

УДК 533.9

Особенности формирования искрового разряда при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением

Б. Б. Балданов

Представлены результаты экспериментальных исследований искрового разряда в геометрии "острие—плоскость" в аргоне при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины. Обнаружена микроструктура слабotoчного искрового разряда, представляющая собой образование множества токовых нитей микронного размера внутри токового канала искры.

PACS: 52.80.Mg

Ключевые слова: искровой разряд, импульс тока, аргон, микроструктура канала, балластное сопротивление.

Введение

Искровой разряд является одной из форм нестационарного электрического разряда в плотных газовых средах (с давлением $\sim 10^5$ Па) и возникает на финальной стадии процесса, называемого электрическим пробоем газового промежутка [1—3]. Широкое применение искровой разряд находит, например, как коммутирующий элемент в устройствах высоковольтной импульсной техники [4]. С другой стороны, возникновение искрового пробоя ограничивает повышение мощности тлеющего разряда атмосферного давления, являющегося новым перспективным источником неравновесной плазмы [5—8].

Визуально искровой разряд представляет собой кратковременную вспышку, излучаемую ярким и тонким токовым каналом, перемикающим разрядный промежуток. К традиционно принятым 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. Искры с погонным энерговыделением меньше нескольких Дж/см характеризуются как умеренные или слабые искры [9, 10]. В [9] установлено, что при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины (> 1 МОм) развитие искры в коротком промежутке "острие—плоскость" возможно только за счет зарядки пара-

зитной емкости внешней цепи. Вследствие малости паразитной емкости (несколько десятков пФ) искровой разряд является слабotoчным, и при этом характеристики искры существенно отличаются от свойств сильноточного искрового разряда.

Цель работы — экспериментальное исследование искрового разряда атмосферного давления в неоднородном электрическом поле при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины (> 1 МОм).

Экспериментальная техника и методика

Экспериментальные исследования искрового разряда проводились на стенде, ранее уже описанном в [8]. Разрядная камера представляет собой кварцевую трубку в форме цилиндра с внутренним диаметром 5 см и высотой 16,5 см. Катод в виде острия закреплен внутри кварцевой трубки диаметром 21 мм и представляет собой медный стержень диаметром 5 мм и радиусом закругления вершины конуса $r = 20$ мкм. Плоский электрод в данной конфигурации электродов представлял собой металлическую пластину диаметром $D = 40$ мм. Максимальное напряжение регулируемого высоковольтного источника типа ВС-20-10 составляло $U_{\max} = 20$ кВ. Балластное сопротивление R_6 во внешней цепи составляло 21 МОм. Исследования формы, амплитуды и длительности импульсной компоненты тока и напряжения проводились с использованием малоиндуктивных токовых шунтов и двухлучевого осциллографа. Эволюция свечения разряда в объеме и на электродах с ростом тока короны (вплоть до ее перехода в искровой разряд) регистрировалась с помощью цифрового фотоаппарата.

В экспериментах использовался особо чистый аргон Ar (ГОСТ 10157—79) с содержанием приме-

Балданов Баир Батоевич, старший научный сотрудник.
Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН.
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8.
Тел. (3012) 43-32-25. E-mail: baibat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2011 г.

сей на уровне 0,01 %. Для поддержания паспортной чистоты аргона и удаления из зоны разряда возможных продуктов плазмохимических реакций газ непрерывно прокачивался через разрядную камеру. Для ввода и вывода аргона разрядная камера снабжена двумя штуцерами с внутренним диаметром $d = 4$ мм, ориентированными вдоль направления тока разряда. Расход аргона G измеряется с помощью ротаметра типа РМ-А-0,16 ГУЗ, имеющего технический предел $5 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлена фотография искрового разряда, формируемого в неоднородном электрическом поле, при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением $R_6 > 1$ МОм. Как видно, визуально слабوتочная искра в коротких сантиметровых промежутках (≤ 1 см) представляет собой тонкий плазменный канал диаметром $d \approx 0,5—0,7$ мм, перерывающийся разрядный промежуток. В отличие от сильноточного искрового разряда, где ток нарастает из-за газодинамического расширения сильно прогретого искрового канала, рост тока в данной слаботочной искре сопровождается сжатием токового канала [9]. Вольт-амперная характеристика слаботочного искрового разряда, поддерживаемого паразитной емкостью внешней цепи, является падающей (рис. 2).

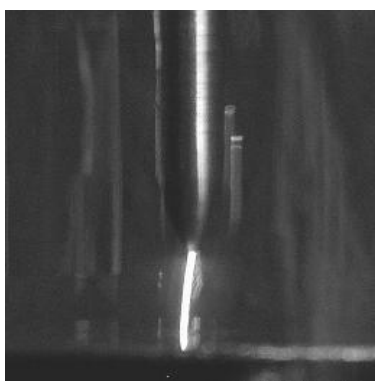


Рис. 1. Фотография слаботочного искрового разряда в аргоне. Межэлектродное расстояние $d = 0,5$ см; средний ток разряда $I = 110$ мкА; балластное сопротивление $R_6 = 21$ МОм. На фотографии катодное острие сверху

Осциллографирование разрядного тока слаботочной искры показывает, что характер протекания тока представляет собой установившуюся последовательность регулярных импульсов тока, отраженных на рис. 3. Как видно из представленных осциллограмм, характер протекания тока в плазменном канале слаботочной искры представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока [11]. В формировании импульса тока слаботочной искры можно выделить две характерные области: начальный узкий пик с ампли-

тудой $I_m \approx 280$ мкА (область 1) и вторая область 2 (при среднем токе разряда $I = 110$ мкА) более длительная $\tau \approx 70$ мкс, что фактически определяет период $T \approx \tau$ следования импульсов тока разряда. Амплитудное возрастание тока в импульсе тока слаботочной искры ограничено величиной балластного сопротивления R_6 . При увеличении приложенного напряжения U частота следования импульсов тока в слаботочном искровом разряде линейно увеличивается с увеличением разрядного тока I , как это видно на рис. 4.

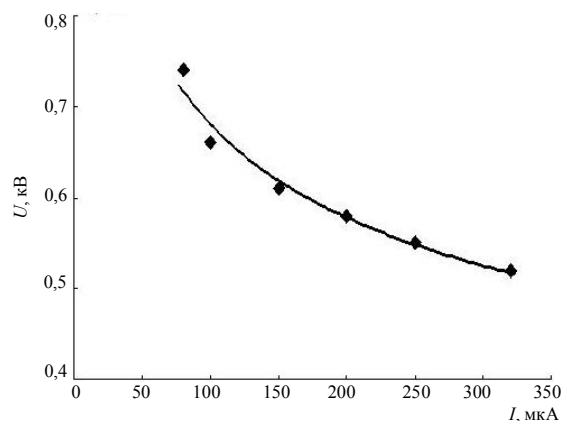


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика слаботочной искры в аргоне. Межэлектродное расстояние $d = 0,5$ см

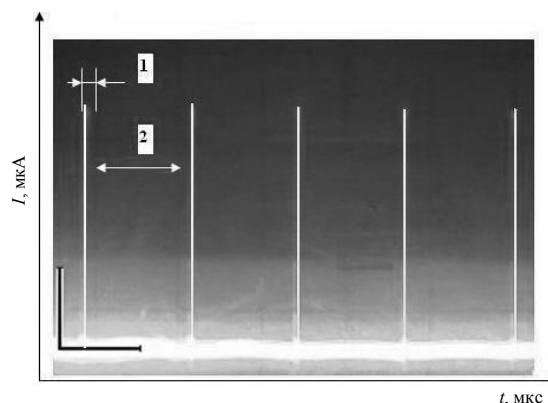


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока слаботочного искрового разряда. Межэлектродное расстояние $d = 0,5$ см; средний ток разряда $I = 110$ мкА; балластное сопротивление $R_6 = 21$ МОм; в левом нижнем углу масштаб по горизонтали — 50 мкс/дел, по вертикали — 100 мкА/дел

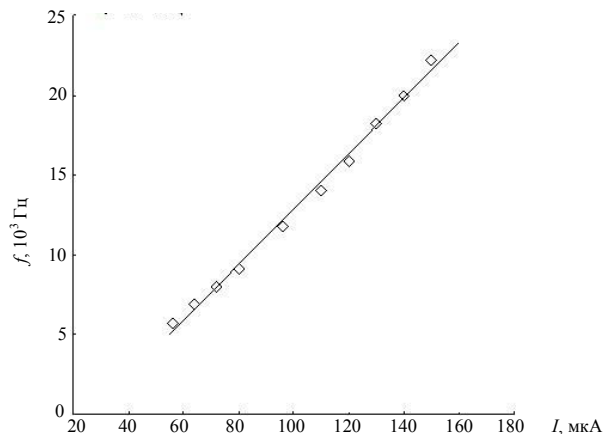


Рис. 4. Зависимость частоты следования импульсов тока слаботочной искры f от величины разрядного тока I

На рис. 5 представлен развернутый вид пика (область 1, рис. 3) импульса тока слаботочной искры. Длительность крутого переднего фронта импульса тока искры составляет $\tau_{\text{фр}} \approx 70$ нс и остается постоянной при увеличении разрядного тока I .

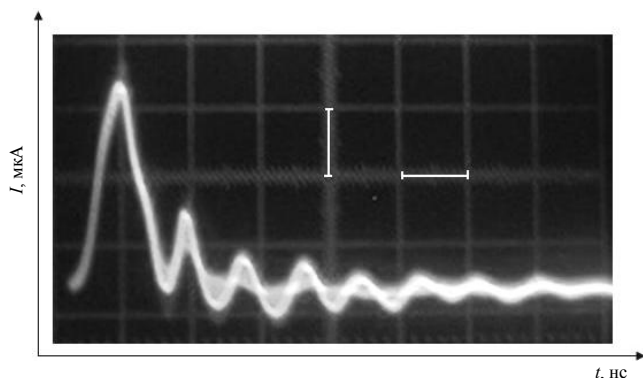


Рис. 5. Осциллограмма развернутого пика (область 1, рис. 2) импульса тока слаботочной искры с высокочастотными пульсациями тока на заднем фронте. Масштаб: $t = 90$ нс/дел, $I = 100$ мкА/дел

Структура заднего фронта импульса тока имеет довольно сложный характер. Спад тока в импульсе идет быстро (характерная величина скорости спада тока $|dI/dt| \approx 6$ мкА/нс) и далее, после резкого спада тока, в импульсе возникают затухающие по амплитуде высокочастотные колебания с длительностью ~ 70 — 80 нс. При этом типичная длительность заднего фронта импульса тока искры составляет порядка 6—7 мкс, за которые ток спадает до величины 20—40 мкА 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 этой работе обнаружено, что после интенсивного пика яркости в момент зажигания разряда имеется участок низкой (по сравнению со стационарной) интенсивности излучения длительностью ~ 1 — $1,5$ мс. 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]. При давлениях $P \leq 80$ Торр указанные колебания возникают не только на "хвосте" импульса, но и сразу же 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.

Детальное исследование токового канала слаботочной искры в данном случае позволило обнаружить сложную поперечную структуру канала. На фоне ярко светящейся внешней оболочки токового канала просматривается внутренняя микроструктура, представляющая собой скопление микроканалов диаметрами $D \approx 5$ — 10 мкм, равномерно распределенных по сечению канала. Отпечатки микроканалов регистрируются также на обоих электродах и представляют собой скопление оплавленных шарообразных форм диаметром ~ 3 — 10 мкм, локализованных в области размером 30—40 мкм.

Отметим, что сложная поперечная структура токовых каналов также наблюдалась при исследовании искрового разряда наносекундного диапазона в воздухе [15], сильноточного диффузного разряда в аргоне [16]. В [15] показано, что возможность существования каналов микронного диаметра может быть обусловлена отсутствием перекрытия головок микроканалов за счет быстрого пересечения промежутка, а также отсутствием радиального ионизационного расширения микроканалов в результате ослабления поля в скоплении из-за суперпозиции полей большого количества микроканалов. Близкие значения диаметра микроканалов слаботочной искры и микроструктуры токовых каналов наносекундного искрового разряда в воздухе [15] свидетельствуют о едином механизме формирования микроструктуры.

Заключение

В работе проведены исследования искрового разряда в коротком промежутке "острие—плоскость" в аргоне при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины. Показано, что наряду с низкочастотными импульсами тока слаботочной искры генерируются и высокочастотные пульсации тока с длительностью, лежащей в наносекундном диапазоне. Обнаружена микроструктура слаботочного искрового разряда, представляющая собой образование множества токовых нитей микронного размера внутри токового канала искры.

Литература

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. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004.
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. // Там же. 2003. Т. 29. № 2. С. 775.
7. Афанасьев С. Б., Лавренюк Д. С., Петрушенко И. Н. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 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. // Там же. 2007. Т. 33. № 7. С. 642.
10. Репьев А. Г., Репин П. Б., Данченко Н. Г. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 23. С. 51.
11. Балданов Б. Б. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 4. С. 135.
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. // Там же. 2001. Т. 27. С. 550.
14. Chinin V. I. // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (10). 2005. No. 1. P. 178.
15. Перминов А. В., Тренькин А. А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 9. С. 52.
16. Бычков Ю. И., Суслов Ф. И., Тинчурин К. А. и др. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. № 2. С. 196.

Features of the spark discharge formation at a limiting ballast resistor

B. B. Baldanov

Department of Physical Problems of the Buryat Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Science
8 Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russia
E-mail: baibat@mail.ru

The results of experimental studies of a spark discharge in the point-to-plane geometry are submitted. Microstructure of the low-current spark discharge has been revealed.

PACS: 52.80.Mg

Keywords: spark discharge, current pulse, argon, microstructure, channel, ballast resistor.

Bibliography — 16 references.

Received April 21, 2011