

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСОВ ТРИЧЕЛА В ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ «ИГЛА-ПЛОСКОСТЬ»

О.В. Болотов, В.И. Голота, В.Н. Остроушко, Г.В. Таран

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: bolotov@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в воздухе. Восстановлена пространственно-временная структура излучения в дрейфовой зоне разряда для электродной системы «игла-плоскость» при межэлектродном расстоянии 10 мм. Показано, что в дрейфовой зоне разрядного промежутка распространяется волна возмущения, сопровождающаяся излучением в оптическом диапазоне. Средняя скорость распространения волны возмущения $\sim 8 \cdot 10^4$ м/с. Выполнено численное моделирование сопутствующих процессов кинетики зарядов. Предложено объяснение результатов экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время плазмохимические технологии приобретают широкое распространение во всем мире. Одним из перспективных процессов для плазмохимических технологий является использование отрицательной короны в резко неоднородном электрическом поле. В некотором интервале напряжений, начиная от напряжения зажигания разряда и до напряжения перехода разряда в диффузную стадию, разрядный ток представляет собой установившуюся последовательность импульсов, получивших название импульсов Тричела [1]. Известно, что в коронных разрядах постоянного тока протекание активных плазмохимических реакций, связанных с диссоциацией и ионизацией газа, сосредоточено в малом объеме около коронирующего электрода (генерационная зона разряда) [2]. В другой области разрядного промежутка (зона дрейфа) происходит перенос тока тяжелыми ионами с незначительными ионизационными процессами, сопровождающимися излучением.

Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения из генерационной зоны разряда при низких давлениях были проведены в работе [3]. В той же работе на основании полученных данных показан механизм формирования импульса Тричела. В работах [4, 5] было показано, что в системе электродов «игла-сфера» наблюдаются две области свечения: прикаточная и прианодная. Этот результат показал наличие процесса переноса излучения в зоне дрейфа. В работах [4, 8] экспериментально было показано, что существование области излучения вблизи анода также является следствием процессов, протекающих у катода. Среди немногочисленных исследований процессов в зоне дрейфа стоит отметить работу [6], в которой проведены измерения пространственно-временной структуры плотности объемного заряда в отрицательной короне в режиме импульсов Тричела. В указанной работе авторы применяли метод измерения плотности объемного заряда с использованием специальных емкостных датчиков. В работе было установлено, что в разрядном промежутке формиру-

ется и распространяется волна плотности объемного заряда, а средняя скорость движения фронта волны составляет величину порядка $\sim 10^4$ м/с. Авторы работы [7] исследовали пространственно-временную структуру излучения отрицательной короны в воздухе с применением метода кросс-корреляционной спектроскопии. В результате исследований была восстановлена пространственно-временная структура излучения (на длине волны в УФ-диапазоне $\lambda = 337,1$ нм) коронного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Однако авторы ограничились исследованием только прикаточной области ~ 1 мм от игольчатого катода.

В настоящей работе предложен метод исследования пространственно-временной структуры излучения в зоне дрейфа с применением чувствительных высокоскоростных ФЭУ с высокочастотным усилителем сигнала и системы колиматорных щелей. Данный метод позволяет регистрировать световые вспышки малой интенсивности. Использование в данном методе узкой поперечной передвижной щели позволяет восстановить пространственную структуру излучения.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты по исследованию характеристик излучения отрицательной короны в нестационарной стадии горения проводились на установке, схематически изображенной на Рис. 1.

Для инициирования горения разряда использовался регулируемый стабилизированный источник высокого напряжения с $U_{\max} = 30$ кВ. Напряжение на разрядном промежутке измерялось киловольтметром. Средний ток разряда измерялся с помощью микроамперметра. Для стабилизации постоянного напряжения на разрядном промежутке в электрическую цепь включался высоковольтный конденсатор 6 емкостью 2200 пФ. В экспериментах использовалась электродная система «игла-плоскость». Катод представлял собой медную иглу длиной 10 мм с поперечным сечением ~ 1 мм. Анод выполнен из нержавеющей стали в форме диска диаметром 25 мм. Разряд исследовался при значении межэлектродного расстояния 10 мм.

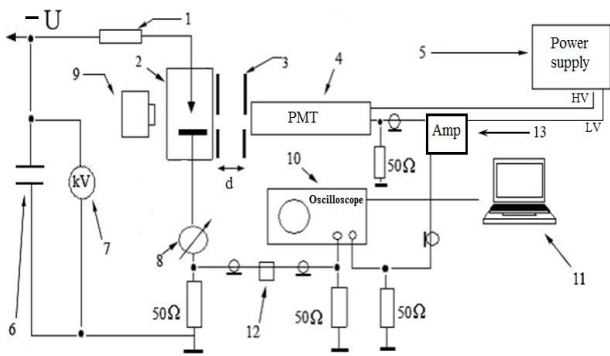


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – балластный резистор $R=130$ кОм; 2 – разрядная камера; 3 – передвижная щель; 4 – ФЭУ-Hamamatsu R9110; 5 – модульный высоковольтный источник питания для ФЭУ; 6 – емкостной фильтр напряжения номиналом $C=2200$ пФ; 7 – киловольтметр С196; 8 – микроамперметр М906; 9 – фотоаппарат Olympus С 7070; 10 – осциллограф Tektronix TDS-2024В; 11 – компьютер IBM PC; 12 – линия задержки; 13 – широкополосный усилитель сигнала Hamamatsu M8879

Временные характеристики излучения из выделенных областей разрядного промежутка исследовались с помощью скоростного ФЭУ со следующими характеристиками: полоса спектральной чувствительности 185...900 нм, чувствительность по фотокатоду 525 мкА/лм, время нарастания фронта импульса сигнала $\tau_{\Gamma}=2,2$ нс.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально установлено, что в отрицательном коронном разряде при атмосферном давлении в электродной системе «игла-плоскость» свечение разряда заполняет весь разрядный промежуток. При горении разряда в режиме токовых импульсов Тричела формируется волна плотности объемного заряда, которая формируется в момент развития импульса Тричела и распространяется вдоль оси разряда. При этом формируется импульс излучения из прикатодной области, после чего формируется и распространяется волна свечения в дрейфовой зоне разрядного промежутка, связанная с распространением волны плотности объемного заряда. На Рис. 2 представлена фотография разряда (выдержка $\tau=120$ с) с наглядным сопоставлением излучающих областей разряда с осциллограммами единичных импульсов излучения, зарегистрированных ФЭУ в различные моменты времени, относительно фронта токового импульса Тричела.

Экспериментально показано, что свечение в прикатодной области (на расстоянии $\sim 0,5$ мм от поверхности катода) возникает одновременно с началом импульса разрядного тока. Исследования токовых характеристик разряда проведены в режиме импульсов Тричела. В этом режиме при увеличении напряжения на разрядном промежутке амплитуда импульсов тока разряда уменьшается, а частота следования токовых импульсов растет. Одновременно наблюдается уменьшение амплитуды импульсов излучения из области игольчатого катода.

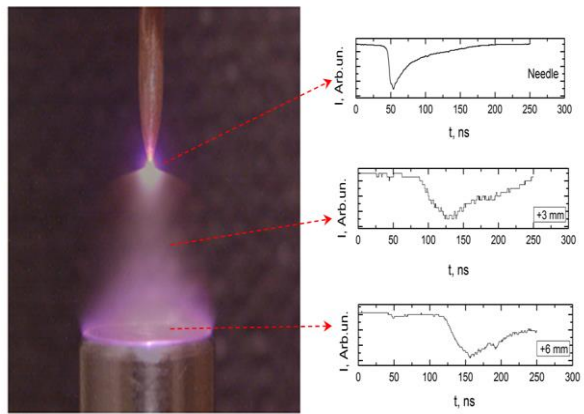


Рис. 2. Иллюстрация горения отрицательного коронного разряда в электродной системе «игла-плоскость» в воздухе при атмосферном давлении. Режим импульсов Тричела. Напряжение на разрядном промежутке $U=10,5$ кВ, $I_{cp}=100$ мкА. На рисунке стрелками сопоставлены излучающие области разряда с зарегистрированными ФЭУ-импульсами излучения. Длительность выдержки $\tau=120$ с

Характерная длительность импульсов излучения из прикатодной области ~ 200 нс, что соизмеримо с длительностью импульса Тричела. При увеличении приложенного напряжения длительность импульсов незначительно уменьшается, при этом форма импульсов практически не меняется. Исследование динамики излучения из дрейфовой области разряда показало, что в разрядном промежутке распространяется волна возмущения, сопровождающаяся излучением. Используя систему узких (порядка 1 мм) передвижных щелей, возможно отследить динамику излучения в разрядном промежутке и восстановить пространственно-временную структуру излучения. Ниже, на Рис. 3, приведена иллюстрация зарегистрированной пространственно-временной структуры излучения разряда при горении в режиме импульсов Тричела для межэлектродного расстояния 10 мм.

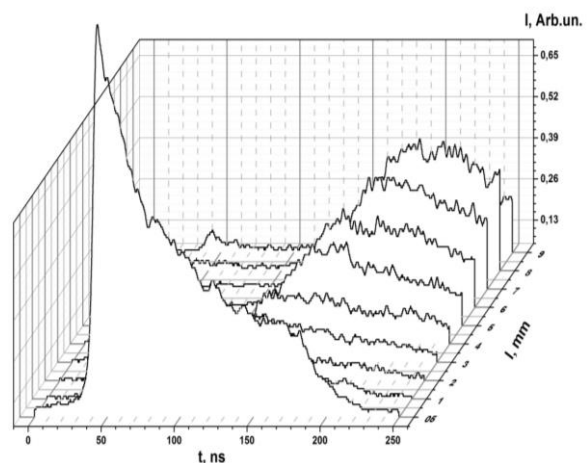


Рис. 3. Пространственно-временная структура излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела. Напряжение на разрядном промежутке $U=14,7$ кВ, средний ток разряда $I_{cp}=108$ мкА. Межэлектродное расстояние 10 мм. L (мм) – расстояние от поверхности игольчатого катода

Из Рис. 3 видно, что при средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля ~ 15 кВ/см и среднем токе разряда ~ 100 мкА интенсивность излучения в выделенных областях дрейфовой зоны монотонно возрастает. Это соответствует продвижению фронта волны вглубь разрядного промежутка по направлению к аноду. В ходе экспериментов определение скорости распространения волны возмущения в разрядном промежутке производилось путем обработки осциллограмм импульсов тока ФЭУ, соответствующих световым импульсам из выделенных участков разрядного промежутка, и импульсов тока разряда. Запуск сигнала с ФЭУ был синхронизован с фронтом токового импульса Тричела.

При межэлектродном расстоянии 10 мм скорость распространения волны возмущения на участке от 1 до 5 мм изменяется слабо – от $4 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^4$ м/с, и достигает значения $9 \cdot 10^4$ м/с на расстоянии 1 мм от поверхности анода. Следует отметить, что измеренная величина скорости распространения волны возмущения оказалась в одном порядке с величиной скорости волны плотности объемного заряда по результатам работы [6]. Можно предположить, что излучение из дрейфовой зоны является следствием процессов, протекающих у катода, и связано с малоинтенсивными актами ионизации и возбуждения, которые осуществляют электроны, дрейфуя к аноду, образуящиеся вблизи катода-острия во время развития импульса Тричела.

Для уточнения приведенных экспериментальных результатов и оценок было проведено численное моделирование разрядного процесса в предположении осевой симметрии для объема, ограниченного вытянутым эллипсоидом вращения и электродами – с софокусными гиперболами вращения. Детальное изложение модели авторами приведено в работе [8]. Движения электронов, положительных и отрицательных ионов рассматривались в диффузионно-дрейфовом приближении, а электрическое поле – как электростатическое. Распределение концентраций заряженных частиц изменялось в реакциях ионизации, прилипания, отлипания, ион-ионной и электрон-ионной рекомбинациях, начиная с малых величин концентраций. Для частиц на поверхности электродов-гиперболоидов было наложено условие отсутствия эмиссии ионов с электродов. Эмиссия электронов с катода пропорциональна дрейфовому потоку положительных ионов на катод. Также выполнено условие отсутствия диффузионных потоков электронов и ионов на электроды. С боковой, эллипсоидальной, поверхности частицы удалялись из объема. Задавались потенциалы электродов-гиперболоидов, электрическое поле рассчитывалось в бесконечном объеме между гиперболами при отсутствии зарядов вне эллипсоида. На Рис. 4 показаны результаты расчетов и продвижение от катода к аноду электронов, образованных во время токового импульса Тричела. Приведены зависимости линейной концентрации электронов (количества электронов между двумя близкими гиперболами в расчете на единицу длины оси между ними) от координаты на оси через 15 нс.

Из приведенных на Рис. 4 зависимостей распределения концентрации электронов в различные моменты времени можно оценить скорость переноса заряда в разрядном промежутке. Так, для промежутка 10 мм средняя скорость переноса заряда электронным сгустком (волна плотности) составляет $\sim 7 \cdot 10^4$ м/с, что по порядку величины совпадает с результатами экспериментальных исследований.

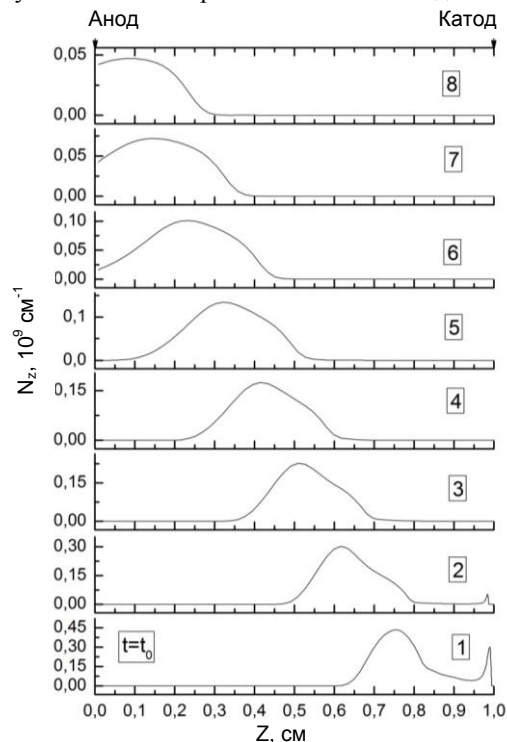


Рис. 4. Изменение распределения линейной концентрации электронов (интервал времени 15 нс). Межэлектродное расстояние 10 мм

Таким образом, в данных условиях источником излучения в дрейфовой зоне разрядного промежутка в основном являются акты ионизации и возбуждения молекул, осуществляемые электронами, образованными вблизи катода при формировании импульса тока и дрейфующими через промежуток в период времени между двумя последовательными токовыми импульсами Тричела. Важным остается вопрос о причинной взаимосвязи процессов, протекающих в генерационной зоне, и процессов формирования и распространения волны возмущения в дрейфовой зоне разрядного промежутка, что требует дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что в отрицательном коронном разряде в режиме токовых импульсов Тричела при атмосферном давлении в электродной системе «игла-плоскость» свечение разряда заполняет весь разрядный промежуток.

Восстановлена пространственно-временная структура излучения разряда.

Показано, что в дрейфовой зоне разрядного промежутка в электродной системе «игла-плоскость» распространяется волна возмущения, сопровождающаяся излучением. Средняя скорость распростра-

нения волны возмущения составляет величину $\sim 8 \cdot 10^4$ м/с.

Установлено, что интенсивность излучения монотонно возрастает при продвижении фронта волны вглубь разрядного промежутка по направлению к аноду.

Проведено численное моделирование разрядного процесса в предположении осевой симметрии. Получено распределение концентрации электронов в разрядном промежутке 10 мм в различные моменты времени с шагом 15 нс.

По результатам численного моделирования дана оценка скорости переноса заряда в разрядном промежутке. Для промежутка 10 мм средняя скорость переноса заряда электронами (волна плотности) составляет величину $\sim 7 \cdot 10^4$ м/с, что по порядку величины совпадает с результатами экспериментальных исследований.

Сделано предположение, что излучение из дрейфовой зоны является следствием процессов, протекающих у игольчатого катода во время формирования импульса Тричела, и связано с малоинтенсивными актами ионизации и возбуждения молекул газа, которые осуществляют электроны, дрейфуя к аноду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. G.W. Trichel. The mechanism of the negative point to plane corona near onset // *Phys. Rev.* 1938, v. 54, p. 1078.
2. Alexander Fridman / Plasma chemistry / 1024 pages / Cambridge University Press; 1 edition (May 5, 2008).
3. R. Zentner. Stufenimpulse der negativen. Koronaentladung elekirotechn // *Z. Agnew Phys.* 1970, v. 29, p. 294-301.
4. Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, О.В. Болотов, И.А. Пашенко, С.Г. Пугач, С.Н. Маньковский. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела // *Вестник Харьковского университета. Серия физическая «Ядра, частицы, поля»*. 2007, № 777, в. 2/34, с. 67-72.
5. В.И. Карась, В.И. Голота, О.В. Болотов, Б.Б. Кадолин, Д.В. Кудин. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела // *Физика плазмы. Серия «Низкотемпературная плазма»*. 2008, т. 34, № 10, с. 951-958.
6. K. Gupta, H. Ramachandran, and P.I. John. Spatio-temporal measurements of Trichel corona discharge using capacitive probe diagnostic // *Deepak Rev. Sci. Instrum.* 2000, v. 71, p. 406.
7. А. Морозов, К. Козлов, Н. Бокша, В. Самойлович. Пространственно-временная структура излучения отрицательной короны в воздухе // *Proc. 3 Int. Symp. on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, Plyos. Plyos, Russia.* 2002, v. 1, p. 125-128.
8. В.И. Карась, В.И. Голота, О.В. Болотов, Б.Б. Кадолин, В.Н. Остроушко. Излучение из дрейфовой зоны отрицательной короны в режиме импульсов Тричела // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2010, №4, с. 181-185.

Статья поступила в редакцию 13.11.2017

THE SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF RADIATION FROM THE NEGATIVE CORONA DISCHARGE AT THE TRICHEL PULSED MODE FOR THE "NEEDLE-PLANE" ELECTRODE SYSTEM

O.V. Bolotov, V.I. Golota, V.N. Ostroushko, G.V. Taran

The experimental results on the spatio-temporal characteristics of negative corona radiation in the Trichel pulsed mode are presented. The spatio-temporal structure of radiation in the drift zone of the discharge for the "needle-plane" electrode system for the distance between electrodes 10 mm was studied. It was shown, that the disturbance wave followed by radiation in the optical range propagates in the drift zone of the discharge gap. The average velocity of the disturbance wave propagation is about $\sim 8 \cdot 10^4$ m/s. The numerical modeling of the co-occurring charge kinetics was performed. Result explanation is offered.

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА СТРУКТУРА ВИПРОМІНЮВАННЯ НЕГАТИВНОЇ КОРОНИ В РЕЖИМІ ІМПУЛЬСІВ ТРИЧЕЛА В ЕЛЕКТРОДНІЙ СИСТЕМІ «ГОЛКА-ПЛОЩИНА»

О.В. Болотов, В.І. Голота, В.М. Остроушко, Г.В. Таран

Приведені результати експериментальних досліджень просторово-часових характеристик випромінювання негативної корони в режимі імпульсів Тричела в повітрі. Відтворена просторово-часова структура випромінювання в дрейфовій зоні розряду для електродної системи «голка-площина» при міжелектродній відстані 10 мм. Встановлено, що в дрейфовій зоні розрядного проміжку поширюється хвиля збурення, що супроводжується випромінюванням в оптичному діапазоні. Середня швидкість поширення хвилі збурення $\sim 8 \cdot 10^4$ м/с. Проведено чисельне моделювання процесів кінетики зарядів. Запропоновано пояснення результатів.