

О СТРУКТУРЕ КОРОНЫ, ТОКОПРОХОЖДЕНИИ И ПРОБОЕ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ

А.Г.Орешко

Московский Авиационный Институт, Москва, Россия

Oreshko_Alex@mail.ru

Исследовались: структура короны в области активного электрода, токопрохождение в высоковольтном тлеющем разряде при атмосферном давлении и пробой в искровом разряде. Установлена не идентичность структуры короны при положительной и отрицательной полярности высокого напряжения на активном электроде при одном и том же значении подводимой мощности и межэлектродном зазоре. Не идентичность структуры связана с амбиполярным электрическим полем, которое появляется из-за тока утечки. Получено, что перенос тока при любой полярности высокого напряжения осуществляется электронами. В межэлектродном пространстве самосогласованным образом устанавливается канально-нитеобразный характер протекания тока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование стационарного тлеющего высоковольтного разряда при атмосферном давлении позволяет получить ряд информации о структуре приэлектродных областей и характере протекающих процессов. Такой разряд, как отмечено в [1], имеет перспективы применения в плазмохимии и для создания озонаторов. Различия в полярности высокого напряжения на активном электроде определяют различия в механизме размножения заряженных частиц [2-5]. Ряд работ не дает также ответа на вопрос – каким именно сортом частиц переносится ток при положительной полярности высокого напряжения на активном электроде. Отсутствуют также сведения о структуре приэлектродных областей и характере токопрохождения в сильном электрическом поле. Известно также, что при некоторых условиях в разряде появляется пульсирующая составляющая тока – импульсы Тричеля. Их прохождение сопровождается характерным потрескиванием из-за появляющихся микроударных волн. Частота повторения таких импульсов при отрицательной полярности высокого напряжения на активном электроде на два порядка выше, чем при положительной полярности [2-4]. Отсутствует физическая модель, которая в состоянии объяснить появление импульсов Тричеля в разряде. С целью установления сущности указанных явлений на установке “ИР-25” [6] был выполнен ряд экспериментов.

2. СТРУКТУРА КОРОНЫ

Корона, как известно, всегда предшествует искровому разряду [4]. По мере увеличения приложенного напряжения меняются размеры короны. С целью выяснения структуры короны на статическом модуле установки “ИР-25” проведены эксперименты в геометрии “острие - сфера”. В экспериментах в основном использовалась электродная ячейка следующей геометрии: активный электрод – цилиндр диаметром 4 мм в области его фиксации переходящий в рабочей части в конус с углом 30 градусов при вершине. Пассивный электрод имел форму сферы, её диаметр составлял 9 мм. Межэлектродное

расстояние было 15 мм. Оба электрода выполнены из стали. Напряжение от высоковольтного трансформатора подавалось к емкостному накопителю. Емкость конденсатора составляла 370 пФ. Накопитель соединялся непосредственно с разрядной ячейкой. Регулировка величины высокого напряжения, получаемого от высоковольтного трансформатора, осуществлялась с помощью лабораторного автотрансформатора. Мощность, потребляемая первичной обмоткой высоковольтного трансформатора, контролировалась посредством амперметра и вольтметра, включенных в цепь первичной обмотки. Изменение полярности высокого напряжения осуществлялось перестановкой выпрямительных диодов СВЛ-0,35-750 в схеме удвоения напряжения. Приложенное к электродам ячейки напряжение и ток в цепи разряда измерялись соответственно с помощью статического киловольтметра С-96, микроамперметра и шунта. Для регистрации свечения короны применялся трехкаскадный электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Основная цель, которая ставилась при разработке ЭОП, заключалась в получении пространственного разрешения и чувствительности, достаточных для визуализации слабосветящихся образований малого размера. Трехкаскадный преобразователь был собран на основе двух последовательно соединенных ЭОП на оптическом контакте: двухкаскадного “ПВ-20 А” (с максимумом выхода в сине-зеленой части спектра) и однокаскадного “ЭП-15” (с максимумом в зеленой части). Такое сочетание каскадов по чувствительности позволило выделить структуру приэлектродной области без фильтрации регистрируемого излучения. Регистрация свечения осуществлялась в направлении, перпендикулярном к оси разрядной ячейки. Измерялся также потенциал в области активного электрода с помощью зонда.

Изображения короны, которая имеется в приэлектродной области до перехода разряда в тлеющий высоковольтный, при положительной полярности высокого напряжения на острие для двух значений напряжения приведены на рис.1. Следует отметить, что визуально наблюдаемые на экране ЭОП и пронизывающие корону параллельные трубки тока

сфотографировать с экрана ЭОП не удалось. Анализ показывает, что с ростом напряжения при положительной полярности напряжения на активном электроде уменьшается толщина светящейся части короны. Рост напряжения сопровождается увеличением тока утечки. С по мощью трубок тока

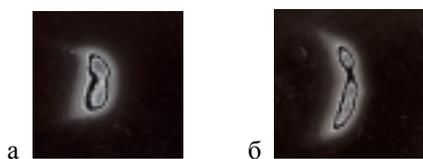


Рис.1. Изображения короны при положительной полярности напряжения: $U=8$ кВ (а) и $U=12$ кВ(б)

осуществляется прохождение электронов, эмитируемых из прикатодной области. Очевидно, что при прохождении электронов в приэлектродной области появляется амбиполярное электрическое поле. Сила со стороны этого поля и определяет изменение толщины короны с ростом напряжения. В короне при положительной полярности имеется несколько параллельных токовых трубок.

При отрицательной полярности высокого напряжения на активном электроде корона имеет коническую геометрию, в центре которой имеется одна токовая трубка. Она “прорастает” из катодного пятна. Ось конической короны перпендикулярна к поверхности катода в области её существования. При отрицательной полярности корона редко “прорастала” из конического острия (в качестве которых иногда использовались швейные иглы). Чаще всего она наблюдалась на боковой поверхности острия. С ростом напряжения происходит удлинение короны или появление еще одной. Непостоянство места существования короны можно связать с флуктуациями потоков частиц в распределении поступающего из космоса излучения. На рис.2 дано изображение структуры короны при отрицательной полярности высокого напряжения на остром активном электроде. Протяженность короны при отрицательной полярности высокого напряжения

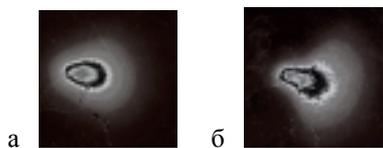


Рис.2. Изображение короны при отрицательной полярности высокого напряжения: $U=8$ кВ (а); $U=12$ кВ (б). (Катод находится слева, как и на рис.1.)

на активном электроде значительно превышает протяженность при положительной полярности. С ростом напряжения при отрицательной полярности высокого напряжения на активном электроде происходит удлинение короны. Сила, действующая со стороны амбиполярного электрического поля, непре-

менно воздействует на ионы. Напряженность амбиполярного поля определяется величиной тока. При одном и том же значении потребляемой первичной обмоткой трансформатора мощности в случае положительной полярности на активном электроде приложенное напряжение и ток в разряде составляли соответственно 18,2 кВ и 19 мкА, а при отрицательной полярности - 16,8 кВ и 32 мкА. Потенциал на расстоянии 5 мм от активного электрода был примерно одинаковым - 14,8 и 14,9 кВ. Таким образом, ячейка с отрицательным значением потенциала на активном электроде имеет большие потери энергии по сравнению с ячейкой с положительным потенциалом на активном электроде. Геометрия короны, а также тот факт, что измерение тока утечек при любой полярности приложенного напряжения осуществляется микроамперметром при переключении полярности его включения, дает достаточные основания считать, что токопрохождение в разряде при любой полярности приложенного напряжения осуществляется электронами. В отличие от классического разрядника, имеющего одинаковые сферические электроды с развитой поверхностью, в рассмотренной ячейке при одном и том же значении потребляемой мощности пробой чаще всего происходит при положительной полярности высокого напряжения на активном электроде из-за более высокой напряженности электрического поля в приэлектродной области. Благодаря более высоким значениям напряжения и меньшей толщине приэлектродной области в одной из трубок тока создаются условия для перехода электронов в состояние “убегания” от столкновений, в результате которого в приэлектродной области появляется электрический домен с сильным полем. Напряженность поля на домене превышает предельное значение для появления ударной ионизации. Появляются микропучки быстрых частиц, которые способствуют “прорастанию” лидера. Таким образом, корона переходит в искровой разряд.

При некотором распределении зарядов и потенциала коронный разряд плохо переходит в искровой.

3. ТЛЕЮЩИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ РАЗРЯД

В АТМОСФЕРЕ



Если вершину конуса у острейшего активного электрода скруглить механически или дать ему поработать некоторое время в искровом режиме, то происходит изменение в структуре короны. При этом увеличивается количество токовых трубок и корона становится ветвящейся (рис.3). При

некотором распределении напряженности электрического поля свечение почти полностью перекрывает межэлектродное пространство. Вольтамперная характеристика в таком разряде выходит на плато, как и в [1]. Фактически при атмосферном давлении реализуется высоковольтный тлеющий разряд. В токовых каналах устанавливается баланс между ионизацией и рекомбинацией. Токотрохождение в межэлектродном пространстве имеет канальную структуру. По мере удаления от высоковольтного электрода токовые каналы непрерывно переходят в токовые нити. Последние заканчиваются в приэлектродной области у заземленного электрода. Явление каналирования можно объяснить из принципа наименьшего действия, вытекающего из теоремы о вириале или принципа минимума мощности Энгеля-Штеенбека. В межэлектродной области, содержащей пространственные заряды,



Рис.4. Изображение тлеющего высоковольтного разряда при атмосферном давлении

самосогласованным образом устанавливается такое распределение зарядов и потенциала, при котором мощность, затрачиваемая для переноса зарядов из области с высоким значением потенциала в область с низким значением его, является минимальной. Образующаяся при взаимодействии электронов с нейтральными атомами слабоионизованная плазма является нагрузкой RCL-контура. Нагрузка имеет импеданс, состоящий из омической, емкостной и индуктивной составляющих. Минимум работы при токопрохождении достигается при некоторых



Рис.5. Тлеющий разряд в атмосфере. Наблюдается свечение из прикатодной (заземленной) области

значениях распределения зарядов и потенциала в зазоре, которые зависят и от импеданса нагрузки.

Чем меньше поперечный размер канала, тем меньше емкостная составляющая импеданса. С увеличением количества параллельных каналов снижается также индуктивная составляющая [4]. Кулоновский характер взаимодействия токовых струй в зазоре обеспечивает их расходимость в пространстве и полностью исключает возможность их перемешивания. Отсутствие перемешивания свидетельствует об отсутствии турбулентности в системе частиц с кулоновским характером взаимодействия в сильном электрическом поле. Токовые каналы, выходящие из приэлектродной области при отрицательной полярности на активном электроде или входящие в приэлектродную область при положительной полярности иногда мигрируют в радиальном и азимутальном направлениях. Миграция каналов имеет самосогласованный характер, определяемый кулоновским взаимодействием и связана с миграцией токовых трубок в приэлектродной области. Отметим, что наиболее вероятной причиной перемещения токовых трубок в приэлектродной области являются флуктуации в распределении частиц в потоках поступающего из космоса излучения. Вход таких частиц в приэлектродную область мгновенно приводит к изменению в распределении потенциала, и соответственно, к смещению токовых трубок.

4. ИМПУЛЬСЫ ТРИЧЕЛЯ

Наряду с постоянной составляющей тока в разряде имеется пульсирующая составляющая. Она получила название импульсов Тричеля [2,3]. Частота повторения таких импульсов при отрицательной полярности высокого напряжения на активном электроде составляет 10^6 Гц, а при положительной – 10^4 Гц. Всплески тока имеют экспоненциальный характер, а величина пульсирующей составляющей по данным [1] в 100-1000 раз превышает величину тока утечки. Пульсирующая составляющая появляется при увеличении приложенного напряжения. Иногда – при фиксированном значении приложенного напряжения в зависимости от интенсивности космического излучения она имеется, иногда отсутствует. Пульсирующая составляющая тока имеет два участка, как и в [1]. Существование импульсов Тричеля можно объяснить тем, что при росте приложенного напряжения или при поступлении частиц из космоса в токовых каналах достигается критическое значение напряженности электрического поля по Дрейсеру, необходимое для перехода электронов в состояние “убегания” от столкновений. Энергия “убегающих” электронов превышает энергию электронов постоянной составляющей тока. При положительной полярности высокого напряжения на активном электроде “убегающие” электроны из токонесящих трубок уходят в анод – на первом участке $i(t)$. В прианодной области увеличивается положительный пространственный заряд, который приводит к росту напряженности электрического поля в зазоре и по-

следующей эмиссии группы электронов из прикатодной области. Таким образом, можно дать другое объяснение наличию двух участков в пульсирующей составляющей тока, которые впервые были экспериментально обнаружены в работе [1]. Прохождение группы электронов от заземленного катода к анодной области (на втором участке $i(t)$) приводит к увеличению тока за счет ионизации нейтралов. Замена анода на вольфрамовый при отрицательной полярности высокого напряжения на остром катоде приводит к всплескам тормозного излучения, которые регистрировались фотоэлектронным умножителем ФЭУ-51 со сцинтиллятором. Однако доля таких электронов в импульсах Тричеля не является достаточной для формирования слоя избыточного пространственного заряда и последующего зарождения домена с сильным электрическим полем. Домен с сильным электрическим полем необходим для инициирования пробоя – при переходе разряда в искровой [7]. При трансформации в трубке тока элемента с омической составляющей импеданса в элемент с емкостной составляющей изменение числа частиц происходит по экспоненциальному закону [8]. Возможной структурой, ответственной за пульсирующую составляющую тока в высоковольтном тлеющем разряде при атмосферном давлении, может быть протяженный электронный банч. Отсутствие домена с сильным полем при прохождении группы электронов в высоковольтном тлеющем разряде можно связать с тем, что из-за наличия проводящей среды в межэлектродном пространстве (рис.5) максвелловское время релаксации пространственного заряда является очень малым. Различие в частотах импульсов Тричеля при положительной и отрицательной полярности напряжения на активном электроде объясняется различием во времени формирования слоя избыточного пространственного заряда в области активного электрода. При отрицательной полярности время формирования слоя избыточного отрицательного заряда определяется величиной, обратной ленгмюровской электронной частоте, а при положительной полярности время формирования слоя избыточного положительного пространственного заряда определяется временем, обратным ленгмюровской ионной частоте. Отношение ленгмюровской электронной частоты к ленгмюровской ионной с учетом заряда ионов и дает те самые 10^2 . Импульсы Тричеля указывают на то обстоятельство, что наряду с необходимым условием для зарождения домена с сильным полем, которое заключается в наличии избыточного заряда, имеется достаточное условие. Последнее заключается в величине начального заряда Q_0 , необходимого для экспоненциального нарастания его при формировании слоя пространственного заряда.

5. ПРОБОЙ, ИНИЦИИРУЕМЫЙ ПРИ ИСКАЖЕНИИ ПОЛЯ В ЗАЗОРЕ

В эксперименте острый анод находился под напряжением 12 кВ. Цилиндрический катод диаметром 10 мм заземлялся. Инициирование пробоя осуществлялось при искажении поля с помощью тиратронного блока на основе ТГИ1-8/100, импульс с которого подавался на пусковой электрод, размещенный внутри катода. Между катодом и пусковым электродом расположен коаксиальный изолятор из фторопласта. Межэлектродный зазор в основной разрядной ячейке составлял 12 мм. Емкость конденсатора в основной цепи равна 680 пФ, в иницирующей – 4700 пФ. Регистрация свечения осуществлялась электронно-оптическими камерами Кадр-2СФ и ФЭР-7, а также электронно-оптическими преобразователями. Эпограммы свечения даны на рис.6. При напряжении, которое меньше пробойного и незначительной емкости, осциллограммы тока и напряжения имеют гармонический затухающий характер. Через полпериода каждый электрод становится то катодом, то анодом. Процесс разряда сопровождается перекачкой зарядов от анода к катоду и наоборот. На эпограмме, снятой при помощи ФЭР-7, имеются разрывы. Они обусловлены появлением доменов при перемене полярности и иницировании очередного пробоя в межэлектродном пространстве.

В начальной стадии разряда – при подаче импульса напряжения на пусковой электрод – с помощью электронно-оптического преобразователя ПВ-20А, наряду с токоплазменной перемычкой между пусковым электродом и заземленным катодом, наблюдались также в межэлектродном пространстве сферические аномальные образования типа шаровой молнии.

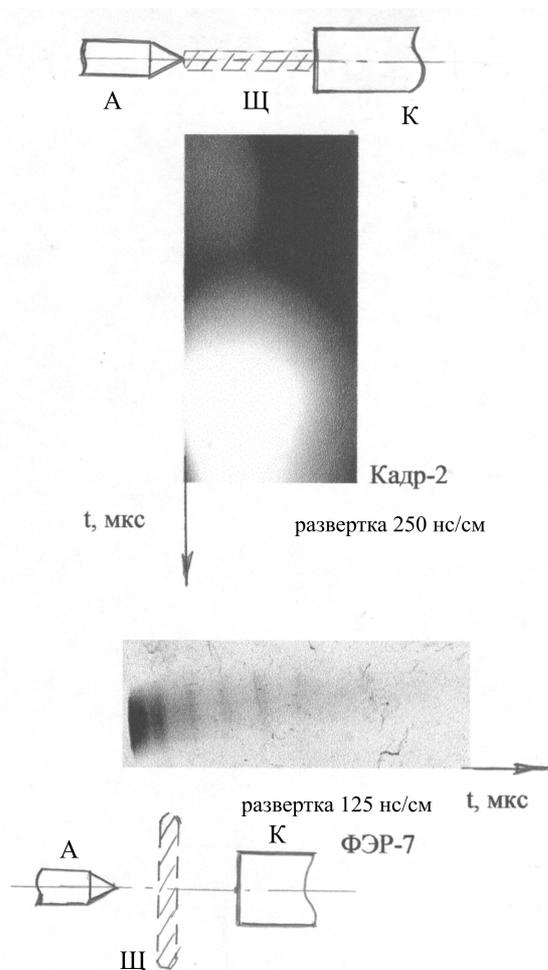


Рис.6. Эопограммы свечения. А – анод; К – катод, Щ – область, вырезаемая щелью ($h = 0,1$ мм)

Их появление связано с термализацией быстрых электронов в воздухе, которые генерируются при разделении зарядов во время пробоя у поверхности диэлектрика. Генерируемые аномальные образования имеют слоистую структуру.

6. ПРОБОЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИИ

При исследовании пробоя с перенапряжением на острый катод подавалось напряжение 12 кВ. Цепь накопителя состояла из емкости $C=0,25$ мкФ и резистора $R=3,2$ кОм. Коммутация накопителя с разрядной ячейкой осуществлялась тиратроном ТГИ1-325/16. В качестве анода использовалась полусфера. Межэлектродный зазор составлял 8 мм. Регистрация свечения осуществлялась камерой Кадр-2СФ и двухкаскадным преобразователем на основе двух ЭП-15.

Осциллограммы тока и приложенного напряжения даны на рис.7, а эопограммы свечения - на рис.8.

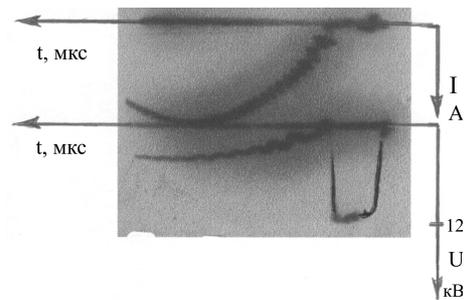


Рис.7. Осциллограммы тока I и напряжения U

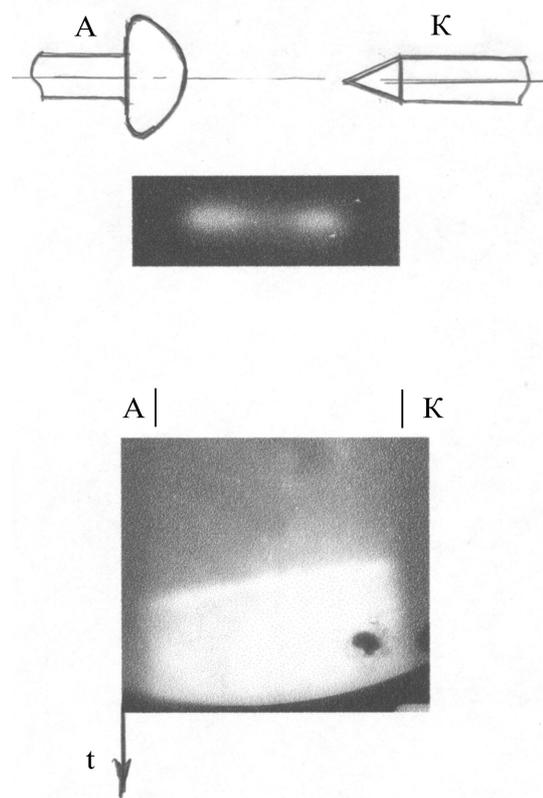


Рис.8. Эопограммы свечения для пробоя с перенапряжением: сверху – ЭП-15 (экспозиция $\tau = 3$ нс); внизу – развертка на Кадр-2СФ

Темная область на развертке свечения (справа внизу) обязана своим существованием локальному дефекту в микроканальной пластине усилителя яркости изображения. Из рис.7 и рис.8 следует, что после прохождения домена в начальной стадии пробоя, движущегося со скоростью $1,5 \cdot 10^8$ см/с, происходит переключение промежутка проводящей средой. Напряжение падает до нуля, а затем происходит его рост, который сопровождается увеличением тока. В основной части длительности импульса на осциллограммах тока и напряжения имеются высокочастотные колебания сигналов, которые свидетельствуют о разделении зарядов. Анализ данных дает основания считать, что перенос заряда происходит после прохождения домена. Домен появляется из-за сильного поля в приэлектродной области

благодаря высоким значениям dU/dt и существенному различию в подвижности электронов и ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Бруев, В.И.Голота, Л.М.Завада, Б.Б. Кадолин, В.И. Карась, И.А. Пашенко, С.Г. Пугач // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*(2). 2000, N 1, с.50-53.
2. Г. Ретер *Электронные лавины и пробой в газах*. М.: Мир, 1968.
3. Д. Мик, Д.Крэгс *Электрический пробой в газах*. М.: ИЛ, 1960, с.600.
4. Ю.П. Райзер *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987, с.592.
5. Ю.С. Акишев, М.Е. Грушин, И.В. Кочетов, А.П. Напартович, М.В. Панькин, Н.И. Трушкин // *Физика плазмы*. 2000. т.26, N 2, с.57.
6. А.Г. Oreshko // *1st Int. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Mod. Matter*. 24–29 Sept. 2000, Tomsk. Proceeding. v.1, p.358-360.
7. А.Г. Орешко // *Тезисы докладов XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС*. Москва. 2002, с.193.
8. А.Г. Орешко // *Доклады АН*. 2001. т.376, N 2, с.183-185.