

Два типа токовых пульсаций слабotoчного искрового разряда в неоднородном электрическом поле

© Б.Б. Балданов

Отдел физических проблем при президиуме Бурятского научного центра СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: beibat@mail.ru

(Поступило в Редакцию 25 августа 2010 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований искрового разряда в конфигурации электродов „острие–плоскость“ в аргоне, при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины. Показано, что характер протекания тока в тонком плазменном канале слабotoчной искры представляет собой установившуюся последовательность регулярных импульсов тока. Обнаружено, что наряду с низкочастотными импульсами тока слабotoчной искры генерируются и высокочастотные пульсации тока наносекундной длительности.

Искровой разряд является одной из форм нестационарного электрического разряда в плотных газовых средах ($\sim 10^5$ Па) и возникает на финальной стадии процесса, называемого электрическим пробоем газового промежутка [1–3]. Широкое применение искровой разряд находит как коммутирующий элемент в устройствах высоковольтной импульсной техники [4]. С другой стороны, возникновение искрового пробоя ограничивает повышение мощности генераторов неравновесной плазмы атмосферного давления. В работе [5] показано, что использование специальных мер стабилизации (балластное сопротивление R_b , прокачка газа через разрядный промежуток) позволяет реализовать в токовой области между известными формами разряда — короной и искрой — новый вид разряда: диффузный тлеющий разряд при атмосферном давлении (ТРАД), создающий стационарную и однородную неравновесную плазму по всему объему межэлектродного промежутка. Интенсификация исследований, направленных на повышение устойчивости ТРАД относительно перехода в искровой разряд, обусловлена возможностью использования ТРАД как нового перспективного источника неравновесной плазмы атмосферного давления [6–8].

Визуально искровой разряд представляет собой кратковременную вспышку, излучаемую ярким и тонким токовым каналом, перемикающим разрядный промежуток. К традиционным признакам искрового разряда относят образование катодного пятна, возрастание тока до амперного уровня и выше, разогрев разрядного канала с образованием ударной волны. Как известно, интенсивность искрового разряда связывается с энерговыделением, приведенным к единице длины, и искры с погонным энерговыделением меньше нескольких джоулей на сантиметр характеризуются как умеренные и слабые искры. В лабораторных условиях такие искры создаются в электродной системе „острие–плоскость“ в коротких сантиметровых промежутках (см., например, [9,10]). В работе [9] показано, что при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой

величины (более $1\text{ M}\Omega\text{m}$) развитие искры в коротком промежутке „острие–плоскость“ возможно только за счет зарядки паразитной емкости внешней цепи. Установлено, что вследствие малости паразитной емкости (несколько десятков пикофард) искровой разряд является слабotoчным и при этом характеристики искры имеют существенные отличия от сильноточного искрового разряда.

Целью данной работы является экспериментальное исследование искрового разряда атмосферного давления в неоднородном электрическом поле при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины (более $1\text{ M}\Omega\text{m}$) в аргоне.

Экспериментальные исследования искрового разряда проводились на стенде, описанном в работах [8,11]. Разрядная камера представляет собой кварцевую трубку в форме цилиндра с внутренним диаметром 5 см и высотой 16.5 см. Катод — острие — представляет собой медный стержень диаметром 5 мм и радиусом закругления вершины конуса $r = 20\ \mu\text{m}$, плоский электрод в данной конфигурации электродов представлял собой металлическую пластину диаметром $D = 40\ \text{mm}$. Межэлектродное расстояние варьировалось до $d = 1\ \text{cm}$. Максимальное напряжение регулируемого высоковольтного источника ВС-20-10 составляло 20 кВ. Балластное сопротивление R_b во внешней цепи составляло $21\ \text{M}\Omega\text{m}$. Исследования формы, амплитуды и длительности импульсной компоненты тока проводились с использованием малоиндуктивных токовых шунтов и двулучевого осциллографа. Эволюция свечения искрового разряда в объеме и на электродах с ростом тока регистрировалась с помощью цифрового фотоаппарата. Для поддержания паспортной чистоты аргона и удаления из зоны разряда возможных продуктов плазмохимических реакций газ непрерывно прокачивался через разрядную камеру. Расход аргона G измеряется с помощью ротаметра РМ-А-0.16ГУЗ до $G = 5 \cdot 10^{-5}\ \text{kg/s}$.

На рис. 1 представлена фотография слабotoчного искрового разряда, формируемого в неоднород-

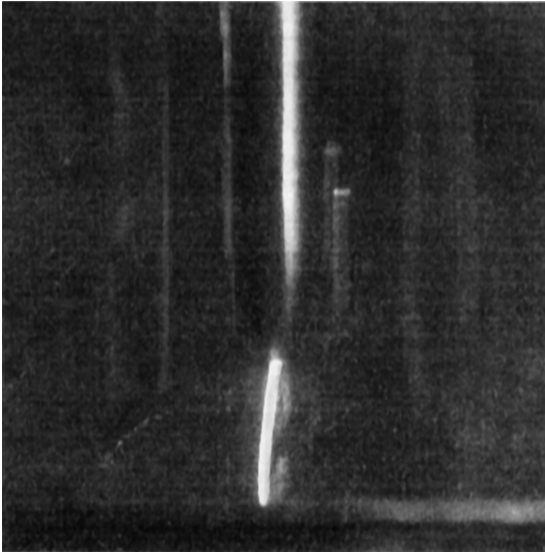


Рис. 1. Фотография слабوتочного искрового разряда в аргоне. Межэлектродное расстояние $d = 0.5$ см; средний ток разряда $I = 110 \mu\text{A}$; балластное сопротивление $R_b = 21 \text{ M}\Omega\text{m}$. На фотографии катодное острие сверху.

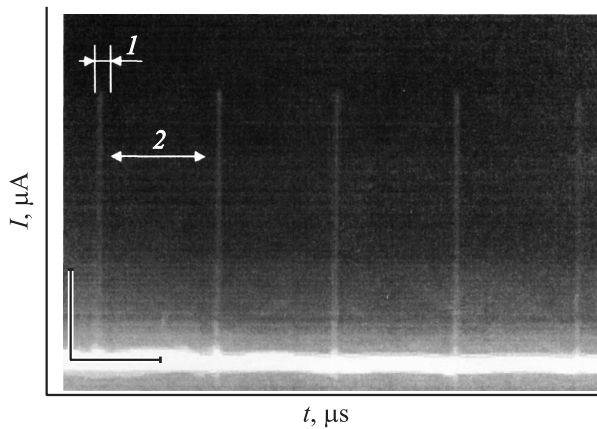


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока слаботочного искрового разряда. Межэлектродное расстояние $d = 0.5$ см; средний ток разряда $I = 110 \mu\text{A}$; балластное сопротивление $R_b = 21 \text{ M}\Omega\text{m}$; $[t] = 50 \mu\text{s}/\text{div}$, $[I] = 100 \mu\text{A}/\text{div}$.

ном электрическом поле при межэлектродном расстоянии $d = 0.5$ см. Как видно, искровой канал представляет собой тонкий нитевидный плазменный канал ($D \approx 0.5\text{--}0.7$ мм), перемыкающий разрядный промежуток. В отличие от сильноточного искрового разряда, где ток нарастает из-за газодинамического расширения, сильно прогретого искрового канала, рост тока в слаботочной искре сопровождается сжатием токового канала [9].

Осциллографирование разрядного тока слаботочной искры показывает, что характер протекания тока представляет собой установившуюся последовательность регулярных импульсов тока (рис. 2). В формировании импульса тока слаботочной искры можно выделить две

характерные области: начальный узкий пик с амплитудой $I_M \approx 280 \mu\text{A}$ (область 1) и область 2 — более длительная ($T \approx 70 \mu\text{s}$ при токе разряда $I = 110 \mu\text{A}$), по сути определяющая период T следования импульсов тока разряда. При увеличении приложенного напряжения U частота следования импульсов тока в слаботочном искровом разряде линейно увеличивается с увеличением разрядного тока I (рис. 3).

На рис. 4 представлен развернутый пик амплитуды (см. область 1, рис. 2) импульса тока слаботочной искры. Длительность крутого переднего фронта импульса тока искры составляет $\tau \approx 70$ ns и остается постоянно при увеличении разрядного тока I . Структура заднего фронта импульса тока имеет сложный характер, спад тока в импульсе идет быстро (характерная величина скорости спада тока $|dI/dt| \approx 6 \mu\text{A}/\text{ns}$) и далее после резкого спада тока в импульсе возникают затухающие по амплитуде высокочастотные колебания длительностью $\sim 70\text{--}80$ ns. При этом типичная длительность заднего фронта им-

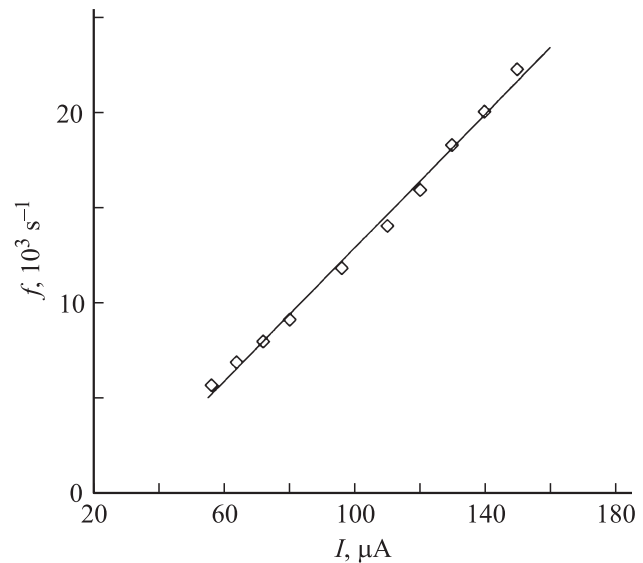


Рис. 3. Зависимость частоты следования импульсов тока слаботочной искры от величины разрядного тока I .

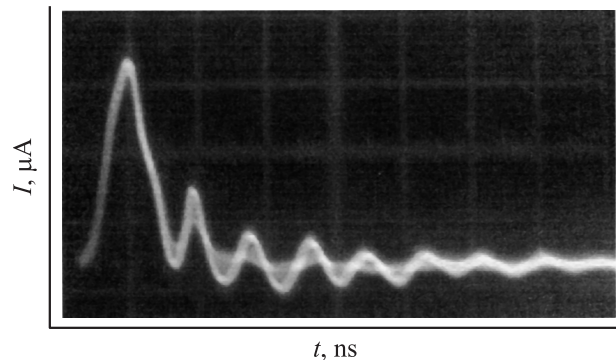


Рис. 4. Осциллограммы развернутого пика (область 1, рис. 2) импульса тока слаботочной искры с высокочастотными пульсациями тока на заднем фронте. $[t] = 90 \text{ ns}/\text{div}$, $[I] = 100 \mu\text{A}/\text{div}$.

пульса тока искры составляет порядка $6-7 \mu\text{s}$, за которые ток спадает до $20-40 \mu\text{A}$ и держится на этом уровне вплоть до начала следующего импульса. Обнаруженные высокочастотные пульсации тока слаботочной искры в аргоне похожи на высокочастотные колебания тока на заднем фронте импульса тока слаботочной искры в азоте, формируемой в конфигурации электродов „острие–плоскость“ [9]. Сходный по проявлению эффект наблюдался в начальной стадии развития положительного столба тлеющего разряда пониженного давления в аргоне [12]. В работе [12] обнаружено, что после интенсивного пика яркости в момент зажигания разряда имеется участок низкой, по сравнению со стационарной, интенсивности излучения длительностью $\sim 1-1.5 \text{ ms}$. Затем яркость нарастала и выходила на стационарный уровень после нескольких осцилляций. Как следует из осциллограмм токового импульса, поведение разрядного тока коррелирует с колебаниями интенсивности излучения. Интересно отметить, что подобные высокочастотные пульсации тока наблюдаются и на заднем фронте импульса тока (импульса Тричела) отрицательной короны в азоте [13], и при давлении $P \leq 80 \text{ Torr}$ указанные колебания возникают не только на „хвосте“ импульса, но и сразу вслед за пиком тока на переднем фронте. Осциллограммы импульсов тока отрицательной короны с высокочастотными пульсациями тока, возникающими за пиком тока в импульсе, также представлены в [14] при разных экспериментальных условиях разряда.

В данной работе проведены исследования искрового разряда в коротком промежутке „острие–плоскость“ в аргоне, при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины. Показано, что характер протекания тока в тонком плазменном канале слаботочной искры представляет собой установившуюся последовательность регулярных импульсов тока. Обнаружено, что наряду с низкочастотными импульсами тока слаботочной искры генерируются и высокочастотные пульсации тока наносекундной длительности.

Список литературы

- [1] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997.
- [2] Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: Иностранная литература, 1960.
- [3] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [4] Месц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. Ч. II, IV.
- [5] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В. и др. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 2. С. 172.
- [6] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 2. С. 775.
- [7] Афанасьев С.Б., Лавренюк Д.С., Петрушенко И.Н. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 7. С. 30.
- [8] Балданов Б.Б. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 7. С. 603.
- [9] Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 642.

- [10] Ретьев А.Г., Ретин П.Б., Данченко Н.Г. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. С. 51.
- [11] Балданов Б.Б. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 8. С. 150–152.
- [12] Дятко Н.А., Ионих Ю.З., Мещанов А.В. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 10. С. 939.
- [13] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б. и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 550.
- [14] Chinin V.I. // Problems of atomic science and technology. 2005. N 1. Ser. Plasma Physics (10). P. 178.