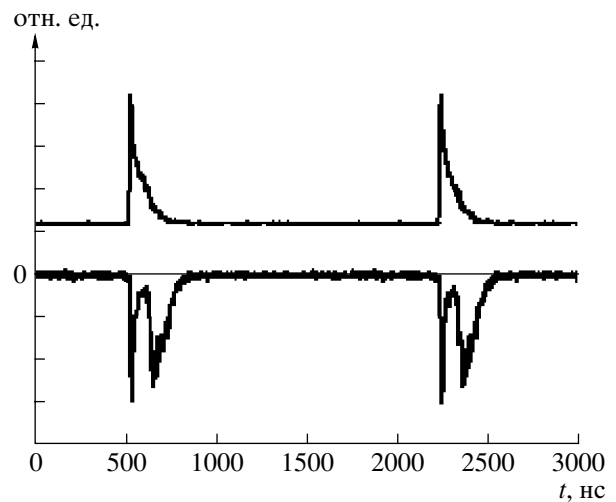


Рис. 3. Типичные осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и сигнала с ФЭУ (нижний луч) для отрицательного коронарного разряда в режиме импульсов Тричела. Межэлектродное расстояние 7 мм, $U = 9.6$ кВ, $I_{cp} = 34$ мкА.

мыкающих к электродам. Из осциллограмм видно, что ток разряда представляет собой установившуюся последовательность импульсов с характерной длительностью ~ 250 нс и периодом следования ~ 2.2 мкс. Регистрируемые импульсы тока ФЭУ, соответствующие импульсам излучения из прикатодной и прианодной областей, разнесены между собой по времени. Начало импульса излучения из прикатодной области происходит одновременно с началом импульса разрядного тока, соответственно первый максимум на осциллограмме импульса тока ФЭУ соответствует вспышке излучения у катода, второй максимум импульса соответствует вспышке излучения из прианодной области. Характерная длительность импульса излучения из области острейного катода (~ 30 нс) значительно меньше, чем длительность импульса Тричела (~ 200 нс). Длительность импульса излучения из прианодной области порядка длительности токового импульса.

В результате исследований установлено, что временная задержка между вспышками излучения из прикатодной и прианодной областей зависит как от межэлектродного расстояния, так и от величины приложенного напряжения. На рис.4 представлены осциллограммы импульсов тока ФЭУ 36 соответствующего импульсам излучения из прианодной и прикатодной областей разрядного промежутка. Осциллограммы приведены для межэлектродных расстояний 7 мм, 10 мм, 15 мм, и различных значений приложенного высоковольтного напряжения- U , и среднего тока разряда – I_{cp} .

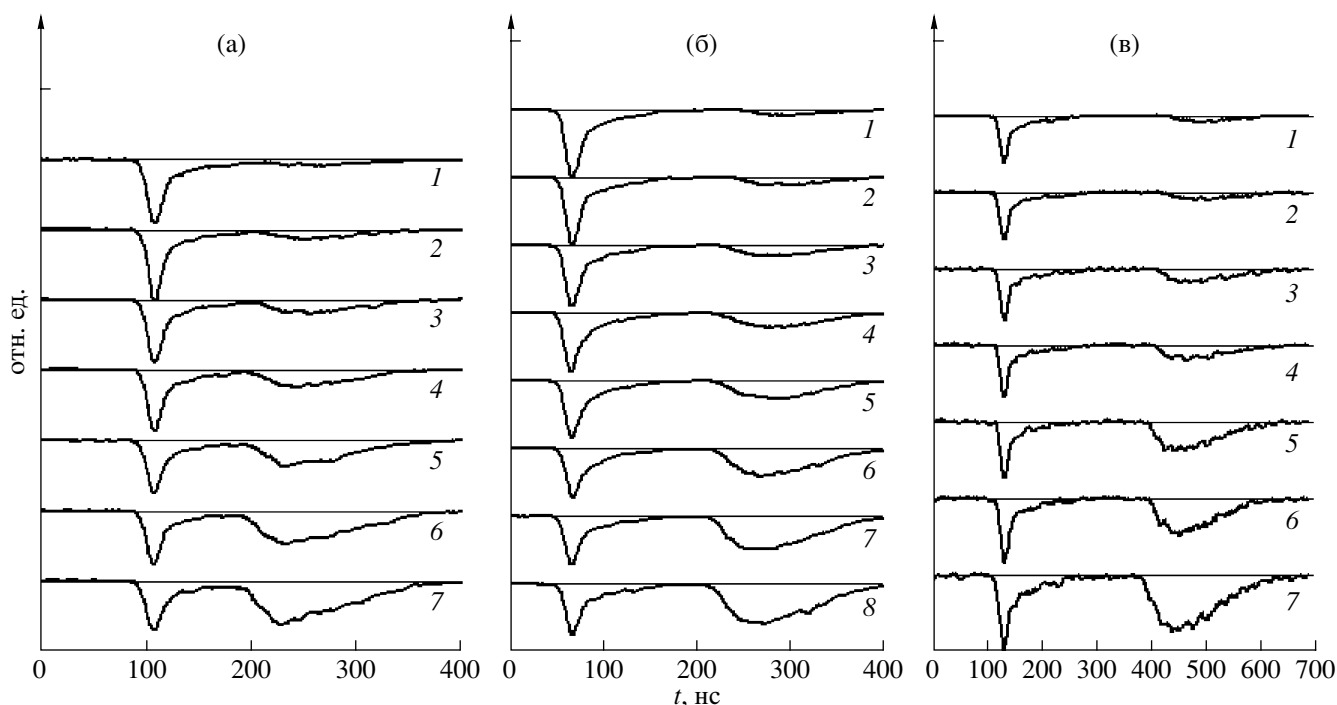


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока ФЭУ при различных параметрах разряда и межэлектродных расстояниях, система электродов игла-сфера:

7 мм – а) 1 – $U = 7.2$ кВ, $I_{cp} = 6$ мкА; 2 – $U = 7.8$ кВ, $I_{cp} = 8$ мкА; 3 – $U = 8.1$ кВ, $I_{cp} = 12$ мкА; 4 – $U = 8.4$ кВ, $I_{cp} = 16$ мкА; 5 – $U = 9$ кВ, $I_{cp} = 20$ мкА; 6 – $U = 9.3$ кВ, $I_{cp} = 25$ мкА; 7 – $U = 9.6$ кВ; $I_{cp} = 34$ мкА;

10 мм – б) 1 – $U = 10.1$ кВ, $I_{cp} = 3$ мкА; 2 – $U = 10.8$ кВ, $I_{cp} = 5$ мкА; 3 – $U = 11.6$ кВ, $I_{cp} = 8$ мкА; 4 – $U = 12$ кВ, $I_{cp} = 10$ мкА; 5 – $U = 12.4$ кВ, $I_{cp} = 14$ мкА; 6 – $U = 12.8$ кВ, $I_{cp} = 20$ мкА; 7 – $U = 12.9$ кВ; $I_{cp} = 25$ мкА; 8 – $U = 13$ кВ, $I_{cp} = 31$ мкА;

15 мм – в) 1 – $U = 15$ кВ, $I_{cp} = 6$ мкА; 2 – $U = 15.3$ кВ, $I_{cp} = 8$ мкА; 3 – $U = 15.9$ кВ, $I_{cp} = 12$ мкА; 4 – $U = 16$ кВ, $I_{cp} = 14$ мкА; 5 – $U = 16.5$ кВ, $I_{cp} = 20$ мкА; 6 – $U = 16.6$ кВ, $I_{cp} = 25$ мкА; 7 – $U = 17$ кВ, $I_{cp} = 34$ мкА.

Как видно из осциллограмм, минимальная временная задержка между началом импульса излучения у катода и началом импульса излучения у анода имеет место при межэлектродном расстоянии 7 мм, и уменьшается с увеличением напряжения, до величины 106 нс при напряжении 9.6 кВ. Максимальная временная задержка, полученная в эксперименте, составляет 320 нс. при межэлектродном расстоянии 15 мм и напряжении 15 кВ.

Характер изменений амплитуды импульсов тока ФЭУ 36, связанных с импульсами излучения у катода, повторяет изменения импульсов разрядного тока: с увеличением амплитуды импульсов Тричела амплитуда импульсов тока ФЭУ 36, соответствующих импульсам излучения у катода, увеличивается. Амплитуда импульсов тока ФЭУ 36, связанных со вспышками излучения у анода монотонно возрастает с ростом среднего тока разряда, для всех межэлектродных расстояний, при этом длительность импульса излучения из прианодной области также увеличивается с ростом среднего разрядного тока.

В данных экспериментальных условиях, амплитуда импульсов Тричела ведет себя немоно-

тонно. При межэлектродных расстояниях 7 мм и 10 мм она уменьшается с увеличением напряжения, тогда как для межэлектродного расстояния 15 мм амплитуда импульса тока незначительно возрастает. Это несоответствие может быть связано с использованием электродной системы “игла-сфера”.

Характер изменений интенсивности излучения в прикатодной и прианодной областях с увеличением напряжения можно проследить при регистрации излучения разряда за время, значительно превышающее период следования импульсов Тричела. Регистрация излучения в видимой части спектра из всего разрядного промежутка осуществлялась цифровым фотоаппаратом Olympus C7070, при фиксированной диафрагме с различными выдержками от 0.002 до 120 с.

На рис. 5 представлены фотографии отрицательной короны в воздухе в системе электродов игла-сфера с межэлектродным расстоянием 10 мм, при различных токах разряда. Величина среднего тока разряда менялась от 5 до 32 микроампер. Фотографии на рис. 5 сделаны с разными выдержками, при этом за время съемки каждого

кадра фиксировалось примерно одинаковое количество световых вспышек, т.е. отношение величины выдержки к периоду следования импульсов Тричела сохранялось постоянным для всех снимков.

Приведенные фотографии свидетельствуют о том, что интенсивность излучения из прикатодной области с уменьшением амплитуды импульса Тричела уменьшается, тогда как у анода интенсивность излучения увеличивается и увеличивается размер светящейся области. Это полностью подтверждает данные, полученные с помощью ФЭУ. Действительно, как видно на осциллограммах рис.4.б амплитуда импульса тока ФЭУ, соответствующего импульсу излучения из прикатодной области, уменьшается с ростом разрядного тока. В то время как амплитуда второго импульса увеличивается.

В результате экспериментов также определен спектральный состав излучения из прикатодной и прианодной областей в диапазоне длин волн 300–400 нм. Анализ излучения осуществлялся с использованием монохроматора МДР12У, ФЭУ 106, АЦП Velleman PCS 500, PC IBM и пакета прикладных программ PC-Lab2000. Сравнение полученных спектров со спектрами приведенными в [9] позволило сделать вывод о том, что в спектрах излучения присутствуют длины волн соответствующие второй положительной системе N_2 – переход между электронно-возбужденными состояниями N_2 из состояния $C^3\Pi_u$ в состояние $B^3\Pi_g$. Точный расчет спектральных линий с учетом колебательного возбуждения электронных уровней производился с использованием справочных констант [10] для линий излучения молекулярных спектров и возбужденных состояний атомов и молекул. Вычислены энергия возможных колебательных уровней молекулы азота в состоянии $C^3\Pi_u$ и энергия десяти нижних колебательных уровней состояния $B^3\Pi_g$. После чего производился расчет всех возможных переходов из $C^3\Pi_u$ в $B^3\Pi_g$. Расчет спектральных линий с учетом колебательного возбуждения электронных уровней и с использованием справочных констант, позволил детализировать и расшифровать спектр излучения разряда в диапазоне длин волн 300–400 нм. На рис.6–7, приведены спектры излучения из прикатодной и прианодной областей разряда отрицательной полярности в режиме импульсов Тричела.

В результате расшифровки спектров с использованием справочных констант сделан вывод о том, что полученные спектры излучения являются спектрами излучения второй положительной системы молекулярного азота (переход $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$). Отмечено, что спектр излучения прианодной об-

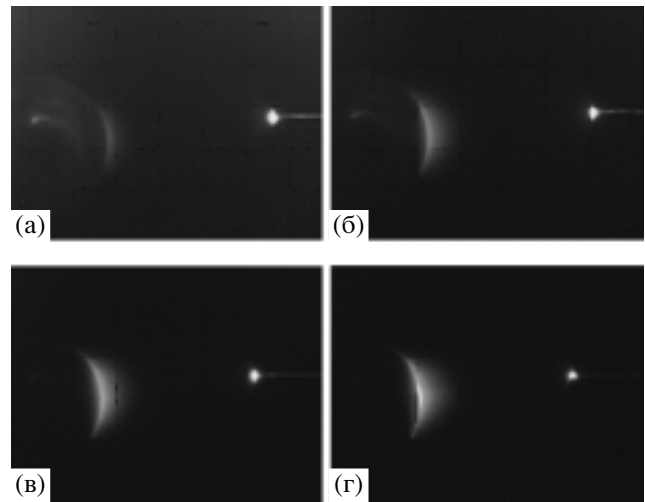


Рис. 5. Фотографии отрицательной короны в воздухе в системе электродов игла-сфера с межэлектродным расстоянием 10 мм. а) разрядный ток – 5 мкА, период следования импульсов 16 мкс, выдержка 120 с; б) разрядный ток – 10 мкА, период следования импульсов 7 мкс, выдержка 60 с; в) разрядный ток – 18 мкА период следования импульсов 3.1 мкс, выдержка 30 с; г) разрядный ток – 31 мкА период следования импульсов 1.6 мкс, выдержка 15 с.

ласти в диапазоне длин волн 300–400 нм повторяет спектр излучения прикатодной области разряда, а отношение интенсивностей в спектре излучения прикатодной области отличается от отношения интенсивностей в спектре излучения прианодной области разряда.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования отрицательного коронного разряда, в режиме импульсов Тричела, для электродных геометрий типа “игла-плоскость” и “игла-сфера” показали, что при фиксированных параметрах разряда (напряжение, средний ток разряда, межэлектродное расстояние) в электродной геометрии “игла-плоскость” излучение в области анода не наблюдается, в отличие от электродной геометрии “игла-сфера”. Такое изменение электродной конфигурации слабо изменяет вакуумное распределение электрического поля, но несмотря на небольшие отличия в вакуумном распределении электрического поля, при атмосферном давлении для разряда в электродной геометрии “игла-сфера” (при $R \sim d$), можно наблюдать свечение и в прианодной области.

Данные, полученные с помощью ФЭУ и фотографии отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в системе электродов “игла-сфера”, показали существование в разрядном промежутке двух ярко выраженных областей свечения.

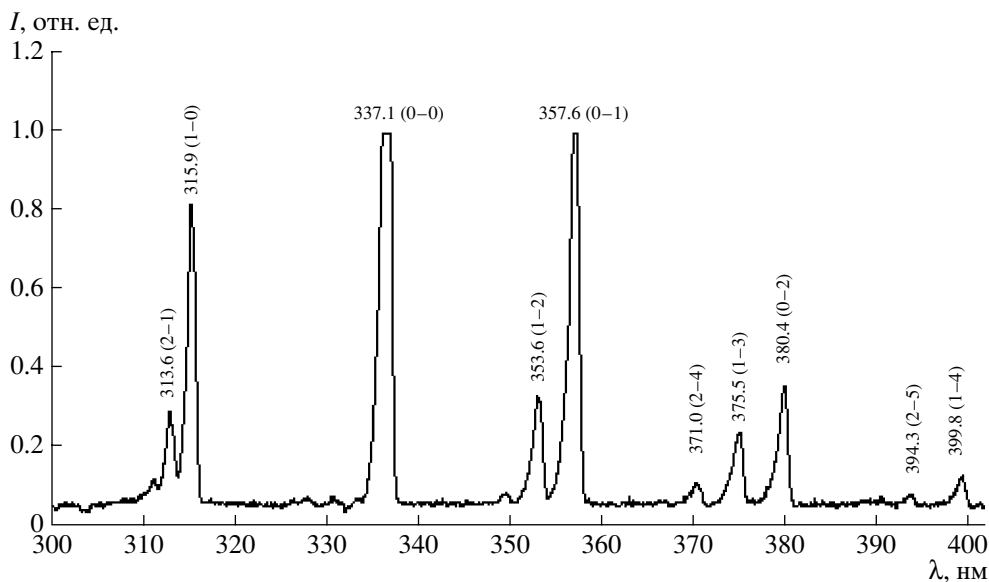


Рис. 6. Спектр излучения прикатодной области разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела. Электродная система “игла-сфера”. Межэлектродное расстояние $d = 15$ мм, напряжение $U = 17$ кВ, период следования токовых импульсов $T = 2.5$ мкс.

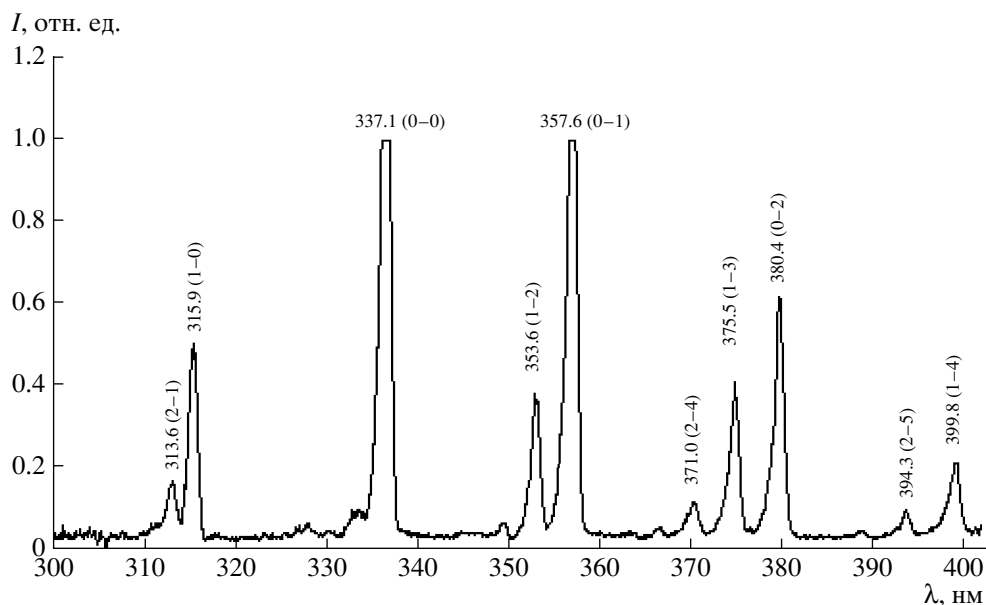


Рис. 7. Спектр излучения прианодной области разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела. Электродная система “игла-сфера”. Межэлектродное расстояние $d = 15$ мм, напряжение $U = 17$ кВ, период следования токовых импульсов $T = 2.5$ мкс.

Свечение в области острейшего катода возникает одновременно с началом импульса разрядного тока, и изменение интенсивности свечения коррелирует с изменением амплитуды импульса Тричела. Свечение в прианодной области начинается спустя некоторое время после начала импульса Тричела, его интенсивность возрастает с увеличени-

ем разрядного тока. Величина временной задержки между началом импульса Тричела и началом вспышки излучения из прианодной области увеличивается с увеличением межэлектродного расстояния и уменьшается с ростом величины приложенного напряжения. При фиксированных внешних параметрах (приложенное напряжение,

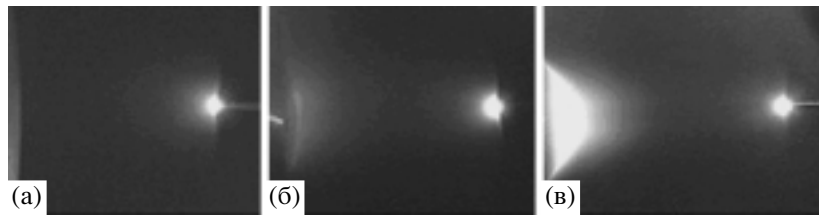


Рис. 8. Фотографии отрицательной короны в воздухе для различных электродных систем. В качестве плоскости использованы, выполненные из нержавеющей стали диск диаметром 28 мм, усеченный конус с углом при вершине 150° и диаметрами у вершины и основания 5 мм и 34 мм соответственно. Межэлектродное расстояние 15 мм. Фотографии сделаны с выдержкой 120 сек. а) игла-плоскость, средний ток разряда 43 мкА; б) игла-усеченный конус, ток 48 мкА, в) игла-сфера ток 48 мкА.

величина межэлектродного расстояния) свечение у анода начинается всегда с одной и той же временной задержкой по отношению к импульсу Тричела, что указывает на взаимосвязь между этими явлениями.

Анализ спектрального состава излучения прикатодной и прианодной областей разряда, в диапазоне длин волн 300–400 нм, позволил сделать вывод о том, что в полученных спектрах излучения присутствуют линии второй положительной системы азота (переход $C^3P_u - B^3P_g$). Расшифрованный спектр излучения прианодной области в диапазоне длин волн 300–400 нм повторяет спектр излучения прикатодной области разряда, а отношение интенсивностей в спектре излучения прикатодной области отличается от отношения интенсивностей в спектре излучения прианодной области разряда. Различия в соотношении амплитуд переходов для излучения из прианодной и прикатодной областей, может быть связано с различием механизмов набора энергии электронами. Видно, что в прикатодной области верхние колебательные уровни состояния C^3P_u заселены больше, чем в прианодной, а верхние колебательные уровни состояния B^3P_g наоборот больше заселены в прианодной области.

Необходимо также отметить, что пространственный характер излучения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела, существенно зависит от формы и размера анода, что явно иллюстрируют приведенные на рис. 8 фотографии разряда.

Ограничение сечения токового канала приводит к увеличению интенсивности области анодного свечения.

Для того чтобы определить физический механизм, ответственный за причинную взаимосвязь между формированием импульса тричела и процессами, сопровождающимися излучением в прианодной области разряда необходимо провести дополнительные исследования природы возникновения излучения в прианодной области с ис-

пользованием более чувствительных приемников излучения.

5. ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в электродной геометрии “игла-сфера”, выявлено две области излучения. Наряду с существованием общеизвестной области излучения вблизи острого электрода, показано наличие прианодной области излучения. Установлено, что интенсивность излучения из прианодной области существенно зависит от формы анода.

Определен спектральный состав излучения прикатодной и прианодной областей разряда в диапазоне длин волн 300–400 нм. Полученные спектры идентифицированы как спектры излучения второй положительной системы азота (переход $C^3P_u - B^3P_g$). В результате расшифровки спектров, отмечено, что спектр излучения прианодной области в диапазоне длин волн 300–400 нм повторяет спектр излучения прикатодной области разряда. Отношение относительных интенсивностей в спектре излучения прикатодной области отличается от отношения интенсивностей в спектре излучения прианодной области разряда.

Экспериментально показано, что существование области излучения вблизи анода так же является следствием процессов протекающих у катода, поскольку при фиксированных внешних параметрах (приложенное напряжение, величина межэлектродного расстояния) существует всегда и с одной и той же временной задержкой по отношению к импульсу Тричела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trichel G.W.* // *Phys.Rev.* 1938. V 54. P. 1078.
2. *Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И.* // *Физика плазмы.* 2001. Т. 27. С. 550.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 592 с.
4. Zentner R S. // Z. Angew Phys. 1970. V. 29. P. 294–301.
5. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В. и др. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. С. 998.
6. Morrow R. // Phys. Rev. A. 1985. V. 32. P. 1799.
7. Morrow R. // Phys. Rev. A. 1985. V. 32. P. 3821.
8. Napartovich A. P., Akishev Yu. S., Deryugin A.A. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 2726.
9. Pearse R.W.B., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. Chapman and Hall, London, 1976.
10. Смирнов Б.М., Яценко А.С. Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, Вып. 15. 1989. С. 93.