

# НЕСТАЦИОНАРНАЯ СТАДИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

*А.А. Бруев, В.И. Голота, Л.М. Завада, Б.Б. Кадолин,  
В.И. Карась, И.А. Пащенко, С.Г. Пугач*  
 ННЦ ХФТИ, Украина, Харьков-61108, ул. Академическая 1  
 e-mail: paschenko@kipt.kharkov.ua

Представлены результаты экспериментальных исследований нестационарного режима горения тлеющего разряда атмосферного давления при положительной полярности активного электрода.

## 1. Введение

Тлеющий разряд интенсивно изучается в связи с возможностью его применения для решения задач неравновесной плазмохимии, в частности, при создании генераторов озона. С этой точки зрения представляет интерес изучение динамики заряженных частиц в разрядном промежутке и выяснение ее влияния на кинетику образования активных радикалов в условиях тлеющего разряда. Обычно, при атмосферном давлении, тлеющий разряд существует в довольно узком диапазоне экспериментальных условий, среди которых основными являются ширина разрядного промежутка, секционирование электродов, выбор формы и материалов электродов, давление и расход газа через реактор. Следует отметить, что активный секционированный электрод (электрод, у которого поле резко неоднородно) собирается из отдельных электродных секций имеющих острый форму. Причем, радиус кривизны вершины электрода выбирается таким, что при подаче высоковольтного потенциала, обеспечивается достаточная степень ионизации в непосредственной близости от вершины острия.

Следует различать случаи положительной и отрицательной полярности высоковольтного потенциала на секционированном электроде, которые различаются динамикой и механизмами размножения заряженных частиц [1-3].

Если активный электрод является катодом, то происходит объемная ионизация в сильном поле у острия. Вторичным процессом служит эмиссия с катода и, возможно, фотоионизация в объеме газа. Если активный электрод является анодом (положительная полярность), то у удаленного катода напряженность электрического поля мала и ионизация газа происходит в основном у анода. При этом электроны быстро уходят на близко расположенный анод, а в объеме остаются ионы, которые медленно дрейфуют к катоду. Воспроизводство электронов обеспечивают вторичные фотопроцессы в газе в зоне острия [4].

Кроме различия в механизмах размножения заряженных частиц, связанных с полярностью активного электрода, существуют различия и в режимах протекания тока. При некоторых условиях он может иметь нестационарный характер, несмотря

на постоянство напряжения, и протекать в виде почти периодических токовых импульсов с частотами повторения  $\sim 10^4$  Гц при положительной полярности и  $\sim 10^6$  Гц при отрицательной [1-4].

Отсутствие удовлетворительной математической модели, описывающей нестационарное протекание тока в тлеющем разряде положительной полярности, стимулирует дальнейшие экспериментальные исследования этого режима газового разряда.

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования тлеющего разряда атмосферного давления в воздухе проводились для системы электродов типа "игла-плоскость" с положительным потенциалом на игле. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Катод изготавливался в виде плоской пластины из нержавеющей стали диаметром 70 мм. В качестве анода выбирались стержни из различных материалов с разными радиусами кривизны вершины. Расстояние между электродами  $h$  могло изменяться в пределах от 0 до 25 мм.

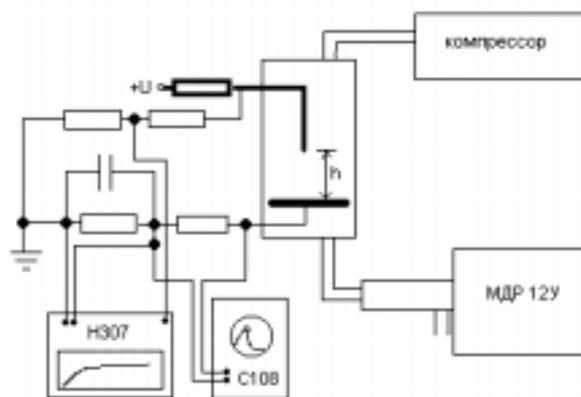


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Электродная система помещалась в герметичную камеру объемом 200 см<sup>3</sup>, через которую непрерывно прокачивался воздух, с целью поддержания одного и того же состава газовой смеси и для контроля концентрации озона, нарабатываемой разрядом. При этом использовался либо лабораторный, либо осушенный воздух.

Питание разряда осуществлялось от высоковольтного стабилизированного источника с

напряжением до 30 кВ, пульсации выходного напряжения не более  $10^{-2}$ . Внешняя электрическая цепь включала балластное сопротивление 2 МОм.

Экспериментальный стенд позволял контролировать напряжение на электродах  $U$  (киловольтметр С196), интегральный ток  $i$  (графопостроитель Н307) и мгновенные значения тока разряда (осциллограф С1-108). Причем, применялись различные измерительные схемы для исследования амплитудных значений токовых импульсов и уровня токового сигнала в промежутках между импульсами. Расход газовой смеси измерялся барабанным газосчетчиком ГСБ-400. Концентрация озона  $n_{O_3}$  измерялась по поглощению УФ-излучения ртутной лампы на длине волны 253,7 нм (монохроматор МДР-12У, ФЭУ39А).

### 3. Импульсная стадия тлеющего разряда положительной полярности

Как отмечалось выше, газовый разряд в электродной геометрии типа «игла-плоскость» при прикладывании положительного высоковольтного потенциала к игольчатому электроду, может существовать в двух режимах, отличающихся интенсивностью механизмов ионизации и динамикой заряженных частиц в разрядном промежутке. Это хорошо видно на вольтамперной характеристике (ВАХ) разряда по изменению зависимости среднего тока от напряжения, приложенного к электродам (рис. 2).

Начальный участок ВАХ – режим положительного коронного разряда, соответствует стационарному протеканию электрического тока через разрядный промежуток.

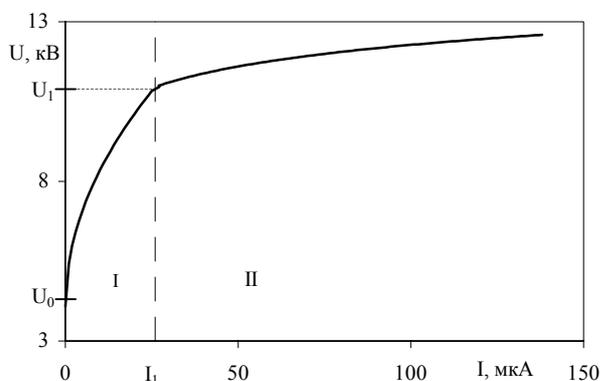


Рис. 2. Типичная ВАХ тлеющего разряда положительной полярности при атмосферном давлении. I – область постоянного тока, II – область нестационарного тока

При достижении напряжением на электродах некоторого значения  $U_1$ , которому соответствует среднее значение разрядного тока  $I_1$  (рис. 2), на осциллограммах на фоне постоянной составляющей тока появляются почти периодические импульсы с амплитудой превышающей постоянную составляющую в 100...1000 раз. Таким образом, в области значений справа от пунктирной линии на ВАХ (рис.2), реализуется нестационарная стадия

горения тлеющего разряда положительной полярности, характеризующаяся быстрым (экспоненциальным) ростом тока  $i$  и проявляющаяся в прохождении квазипериодических токовых импульсов через разрядный промежуток. Импульсный характер тока в этом режиме обусловлен следующими процессами. В результате ионизации газа в области с высокой напряженностью электрического поля и быстрого ухода электронов из этой области на анод в разрядном промежутке накапливается положительный объемный заряд. Собственное электрическое поле этого объемного заряда экранирует электрическое поле, приложенное к разрядному промежутку. Затем, положительные ионы медленно дрейфуют к катоду и объемный заряд уменьшается. Напряженность электрического поля в области острейшего электрода возрастает, и создаются условия для возобновления ионизации газа в непосредственной близости от острия и повторения процесса.

Для нестационарной стадии тлеющего разряда положительной полярности в воздухе при атмосферном давлении токовые импульсы имеют следующие характерные параметры: амплитуда импульсов тока  $A_i \sim 100$  мА, длительность  $\tau_{им} \sim 100$  нс, частота следования  $f_{сл} \sim 10^4$  Гц.

Характерная осциллограмма токовых импульсов представлена на рис.3.

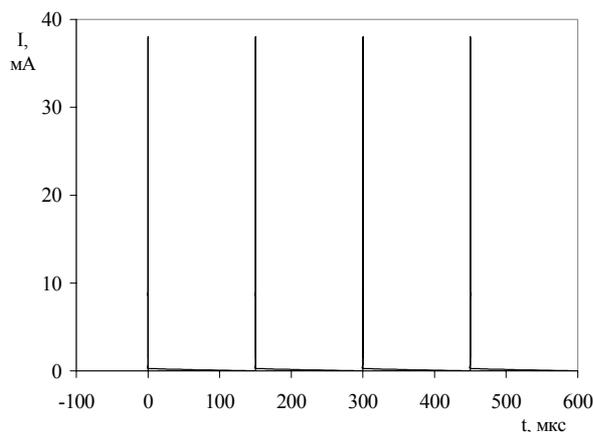


Рис. 3. Квазипериодические токовые импульсы при положительном потенциале на острие в воздухе

На этой стадии, свечение разряда наблюдается во всем промежутке и, также как и ток, имеет импульсный характер. Возникающий светящийся факел состоит из множества отдельных нитей, повторяющих геометрию силовых линий электрического поля в разрядном промежутке.

Экспериментально было обнаружено, что параметры токовых импульсов зависят от напряжения  $U$ , приложенного к электродам, и межэлектродного расстояния  $h$ .

На рис. 4 представлены редуцированные зависимости постоянной составляющей и усредненной импульсной составляющей тока для нестационарной стадии разряда, от средней

напряженности поля в разрядном промежутке  $U/h$ .

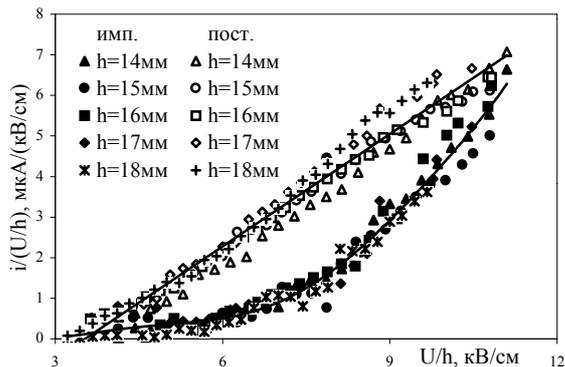


Рис. 4. Редуцированные зависимости постоянной и импульсной составляющих тока от  $U/h$  при различном межэлектродном зазоре  $h$

Видно, что во всем исследованном диапазоне межэлектродных расстояний, постоянная составляющая тока квадратично зависит от  $U/h$ , а зависимость усредненного импульсного тока может быть описана экспонентой. Различие в зависимостях импульсного и постоянного токов свидетельствует об "автономности" связанных с ними механизмов размножения заряженных частиц. Возможно, постоянная составляющая тока связана с процессами ионизации и лавинного размножения электронов в сильном поле возле анода, а токовые импульсы обусловлены стримерными и отлипательными процессами, происходящими на их фоне, и имеющими место во всем разрядном промежутке, за исключением прианодного слоя. Наличие постоянной составляющей тока свидетельствует о невозможности полной экранировки активного электрода объемным зарядом и запыряния промежутка.

Импульсный характер тока при постоянном питающем напряжении может быть вызван только образованием достаточно большого объемного заряда, а частота следования импульсов  $f_{cl}$  определяется временем его рассасывания. При положительной полярности напряжения на острейном электроде, время между импульсами  $\tau_{cl} \sim 100$  мкс и, следовательно, скорость рассасывания объемного заряда составляет  $v_3 \sim h/\tau_{cl} = 10^4$  см/с, что для реализующихся в эксперименте  $E/N$  соответствует дрейфовой ионной скорости.

Если принять во внимание тот факт, что небольшая область возле анода, благодаря большому электрическому полю, порядка  $U/r_{кр}$  ( $r_{кр}$  – радиус кривизны анода), ответственна за постоянную составляющую тока, а остальной промежуток является областью дрейфа ионов в электрическом поле порядка  $U/h$ , то можно построить зависимость дрейфовой скорости ионов  $v_{др}$  от средней напряженности электрического поля в разрядном промежутке, при различных межэлектродных расстояниях (рис. 5). Видно, что в области значений напряженности электрического поля, реализующихся в экспериментах, зависимость имеет линейный

характер, что свидетельствует о постоянстве усредненной по промежутку подвижности ионов.

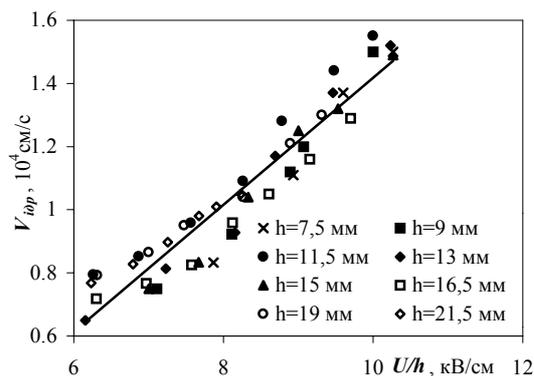


Рис. 5. Зависимость ионной дрейфовой скорости от средней напряженности электрического поля

На рис. 6 представлена зависимость частоты следования импульсов  $f_{cl}$  от среднего тока разряда  $i$ , для разных межэлектродных расстояний  $h$ .

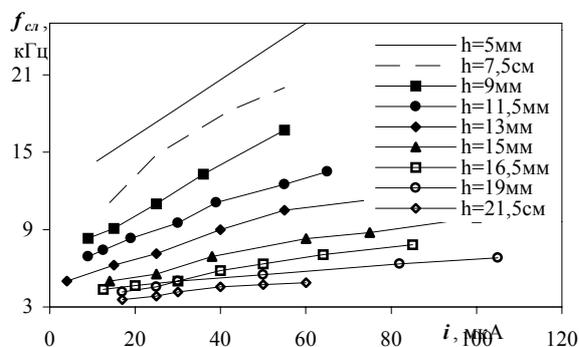


Рис. 6. Зависимость частоты следования импульсов от тока разряда для разных межэлектродных расстояний  $h$

Видно, что частота следования токовых импульсов линейно растет с увеличением тока и зависит от межэлектродного расстояния, причем при уменьшении  $h$  частота возрастает.

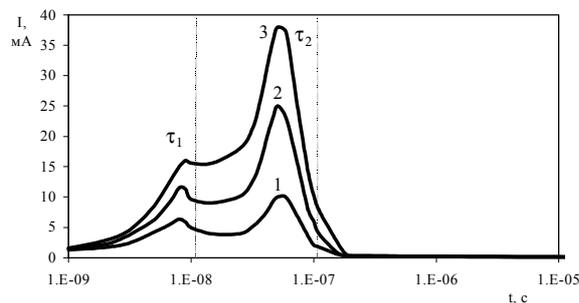


Рис. 7. Осциллограмма отдельного токового импульса для положительного потенциала на острие в воздухе. 1 –  $U/h=7,4$  кВ/см; 2 –  $U/h=8,3$  кВ/см; 3 –  $U/h=9,1$  кВ/см

Дополнительную информацию о характере развития токового импульса может дать анализ формы отдельных токовых импульсов.

Характерные осциллограммы токового сигнала импульсной стадии разряда представлены на рисунке 7. Видно, что токовый импульс имеет характерный излом на фронте и состоит из двух участков. Первый участок имеет длительность  $\tau_1 \sim 10$  нс, а второй -  $\tau_2 \sim 100$  нс. Причем, их амплитуды изменяются по разным законам в зависимости от напряжения на межэлектродном промежутке (рис. 8). Этот факт говорит о том, что через время  $\tau_1$  после начала формирования импульса меняется механизм токопереноса.

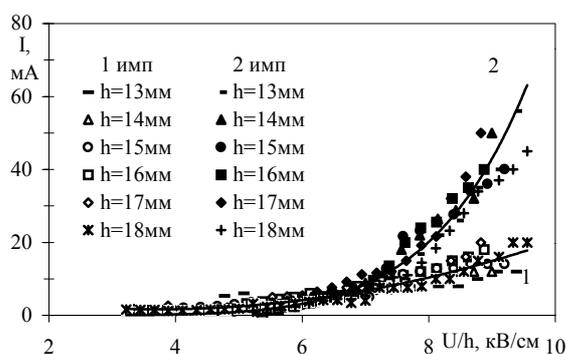


Рис. 8. Зависимость амплитуды токовых импульсов от  $U/h$ . 1 – для первого участка импульса (время  $\tau_1$ ), 2 – для второго участка импульса (время  $\tau_2$ )

Для межэлектродного расстояния  $h \sim 1$  см, в первые 10 нс протекания токового импульса, имеем характерную скорость  $v_1 \sim h/\tau_1 = 10^8$  см/с, что хорошо согласуется со скоростью распространения стримера. Таким образом, можно предположить, что в течение времени  $\tau_1$  через промежуток распространяется стример, замыкающий электрическую цепь током смещения.

Последующее нарастание тока (за время  $\tau_2$ ) вызвано, по всей видимости, отлипанием электронов в возрастающем электрическом поле в "хвосте" стримера. На этих временах характерная скорость имеет значение:  $v_2 \sim h/\tau_2 = 10^7$  см/с, что хорошо совпадает со значением дрейфовой скорости электронов при данных  $E/N$ .

Из всего вышеизложенного можно сделать выводы о процессах, происходящих в положительном тлеющем разряде атмосферного давления.

В диапазоне напряжений  $U_0 \leq U < U_1$  (рис. 2), идут процессы лавинного размножения электронов в узкой области возле острейшего анода, в которой приведенная напряженность поля  $E/N$  достаточна для ионизации газа. Электроны, ионизируя молекулы газа, уходят на анод, а положительные ионы медленно дрейфуют на катод. Зависимость тока разряда от напряжения на электродах описывается квадратичным законом  $i = AU(U - U_0)$ , а ток имеет постоянный характер [4, 5].

По мере увеличения напряжения, приложенного к разрядному промежутку, на границе области ионизации накапливается положительный объемный

заряд, и при достижении значения  $U_1$  выполняется условие лавинно-стримерного перехода  $E \approx E'$ , где  $E'$  – электрическое поле объемного заряда. От анода к катоду прорастает стример, ионизируя за счет фото- и ударной ионизации газ на своем пути, что и обуславливает первый участок токового импульса на временах  $\tau_1$ .

Ток проводимости на этих временах существует только возле острия и у "головки" стримера. Причем, процессы возле острейшего анода обеспечивают постоянную составляющую тока. Электрическая цепь замыкается током смещения.

"Головка" стримера несет потенциал, сравнимый с потенциалом анода. Напряженность электрического поля в стримерном канале мала и эффективно идет процесс прилипания электронов к молекулам электроотрицательного газа. Подвижности положительных и отрицательных ионов примерно равны и они образуют квазинейтральный ионизированный канал. По мере продвижения к катоду стример "деградирует" и электрическое поле в ионизованном канале увеличивается, что приводит к отлипанию электронов от отрицательных ионов. Отлипательные процессы и уход электронов на анод обуславливают второй участок токового импульса с характерным временем  $\tau_2$ .

По мере того, как из квазинейтрального стримерного канала уходят электроны, канал приобретает положительный заряд, который частично экранирует большое электрическое поле анода и препятствует возникновению условий для очередного лавинно-стримерного перехода. Положительные ионы со скоростями  $v_{др}$  дрейфуют на катод и восстанавливают условия для рождения нового стримера, определяя тем самым частоту следования токовых импульсов.

Работа выполнена при поддержке УНТЦ (проект №1069).

### Литература

1. Л. Леб Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л.: "Гостехтеоретиздат", 1950.
2. Г. Ретер Электронные лавины и пробой в газах. М.: "Мир", 1968.
3. Д. Мик, Д. Крэгс Электрический пробой в газах. М.: "ИЛ", 1960.
4. Ю.П. Райзер Физика газового разряда. М.: "Наука", 1987.
5. Ю.С. Акишев, М.Е. Грушин, И.В. Кочетов, А.П. Напартович, М.В. Панькин, Н.И. Трушкин О переходе многоострийной отрицательной короны в атмосферном воздухе в режим тлеющего разряда // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 2. С. 57.