

04

Стабильный однородный микроразряд атмосферного давления между плоским катодом и игольчатым анодом

© А.М. Астафьев², А.А. Кудрявцев¹¹ Санкт-Петербургский государственный университет² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

E-mail: akud@ak2138.spb.edu

Поступило в Редакцию 13 марта 2014 г.

Предложены и реализованы условия для стабильного горения однородного тлеющего микроразряда в воздухе при атмосферном давлении между плоским катодом и игольчатым анодом с малой величиной зазора $\sim 1\text{--}30\ \mu\text{m}$ в диапазоне токов $\sim 10^{-4}\text{--}1\ \text{A}$.

В последние годы возрос интерес к однородным слаботочным микроразрядам в атмосферном воздухе, когда нагрев нейтрального газа незначителен и большая часть вводимой энергии расходуется на возбуждение и ионизацию частиц плазмообразующего газа [1,2]. Однако с ростом давления однородность газовых разрядов ухудшается, и на первый план выступают разнообразные резко неоднородные и нестационарные их формы, приводящие к развитию различных неустойчивостей [1]. С другой стороны, одно из самых характерных свойств разрядов низкого давления состоит в том, что разряды эти удивительно спокойны и однородны. В них из-за нелокальности функции распределения электронов (ФРЭ) профиль электронной концентрации является колоколообразным, безотносительно к пространственному распределению и механизму энерговклада [2]. Поскольку критерий нелокальности (ФРЭ) определяется параметром $pL < 10\ \text{cm} \cdot \text{Torr}$ [2] (p — давление газа при 300 К, L — межэлектродный зазор), то для высоких давлений это соответствует малым ($10\text{--}100\ \mu\text{m}$) размерам. Эти размеры соответствуют и экспериментальным данным, которые показывают, что оптимальные условия зажигания и горения тлеющих разрядов реализуются в районе минимума кривой Пашена (точка Столетова) и соответствуют напряжениям $U \sim 200\text{--}350\ \text{V}$ и значениям

параметра $pL \sim 0.5-5 \text{ cm} \cdot \text{Torr}$. При высоких давлениях эти условия соответствуют микронным размерам, когда самоподдерживающийся автономный положительный столб отсутствует (для его формирования просто „не хватает места“ [1]). Практически все прикладываемое напряжение сосредоточено в катодном слое, так что ВАХ таких разрядов является растущей. В свою очередь, при зажигании более протяженных разрядов с неизбежностью должен образовываться положительный столб, ВАХ которого имеет падающий вид, так что развитие тепловых неустойчивостей приводит к срыву стабильного горения разряда [1].

Таким образом, для получения стабильного однородного разряда высокого давления следует реализовать значения параметра pL , соответствующие условиям вблизи минимума кривой Пашена. В этом случае растущая ВАХ будет способствовать стабильному горению, а нелокальность ФРЭ — его однородности.

В данной работе предложены и реализованы такие условия для микроразряда в открытой атмосфере воздуха между плоским катодом и игольчатым анодом с малой величиной $L \sim 1-30 \mu\text{m}$ в диапазоне токов $\sim 10^{-4}-1 \text{ A}$.

Для реализации малых зазоров ($1-30 \mu\text{m}$) между электродами использовалась рычажная система, в которой один конец рычага длиной 330 mm был закреплен на оси с подшипниками, а второй мог подниматься при вращении микрометрического винта с лимбом. Вблизи закрепленного с возможностью поворота конца рычага закреплялась каретка-держатель электрода так, чтобы расстояние от оси вращения рычага до разряда составляло 33 mm . Тогда цена деления лимба составляла $1 \mu\text{m}$. Зазор сводился до замыкания, а затем медленно разводился до обрыва тока тестера для фиксации точки нуля зазора, после чего в один заход устанавливалась любая требуемая величина зазора.

Предварительные исследования микроразряда в открытой атмосфере показали, что при токах $\sim 10 \text{ mA}$ в подавляющем большинстве случаев довольно быстро сказываются сильный нагрев и эрозия электродов. Это приводит к существенным и часто необратимым изменениям измеряемых величин, поэтому был выбран квазиимпульсный режим разряда. Для осуществления разряда использовался источник моноимпульсного напряжения, близкий по форме к полупериоду синусоиды длительностью $\sim 25-100 \text{ ms}$, подключаемый к исследуемому промежутку через ограничительный резистор $364, 44, 6$ или $2.74 \text{ k}\Omega$. В качестве источника

использовался резистор 15Ω (55Ω), на который разряжалась через дроссель 0.2 H (с внутренним сопротивлением 6Ω) батарея конденсаторов $300 \mu\text{F}$ ($900 \mu\text{F}$) до 5 kV . Для измерения основных параметров на входы осциллографа подавались напряжение с разрядного промежутка и с ограничительного резистора через два одинаковых делителя $1 : 1000$ с входным сопротивлением $10 \text{ M}\Omega$. Полученные осциллограммы скачивались на компьютер и обрабатывались в Origin. По результатам усреднения нескольких осциллограмм строилась ВАХ разряда.

На первом этапе исследовался стандартный разряд с плоским катодом и анодом, имеющим очень большой радиус кривизны (от 10 mm до нескольких метров) по сравнению с длиной разряда. Результаты показали, что во всем диапазоне токов ($5\text{--}50 \text{ mA}$) минимум напряжения горения разряда со стальным катодом в отличие от кривой Пашена при комнатной температуре ($7\text{--}10 \mu\text{m}$ [1]) соответствует величине зазора около $30 \mu\text{m}$. Отметим, что поскольку по всех экспериментах здесь и далее использовался плоский катод, то во всех исследованных диапазонах разрядных токов горел нормальный разряд, когда при увеличении тока увеличивалась площадь катодного пятна [1]. Это указывает на соответствующее уменьшение плотности и увеличение температуры газа в зоне разряда, происходящее из-за высокой нормальной плотности тока реализуемого тлеющего разряда атмосферного давления, и возможность их измерения таким способом. Измерения, как и само поведение тлеющего разряда в плоском промежутке при зазорах около минимума кривой Пашена и левой ее ветви ($15 \mu\text{m}$ и менее), затруднительны, так как сильно влияют неоднородность распределения зазора и шероховатость поверхности. Возникают множественные пробои уже при напряжениях менее 330 V .

Для решения поставленной задачи использовался разряд, который зажигается между плоским катодом и анодом, выполненным в виде тонкой иглы с малым радиусом скругления. Расстояние между плоским катодом и иглообразным анодом L_0 выбирается меньше расстояния, соответствующего минимуму кривой Пашена L_{\min} . По этой причине напряжение пробоя газа U и привязка разряда к аноду соответствуют минимуму кривой Пашена ($U = U_{\min}$, $L = L_{\min}$), т. е. происходят выше кончика иглы на расстоянии $L_{\min} > L_0$. Разряд как бы „сам выбирает“ свою длину так, чтобы при изменении условий она соответствовала стабильному горению вблизи минимума кривой Пашена L_{\min} . При этом падение напряжения на разрядном промежутке имеет одну и ту же величину (порядка U_{\min}), которая слабо зависит от величины

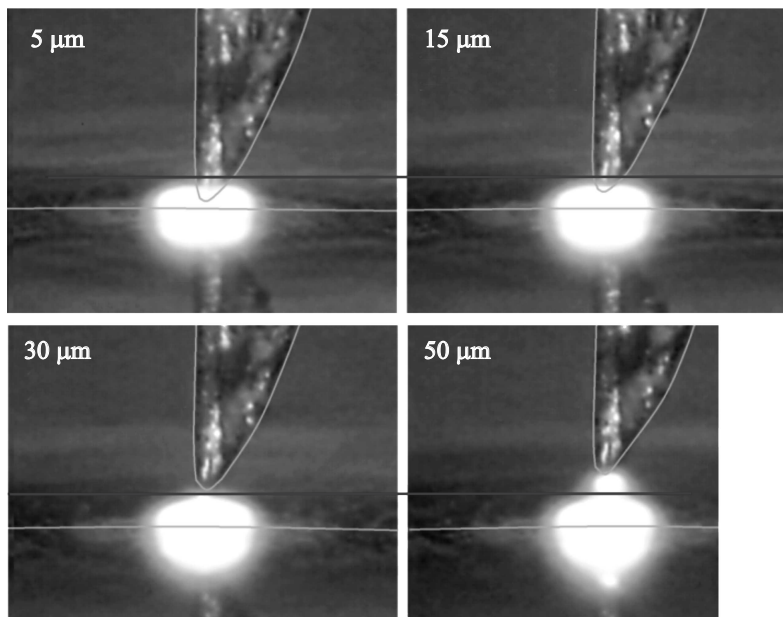


Рис. 1. Разряд с игольчатым анодом (радиусом закругления $7\mu\text{m}$) при токе 1 mA и разных межэлектродных промежутках.

зазора и давления газа. Кроме того, технический результат достигается тем, что электрическая емкость при такой конфигурации электродов гораздо меньше, чем при двух плоских электродах. Все это позволяет повысить устойчивость разряда к искрообразованию (срыву в режим *RC* колебаний) при токах около единиц и менее mA и малых разрядных промежутках.

Эксперименты показали, что пробой и разряд с игольчатым анодом (с радиусом скругления до $\sim 25\mu\text{m}$) около минимума кривой Пашена имеют следующие особенности. Слева от этого минимума как пробой, так и плазма отрицательного свечения (NG) возникают выше кончика иглы, а поле и NG искажены „протыкающей“ его иглой (рис. 1). Поэтому падение напряжения имеет одну и ту же величину ($300\text{--}310\text{ V}$), слабо зависящую от зазора и соответственно от давления газа. При увеличении межэлектродного расстояния более $30\mu\text{m}$ начинает формироваться положительный столб (рис. 1) и увеличиваться падение напряжения на разряде. Хотя при приближении зазора к $1\mu\text{m}$ разряд

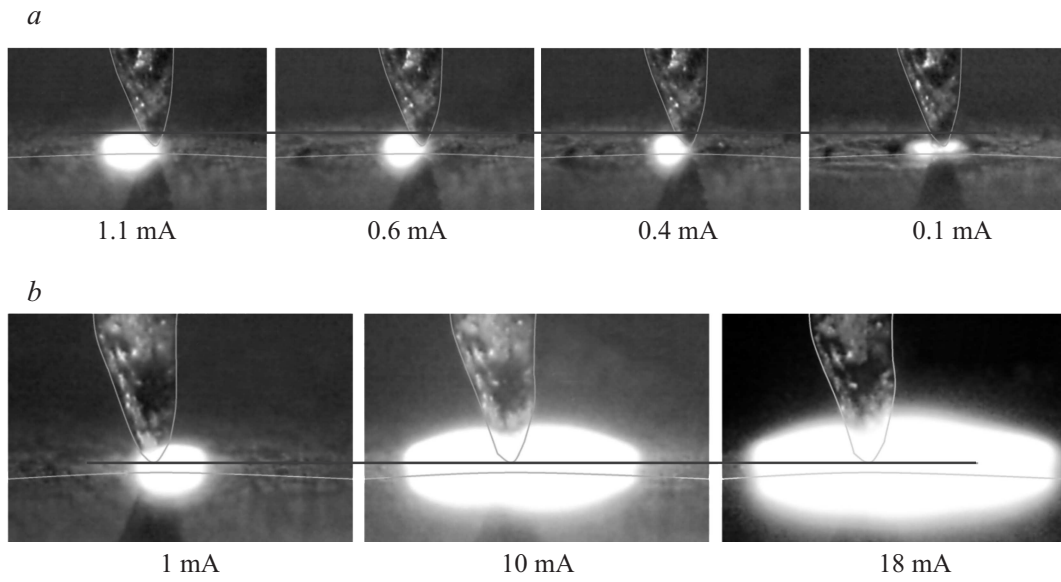


Рис. 2. Динамика микрозаряда при изменении тока от 1.1 до 0.1 мА и постоянном межэлектродном расстоянии 10 μm (*a*), а также при изменении тока от 1 до 18 мА и постоянном межэлектродном расстоянии 15 μm (*b*).

с плоскими электродами нестабилен даже при малом токе, в данном же случае за счет малости межэлектродной емкости удается легко получить относительно стабильный тлеющий разряд с нормальным падением при токах менее миллиампера (рис. 2, *a*). При уменьшении тока разряда от 1.1 до 0.3 мА длина разряда и величина падения напряжения оставались практически неизменными. При больших изменениях тока разряда (1–18 мА) такая особенность пропадала (рис. 2, *b*).

Из рис. 2, *b* видно, что при изменении разрядного тока практически пропорционально ему меняется площадь светящейся области, т.е. реализуется нормальный тлеющий разряд с примерно постоянной плотностью тока [1]. По размеру отрицательного свечения можно сделать приблизительную оценку плотности тока в прикатодной области разряда. Из представленных данных видеосъемки хорошо видно, что размер отрицательного свечения зависит от величины тока разряда и составляет величину: для 1 мА $\sim 100 \mu\text{m}$; для 10 мА $\sim 340 \mu\text{m}$; для 18 мА $\sim 440 \mu\text{m}$, а соответствующие плотности будут 0.1, 0.086 и 0.092 A/mm^2 . Отклонения от линейного роста пятна привязки к плоскому катоду можно объяснить несимметричной формой пятна и нагревом газа.

Эксперименты показали, что разряд между плоским катодом и иголкой-анодом (с сильно неоднородным полем) при малых значениях межэлектродного расстояния от 5 до $30 \mu\text{m}$ является нормальным разрядом с практически постоянным напряжением 300–320 В. При токах около 0.1 мА иногда наблюдался переход к нестабильному разряду, который представлял собой большое количество резко возникающих и гаснущих искр (рис. 2). Таким переходом, по-видимому, можно объяснить возрастание напряжения разряда ($\sim 20 \text{ V}$), которое наблюдалось на ВАХ перед обрывом тока.

Таким образом, в работе предложены и реализованы условия для стабильного горения однородного тлеющего микроразряда в воздухе при атмосферном давлении между плоским катодом и игольчатым анодом с малой величиной зазора $\sim 1\text{--}30 \mu\text{m}$ в диапазоне токов $\sim 10^{-4}\text{--}1 \text{ A}$.

Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М.: Интеллект. 2009. 736 с.
- [2] Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. // Физика тлеющего разряда. СПб.: Изд-во Лань, 2010. 512 с.