

УДК 533.521.

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

Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин, О.В. Болотов, И.А. Пашенко, С.Г. Пугач, С.Н. Маньковский

ИНЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины,

Украина, г. Харьков, 61108, ул. Академическая 1

E-mail: kodolin@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 26 марта 2007 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в воздухе. Наряду с существованием общеизвестной области излучения вблизи острейшего электрода, показано существование излучения из прианодной области. Изучены его особенности. Интенсивность излучения у анода зависит от формы анода. Излучение из каждой приэлектродной области носит импульсный характер. Импульс излучения из прикатодной области начинается одновременно с импульсом разрядного тока. Интенсивность излучения коррелирует с изменением амплитуды токового импульса Тричела. Излучение из прианодной области начинается с задержкой после начала импульса разрядного тока. Длительность временной задержки между импульсом разрядного тока и импульсом излучения из прианодной области зависит от длины разрядного промежутка и величины приложенного высоковольтного напряжения. Интенсивность излучения из прианодной области зависит только от величины приложенного к разрядному промежутку напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отрицательная корона, импульс Тричела, излучение, зона дрейфа, анодная область, волна возмущения, форма анода.

Исследования отрицательной короны не потеряли своей актуальности, поскольку современные представления о ней не позволяют построить замкнутую модель, которая находилась бы в удовлетворительном согласии с данными, наблюдаемыми в эксперименте. Отрицательная корона возникает в резко неоднородных электрических полях, характерных для электродных систем типа «игла–плоскость» при подаче на игольчатый электрод постоянного потенциала отрицательной полярности. В некотором интервале напряжений, начиная от напряжения зажигания, разрядный ток представляет собой последовательность импульсов получивших название импульсов Тричела [1]. С увеличением напряжения, амплитуда импульсов Тричела уменьшается, а частота следования импульсов увеличивается, и при определенном значении приложенного напряжения разряд переходит в диффузную стадию [2], характеризуемую протеканием постоянного тока через разрядный промежуток [3 с. 512].

При построении модели отрицательного коронного разряда, разрядный промежуток, условно разделяют на две области. Ярко светящаяся область разряда, расположенная непосредственно вблизи (до 1мм) коронирующего электрода, называется генерационной зоной коронного разряда. Генерационная зона характеризуется высокими значениями приведенной напряженности электрического поля, в которых происходит рождение заряженных частиц. Остальная часть разрядного промежутка называется зоной дрейфа. В этой части разрядного промежутка напряженность электрического поля недостаточна для ускорения частиц до энергий необходимых для ионизации и токоперенос осуществляется преимущественно отрицательно заряженными частицами, поступившими из генерационной зоны.

Экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик излучения из генерационной зоны разряда при низких давлениях были проведены в работе [4]. В той же работе на основании полученных данных, показан механизм формирования импульса Тричела.

Среди многих работ посвященных теоретическому анализу формирования импульсов Тричела можно выделить наиболее известную работу [5]. Численное моделирование отрицательного коронного разряда при малых токах, проведенное в работе [6], позволило воспроизвести последовательность импульсов Тричела в воздухе. При этом расчетные временные параметры отдельного импульса Тричела хорошо согласуются с экспериментальными данными, а период следования импульсов, полученный в результате моделирования, оказался большим по сравнению с экспериментальными данными. Расхождение между результатами экспериментов и численного моделирования, показывает необходимость в продолжении экспериментального изучения отрицательной короны и в особенности изучения процессов, протекающих в дрейфовой части разрядного промежутка.

Целью работы является экспериментальное исследование интегрального излучения отрицательной короны в воздухе.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе изучение пространственно-временных характеристик излучения отрицательной короны в воздухе проводилось на основе детектирования интегрального излучения из участков разрядного промежутка, расположенных непосредственно у катода и у анода. Исследования пространственно-временных характеристик излучения разряда проводились на стенде, схематически изображенном на рис. 1.

В экспериментах использовалась электродная система «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 расстояния составляла 7 мм, 10 мм, и 15 мм.

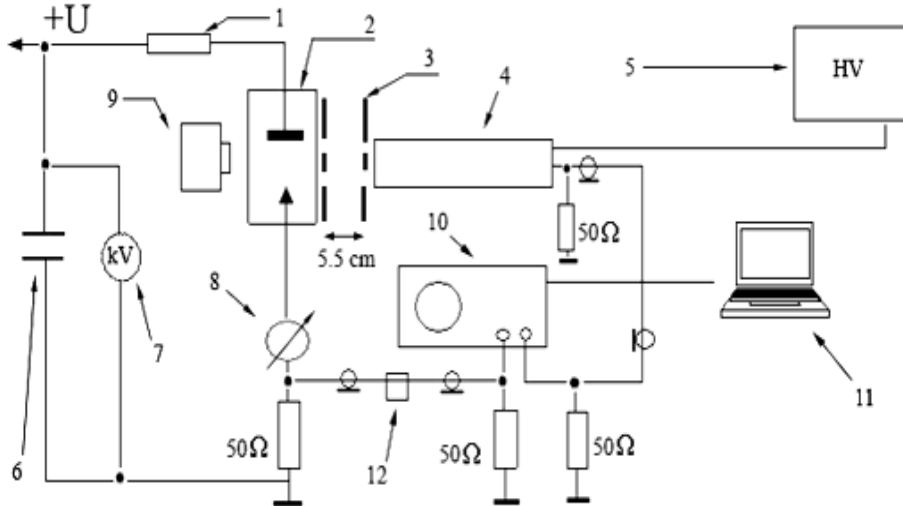


Рис.1. Схема экспериментального стенда.

1 – балластный резистор 130 кОм, 2 – разрядная ячейка, 3- щель, 4–ФЭУ 36, 5 – высоковольтный источник питания ФЭУ, 6 – емкостной фильтр напряжения 2200 пФ, 7– киловольтметр С196, 8 – микроамперметр М906, 9–фотоаппарат Olympus С 7070, 10 – осциллограф Tektronix TDS-210, 11-компьютер IBM PC, 12-линия задержки 38 нс.

жутка осуществлялась цифровым фотоаппаратом Olympus С7070, при фиксированной диафрагме с различными

выдержками от 0,002 до 120 секунд. Временная динамика излучения из выбранных областей разряда, регистрировалась с помощью ФЭУ 36 с временными параметрами: разброс времени пролета электронов по фотокатоду 2 нс, время нарастания импульса 3 нс. Область спектральной чувствительности ФЭУ 36 - 300-600 нм.

Выделение излучения из областей разрядного промежутка осуществлялось с помощью системы щелей. Щели были выполнены в виде двух непрозрачных экранов, разнесенных друг от друга на расстояние 55 мм, в каждом из которых были вырезаны по два окна размером 20x1 мм. Экраны располагались относительно разрядного

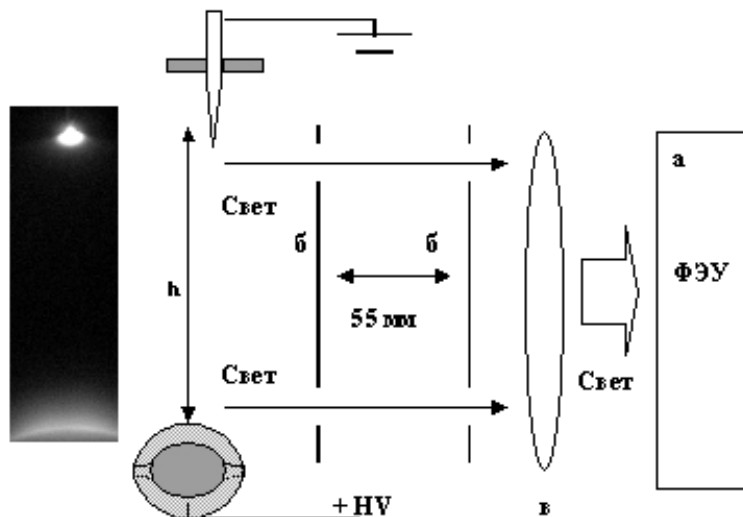


Рис.2. Фотография коронного разряда отрицательной полярности и упрощенная схема эксперимента.

h – межэлектродный промежуток, а - фотокатод ФЭУ 36,
б - щели, в - кварцевая линза.

промежутка и друг относительно друга так, что через систему щелей были видны только выбранные участки разрядного промежутка у анода и катода.

На рис. 2 приведена упрощенная схема эксперимента. Для синхронизации токового сигнала и сигнала ФЭУ 36 в цепь измерения разрядного тока вводилась линия задержки 38 нс, компенсирующая запаздывание сигнала ФЭУ 36, обусловленное временем пролета электронов через фотоэлектронный умножитель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе эксперимента одновременно фиксировались форма разрядного тока и сигналы ФЭУ 36, фотокатод которого освещался излучением из выбранных областей разрядного промежутка. На рис. 3 приведены типичная осциллограмма разрядного тока отрицательного короны в режиме импульсов Тричела (верхний луч) и синхронизованная с ней осциллограмма токового сигнала ФЭУ 36, (нижний луч).

Как видно из осциллограммы тока (верхний луч), ток разряда представляет собой установившуюся последовательность импульсов тока с характерной длительностью ~ 250 нс и периодом следования $\sim 2,2$ мкс. За время прохождения токового импульса Тричела, в разрядном промежутке происходит две световые вспышки, разнесенные между собой во времени. Пространственно эти световые вспышки так же разнесены, поскольку при экранировке щели, расположенной напротив катода на осциллограмме тока ФЭУ 36 исчезает первый максимум импульса, при экранировке щели, расположенной напротив анода, исчезает второй максимум импульса. Это указывает на то, что, первый максимум, на осциллограмме импульса тока ФЭУ 36 соответствует вспышке излучения у катода, второй максимум импульса соответствует вспышке излучения у анода. Начало вспышки излучения у катода происходит одновременно с началом импульса разрядного тока.

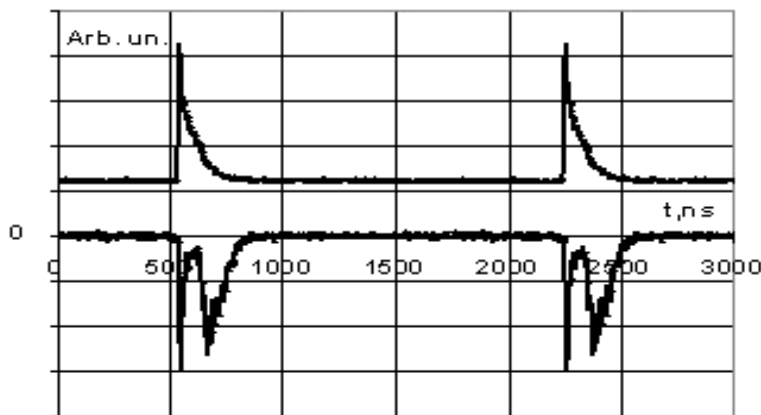


Рис. 3. Типичные осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и сигнала с ФЭУ 36 (нижний луч) для отрицательного коронного разряда в режиме импульсов Тричела. Межэлектродное расстояние 7 мм.

Первый импульс излучения имеет длительность значительно меньшую, чем длительность импульса Тричела, а длительность второго импульса излучения, порядка длительности импульса Тричела.

Далее на рис.4 представлены осциллограммы сигнала ФЭУ 36 соответствующие импульсам излучения из приэлектродных областей разряда отрицательной полярности в системе электродов игла-сфера. Осциллограммы приведены для различных межэлектродных расстояний (7 мм, 10 мм, 15 мм), и различных значений среднего тока разряда.

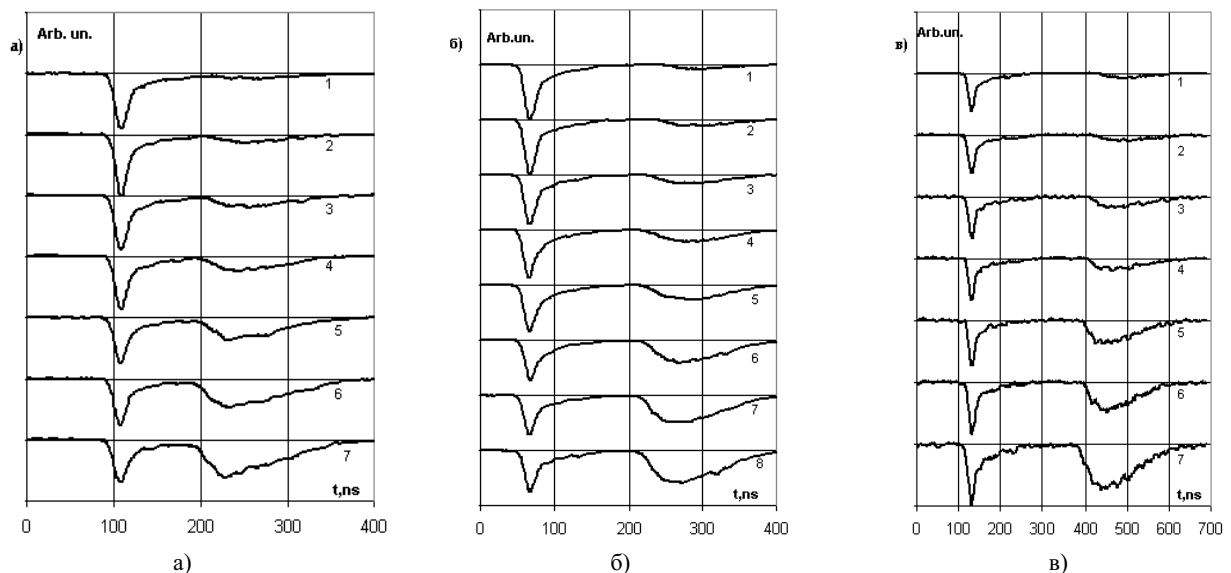


Рис. 4. Осциллограммы тока ФЭУ36, полученные в системе электродов игла-сфера для различных межэлектродных расстояний.

а) межэлектродное расстояние 7мм, кривая 1 - 6 мкА, 2 - 8 мкА, 3- 12 мкА, 4 - 16 мкА, 5-22 мкА, 6 - 25 мкА, 7 - 34 мкА;
б) межэлектродное расстояние 10мм, кривая 1 - 3 мкА, 2 - 5 мкА, 3- 8 мкА, 4 - 10 мкА, 5 - 14 мкА, 6 - 20 мкА, 7 - 25 мкА, 8 - 31 мкА;

в) межэлектродное расстояние 15мм, кривая 1 - 6 мкА, 2 - 8 мкА, 3- 12 мкА, 4 - 14 мкА, 5 - 20 мкА, 6 - 25 мкА, 7 - 31 мкА.

Как видно из осциллограмм, временная задержка между вспышками излучения у катода и анода зависит как от межэлектродного расстояния, так и от величины разрядного тока. Минимальная задержка имеет место при межэлектродном расстоянии 7 мм и уменьшается с ростом разрядного тока до величины 106 нс. Макси-

мальная временная задержка, полученная в эксперименте, составляет 320 нс. при межэлектродном расстоянии 15 мм и среднем токе разряда 6 мкА.

Анализ полученных осциллограмм позволяет сделать вывод, что характер изменений амплитуды импульсов тока ФЭУ 36, связанных со вспышками излучения у катода, повторяет изменения амплитуды импульсов разрядного тока: с увеличением амплитуды импульсов Тричела амплитуда импульсов тока ФЭУ 36, связанных со вспышками излучения у катода, увеличивается. В данных экспериментальных условиях, амплитуда импульсов Тричела ведет себя немонотонно: для межэлектродных расстояний 7 мм и 10 мм она уменьшается с ростом разрядного тока, тогда как для межэлектродного расстояния 15 мм она незначительно возрастает с увеличением среднего разрядного тока, что может быть, связано с использованием системы электродов, отличной от классической «игла–плоскость». Амплитуда импульсов тока ФЭУ 36, связанных со вспышками излучения у анода монотонно увеличивается с ростом среднего тока разряда, для всех межэлектродных расстояний. Длительность импульса излучения из прианодной области также увеличивается с ростом разрядного тока.

Характер изменений интенсивности излучения в прикатодной и прианодной областях с увеличением напряжения можно проследить при исследованиях излучения разряда за время регистрации, значительно превышающее период следования импульсов Тричела.

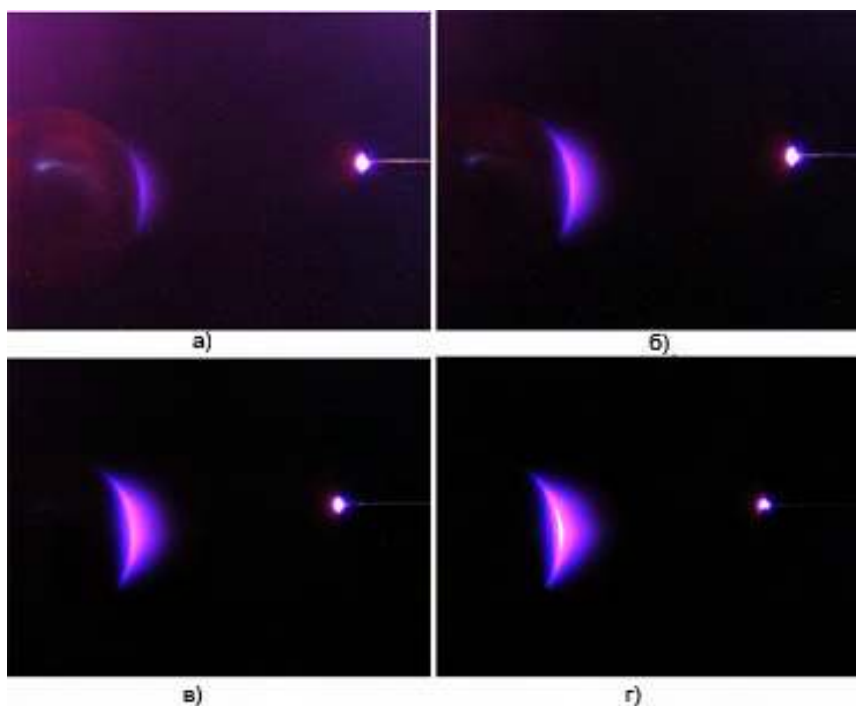


Рис.5. Фотографии отрицательной короны в воздухе в системе электродов игла-сфера с межэлектродным расстоянием 10 мм.

- 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.

стью подтверждает данные, полученные с помощью ФЭУ 36. Действительно, как видно на осциллограммах рис.4 б) амплитуда первого максимума импульса тока ФЭУ 36 с ростом разрядного тока уменьшается, а амплитуда второго максимума увеличивается.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные, полученные с помощью ФЭУ 36 и фотографии отрицательной короны в режиме импульсов Тричела в системе электродов игла – сфера, показали существование в разрядном промежутке двух ярко выраженных областей свечения: одна у катода, другая у анода. Свечение в области катода возникает одновременно с началом импульса разрядного тока, и изменение интенсивности свечения коррелирует с изменением амплитуды импульса Тричела. Свечение у анода начинается спустя некоторое время после начала импульса Тричела, его интенсивность возрастает с увеличением разрядного тока. Величина временной задержки между началом импульса Тричела и началом вспышки излучения у анода увеличивается с увеличением межэлектродного расстояния и уменьшается с ростом величины приложенного напряжения.

На рис.5 представлены фотоснимки 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, для того чтобы за время съемки каждого кадра фиксировалось примерно одинаковое количество световых вспышек, т.е. отношение величины выдержки к периоду следования импульсов Тричела сохранялось приблизительно 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 полно-

При фиксированных внешних параметрах (приложенное напряжение, 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. Учитывая зависимость временной задержки от межэлектродного расстояния и величины приложенного напряжения, можно предположить, что в области катода, в процессе формирования импульса тока, происходит формирование волны возмущения, которая распространяется в дрейфовой части разрядного промежутка от катода к аноду, и вызывает свечение в анодной области.

Из приведенных на рис. 4 осциллограмм можно найти среднюю по разрядному промежутку скорость распространения волны возмущения как отношение расстояния между излучающими зонами к величине временной задержки между импульсом излучения из области катода и импульсом излучения из анодной области. Зависимость оцененной скорости распространения волны возмущения от средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля приведена на рис. 6. Величина средней скорости распространения волны возмущения, оказалась в одном порядке со скоростью дрейфа электронов, и значительно превосходит скорость дрейфа ионов для данных значений U/h , где U - приложенное к разрядному промежутку напряжение V , h - величина межэлектродного расстояния, см.

Следует заметить, что величина скорости распространения волны может быть не постоянна вдоль разрядного промежутка и зависеть от локального значения величины напряженности электрического поля. Поэтому использование величины U/h , т.е. средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля, не совсем корректно, и локальные значения скорости распространения волны возмущения могут отличаться от вычисленных значений. Распределение напряженности электрического поля в разрядном промежутке зависит от выбора конкретной формы электродной системы.

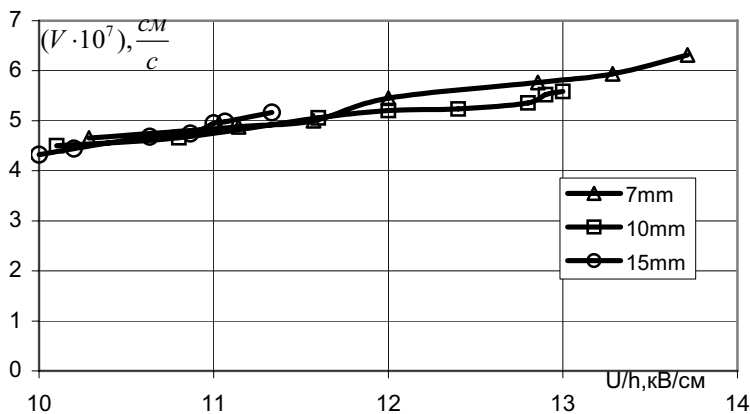


Рис.6. Вычисленная скорость распространения возмущения в зависимости от средней по разрядному промежутку напряженности электрического поля U/h для межэлектродных расстояний 7 мм, 10 мм, 15 мм.

воздухе для электродных систем «игла–плоскость» и «игла–усеченный конус», представлены на рис. 7. 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.

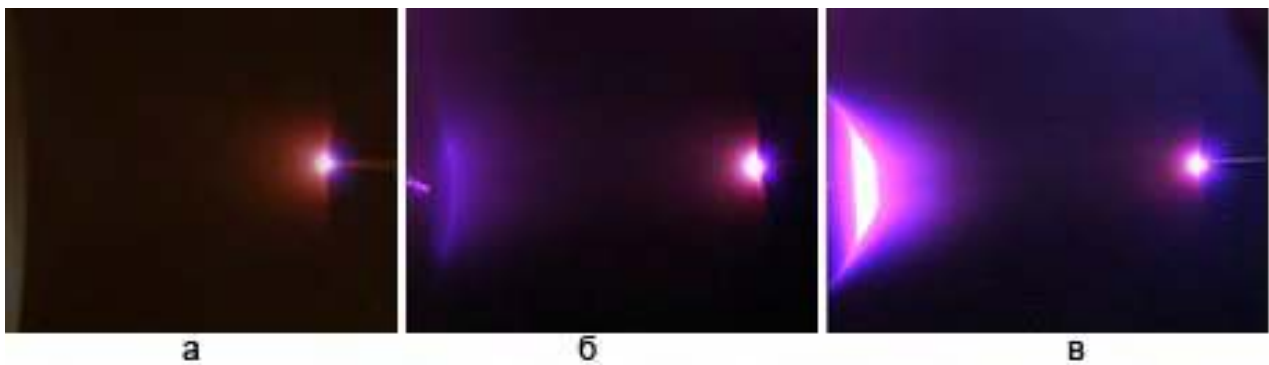


Рис.7. Фотографии отрицательной короны в воздухе для различных электродных систем.

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.

Сравнение фотографий на рис. 7 позволяет сделать вывод о том, что форма и размер анода существенно влияют на пространственный характер свечения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела. Ограничение сечения токового канала приводит к увеличению интенсивности области анодного свечения.

Для того, чтобы выяснить причинную связь между импульсом Тричела и процессами, происходящими в области анода необходимо провести дополнительные исследования с использованием более чувствительных приемников излучения, а также определить спектральный состав излучения.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований пространственно-временных характеристик интегрального излучения отрицательной короны в воздухе в режиме импульсов Тричела, выявлено две основные области излучения разряда - одна у катода, вторая у анода. Установлено, что интенсивность излучения из анодной области существенно зависит от формы анода. Свечение в прикатодной области возникает одновременно с импульсом разрядного тока, и его интенсивность коррелирует с амплитудой импульса Тричела. Существование свечения в этой области является следствием наличия свободных электронов и высокой напряженности электрического поля во время формирования импульса Тричела. Существование области излучения вблизи анода также 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.

С другой стороны для появления свечения необходимо наличие как заряженных частиц, так и повышенной напряженности электрического поля. Поэтому можно предположить, что одновременно с формированием импульса Тричела, у катода происходит формирования возмущения, которое распространяется в разрядном промежутке по направлению к аноду. Волна возмущения, достигая прианодной области, в которой напряженность электрического поля усилена объемными зарядами, вызывает свечение в этой части разрядного промежутка. Для подтверждения этого предположения необходимы дальнейшие исследования излучения из разрядного промежутка, с целью выявить источники излучения, связанные с распространением предполагаемой волны возмущения не только в приэлектродных областях, а также исследование спектральных характеристик излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trichel G.W. The mechanism of the negative point to plane corona near onset //Phys.Rev. – 1938. –V. 54. –P. 1078.
2. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте //Физика плазмы. – 2001. – Т. 27, № 6. – С. 550.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1987. – 592 с.
4. Zentner R. Stufenimpulse der negativen. Koronaentladung elekirotechn //Z. Agnew Phys. – 1970. –V. 29. – S. 294–301.
5. Morrow R. Theory of negative corona in oxygen //Phys.Rev.A. – 1985. – V. 32. – P. 1799–809.
6. Napartovich A.P., Akishev Yu. S., Deryugin A.A. et al. A numerical simulation of Trichel-pulse formation in a negative corona //J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – V. 30. – P. 2726.

PECULIARITIES OF RADIATION FROM NEGATIVE CORONA DISCHARGE UNDER TRICHEL PULSE MODE IN AIR

L.M. Zavada, B.B. Kadolin, O.V. Bolotov, I.A. Pacshenko, S.G. Pugach, S.N. Man'kovsky

NSC 'Kharkov Institute Physics and Technology' NAS of Ukraine.

E-mail: kodolin@kipt.kharkov.ua

Experimental results of space-time characteristics of negative corona discharge radiation in air under Trichel pulsed mode, are presented. It was shown, that negative corona discharge radiation concentrated near cathode and anode areas, and radiation intensity considerably depends on anode shape. Corona discharge radiation under Trichel pulsed mode has pulse character. At the same time the radiation pulse from the needle cathode area appears with current pulse simultaneously, but the radiation pulse from the anode area is formed with time delay to the beginning of the current pulse. The time duration between the beginning of the current pulse and the beginning of the radiation pulse, from the anode area, depends on applied voltage value and the distance between electrodes, however the amplitude relationship of radiation pulses depends on the applied voltage value only.

KEY WORDS: negative corona discharge, Trichel pulse, radiation, drift zone, anode area, perturbation wave, anode shape.