

04

Объемная импульсная корона при импульсно-периодическом наносекундном разряде отрицательной полярности в коротких промежутках с потоком воздуха атмосферного давления

© Н.М. Лепёхин, Ю.С. Присеко, Н.И. Пуресев, В.Г. Филиппов

Высоковольтный научно-исследовательский центр — филиал
Всероссийского электротехнического института им. В.И. Ленина, Истра,
Московская область
E-mail: info@schema5.ru

Поступило в Редакцию 8 августа 2013 г.

Получена объемная форма импульсно-периодического наносекундного коронного разряда отрицательной полярности в коротких промежутках с потоком воздуха атмосферного давления и естественной влажности в геометрической системе электродов „ребро—ребро“. Выполнены оценки параметров разряда и определен фактор, ограничивающий величину мощности, вкладываемой в разряд.

Коронный разряд, как один из видов самостоятельного разряда в газе, представляет интерес для технологий, в которых используется низкотемпературная плазма, например, для поверхностной обработки материалов, озонирования воды и газов, очистки токсичных примесей различного рода и т.д. При этом очевидно, что для повышения эффективности названных технологических процессов требуется максимальная интенсивность коронного разряда, которая, в свою очередь, определяется плотностью носителей зарядов электронно-ионной плазмы.

Для всех форм и видов коронного разряда характерным является одно общее свойство [1]: „... интенсивность разряда (сила тока) определяется собственным объемным зарядом, созданным в зоне ионизации и заполняющим, в результате движения объемного заряда

в электрическом поле короны, ее внешнюю зону“. Таким образом, основное свойство коронного разряда — ограничение силы тока разряда собственным объемным зарядом — выдвигает на первый план задачу получения сильноточного объемного коронного разряда, а также задачу как экспериментальной оценки параметров такого разряда, так и ограничивающих его факторов.

Исследования импульсной короны в воздухе при атмосферном давлении выполнялись в геометрической системе электродов „игла—полуплоскость“, „игла—плоскость“, „игла—сфера“ [2–4]. Безбарьерная система электродов, состоящая из многорядного многоострийного и плоского электродов, исследовалась в [5]. Возможность получения сильноточного (~ 10 А) однородного объемного диэлектрического барьерного разряда в воздухе атмосферного давления приведена в [6].

В данной работе описано получение пространственно-однородной импульсной короны при импульсно-периодическом наносекундном разряде отрицательной полярности, далее объемного импульсного коронного разряда (ИКР), в коротких промежутках с потоком воздуха атмосферного давления естественной влажности в геометрической системе электродов „ребро—ребро“.

В исследуемой электродной системе как потенциальный, так и непотенциальный электроды были выполнены в виде параллельных секций из отдельных пластин (ребер). В каждой секции электроды (ребра) выполнены из нержавеющей стали толщиной 0.1 мм. Длина каждого электрода 190 мм, ширина — 40 мм. Общее количество электродов 120 штук, при этом в анодной (потенциальной) группе установлено 60 электродов и соответственно такое же количество в катодной (непотенциальной) группе. Шаг между электродами 3 мм. Электроды отделены друг от друга изоляционными пластинами и стянуты шпильками. Общая площадь каждой электродной секции около 360 см², которые крепились в прямоугольном корпусе из прозрачного изоляционного материала. Величина межэлектродного зазора в ходе экспериментов могла регулироваться в интервале 5–15 мм. Таким образом, конструкцию исследуемой короноразрядной электродной системы можно условно рассматривать как емкостную нагрузку (электрический воздушный конденсатор).

Для уменьшения развития неустойчивостей область разрядного промежутка вдоль ширины электродов при проведении экспериментов продувалась атмосферным воздухом естественной влажности (30–80%), контролируемой гигрометром. Скорость потока воздуха и его температура контролировались анемометром АГТ-1004. Поток воздуха, продуваемый через электродную систему с максимальной скоростью до 25 м/с, обеспечивался вентилятором TSB-210 с максимальным расходом воздуха до $\sim 200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Внешний вид разряда регистрировался цифровым фотоаппаратом.

Источником возбуждения объемного ИКР являлся генератор высоковольтных наносекундных импульсов отрицательной полярности, электрическая схема которого аналогична схеме генератора наносекундных импульсов для накачки лазеров на парах металлов [7]. Амплитуда напряжения, формируемая генератором [7] на потенциальной и непотенциальной группе электродов, составляла 5–30 кВ, частота следования импульсов возбуждения могла регулироваться в диапазоне 0.05–15 кГц.

Показателем устойчивого горения объемного ИКР была стационарная форма напряжения и тока, которые регистрировались во внешней цепи электродной системы осциллографом Tektronix 3054B, высоковольтным делителем напряжения Tektronix P6015A и поясом Роговского. Осциллограммы ИКР, формируемого на исследуемой электродной системе, полученные в одинаковых и неизменных в ходе эксперимента внешних условиях, представлены на рис. 1. Как следует из осциллограмм, при повышении выходного напряжения от генератора наносекундных импульсов в диапазоне частот 0.05–15 кГц и диапазоне напряжений от 5 до 17 кВ ток короны отсутствовал, как это видно из рис. 1, *a*. Начало формирования объемного ИКР соответствовало уровню напряжения на исследуемой электродной системе $\sim 20 \text{ кВ}$, как это видно из рис. 1, *b*. Объемный ИКР возникал в диапазоне частот 50–800 Нз при напряжении 29 кВ, как это видно из рис. 1, *c*.

Таким образом, максимальная амплитуда напряжения на промежутке (0.6 см), когда возникает объемный ИКР, составляет 29 кВ, длительность фронта нарастания напряжения по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения не превышает 27 нс, длительность импульса по уровню 0.5 при этом не превышает 20 нс, а длительность спада импульса напряжения составляет $\sim 10 \text{ нс}$. При названных параметрах разряда напряженность поля составляет $\sim 48 \text{ кВ/см}$, т.е. в 2 раза

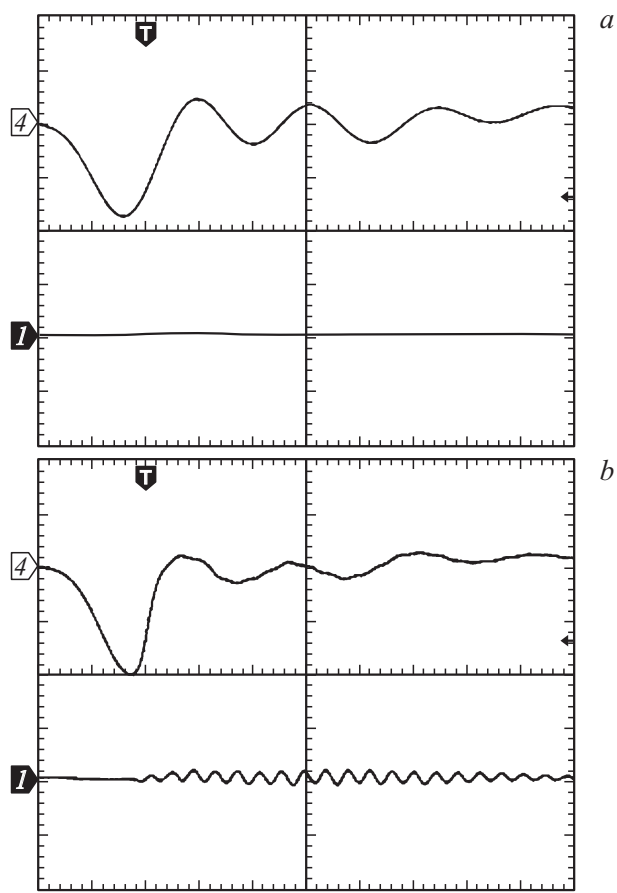


Рис. 1. Осциллограммы тока (луч 1) и напряжения (луч 4) импульсного коронного разряда: *a* — ток короны отсутствует; *b* — момент начала формирования короны; *c* — момент устойчивого горения объемного импульсного коронного разряда; $m_i = 1000 \text{ A/cm}$; $m_u = 10 \text{ kV/cm}$; $m_t = 40 \text{ ns/cm}$.

превышает статистическое пробивное напряжение стандартного промежутка. Как следует из рис. 1, *c*, разрядный ток носит колебательный характер с частотой $\sim 60 \text{ MHz}$, а максимальная амплитуда тока разряда

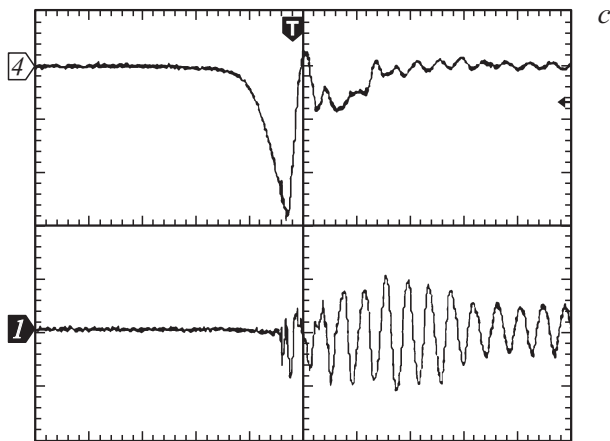


Рис. 1 (продолжение).

равна ~ 1000 А. При этом амплитуда тока, оцененная по амплитуде напряжения (~ 29 kV), времени спада импульса напряжения (~ 10 ns) и экспериментально измеренной емкости исследуемой электродной системы (~ 60 pF), составляет ~ 170 А, что отличается от измеренной амплитуды тока более чем в 6 раз.

Последнее, как и для разрядов в плотных газах при больших перенапряжениях, видимо, может быть обусловлено тем, что проводимость наносекундных объемных разрядов определяется как убегаящими и вторичными электронами, так и эффектом предыонизации промежутка электронами аномальной энергии с дальнейшим лавинным размножением в том и другом случае, а вклад того или иного механизма зависит прежде всего от геометрии поля [8]. Следует заметить, что для геометрической системы электродов „ребро–ребро“ поле носит гипернеоднородный характер.

При проведении экспериментов максимальная частота следования разрядных импульсов, определяемых источником питания, т. е. генератором наносекундных импульсов, составила ~ 800 Hz. Переход объемного ИКР в искровой пробой начинался при частоте более 803 Hz. При дальнейшем увеличении частоты число искровых пробоев в общем объеме коронного разряда продолжало увеличиваться.

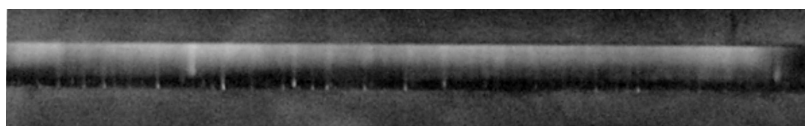


Рис. 2. Фотография внешнего вида исследуемого разряда.

Таким образом, рост частоты разрядных импульсов, обеспечивающий повышение объемного энерговклада в формируемую плазму в потоке неосушенного атмосферного воздуха, ограничивался только его разогревом, что приводило к тепловой контракции и возникновению искровой пробоя. Последнее подтверждается также необходимостью установки специального рассекателя, который устанавливался в ходе эксперимента перед электродной системой. При отсутствии такого рассекателя тепловая контракция и искровой пробой возникали в местах с наименьшей скоростью протока воздушной массы при частотах менее 800 Hz.

Фотография объемного ИКР представлена на рис. 2. Разряд практически однороден по всему объему, расположенному между двумя секциями отдельных пластин. Общий объем разрядного промежутка при зазоре 0.6 см составляет 216.6 cm^3 . На отдельных электродах (ребрах) наблюдаются яркие точки, количественный подсчет которых во всем объеме разрядного промежутка был крайне затруднителен.

Итак, в геометрической системе электродов „ребро–ребро“ показана возможность получения пространственно-однородной объемной импульсной короны при наносекундном разряде отрицательной полярности в коротких (0.6 см) промежутках с потоком воздуха атмосферного давления и естественной влажности. Напряженность поля, при котором зажигался объемный ИКР, в 2 раза превышала статическое пробивное напряжение стандартного промежутка. При этом скорость нарастания электрического поля в исследуемом воздушном промежутке, общий объем которого равен $\sim 220 \text{ cm}^3$, составляет $1.8 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{ns})$, а максимальная амплитуда разрядного тока $\sim 1000 \text{ A}$. Переход разряда в искровой пробой промежутка происходит при определенном значении частоты разрядных импульсов в результате тепловой контракции.

Список литературы

- [1] *Велихов Е.П.* и др. Физические явления в газоразрядной плазме: Учеб. руководство. М.: Наука, 1987. 160 с. с илл.
- [2] *Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е.* и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 4. С. 347–360.
- [3] *Тиматков В.В., Соколова М.В., Верещагин И.П.* // НРЭ. 2003. № 10. С. 17–26.
- [4] *Карась В.И., Голота В.И., Болотов О.В.* и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 951–958.
- [5] *Поляков Н.П.* // ПТЭ. 2004. № 5. С. 126–129.
- [6] *Малашин М.В., Мошкупов С.И., Хомич В.Ю.* и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 48–53.
- [7] *Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г.* // Прикладная физика. 2001. № 45. С. 46–49.
- [8] *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–82.