

04;10

О формировании искрового разряда при пробое азота и воздуха в неоднородном электрическом поле

© В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, Ю.В. Шутько

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 21 октября 2009 г.)

При наносекундном разряде в азоте и воздухе повышенного давления при напряжении 50–250 кВ исследован переход от объемного разряда, инициируемого пучком убегающих электронов, к искровому разряду. Показано, что в случае катода с малым радиусом кривизны, плоском аноде и наличии катодных пятен лидер искрового канала может распространяться с плоского анода. Показано, что при высоких скоростях роста напряжения на сантиметровых промежутках ($dU/dt \sim 10^{15}$ В/с и быстрее) образование катодных пятен происходит при коронном разряде за время ~ 200 пс.

Изучение перехода стримерного канала в искровой продолжает привлекать внимание исследователей [1]. Это связано со сложностью данного явления и малым временем переходных процессов. В [1] было высказано предположение, что при замыкании разрядного промежутка стримером создается электрическое поле, достаточное для возникновения автоэмиссии, которая и вызывает развитие процессов, приводящих к превращению стримерного канала в искровой. В работах, систематизированных в монографии [2], было показано, что контрагирование объемного разряда в широком диапазоне экспериментальных условий определяется появлением катодных пятен, которые возникают за счет взрывной электронной эмиссии. Объемный разряд при повышенных значениях давления газовых смесей формировался за счет преьонизации от дополнительных источников. Далее из катодных пятен к аноду распространяются каналы, которые переькали промежутка.

В последние годы существенно возрос интерес к изучению наносекундных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных значениях давления газа [3–9]. Формирование диффузных разрядов в этих условиях наблюдается без дополнительного источника для преьонизации разрядного промежутка. Особенностью разрядов в неоднородном электрическом поле является генерация рентгеновского излучения и пучков убегающих электронов, которые регистрировались за анодами газовых диодов (см. сборник [7] и обзор [8], а также ссылки в них).

В [9] было предложено называть объемные (диффузные) разряды, формируемые без дополнительного источника для преьонизации, ОРИПЭЛ (объемные разряды, инициируемые пучком электронов лавин). При геометрии промежутка острие–плоскость образование катодных пятен в ОРИПЭЛ происходит за время менее ~ 1 нс [8]. Можно было бы предположить, что образование катодного пятна за короткое время будет приводить к формированию искрового канала. Однако особенность перехода от диффузного разряда к искровому разряду в неоднородном электрическом поле, высоких

значениях приведенной напряженности электрического поля E/p и генерации убегающих электронов ранее не изучались.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать переход от диффузного разряда к искровому разряду в азоте и воздухе повышенного давления в неоднородном электрическом поле при генерации в разряде пучка убегающих электронов.

В работе использовались два импульсных наносекундных генератора, к которым подключались разрядные промежутки с плоским анодом и катодом, имеющим малый радиус кривизны. В качестве катода использовались трубки из нержавеющей стали с толщиной стенки 100 μm и диаметром 6 мм. Конструкции подобных разрядных камер приведены в [6,8]. На промежутке подавались импульсы напряжения от генераторов СЛЭП-150 и РАДАН-220. Генератор СЛЭП-150 (без передающей линии) формировал на высокоомной нагрузке импульсы напряжения амплитудой ~ 150 кВ, амплитуда падающей волны в передающей линии составляла ~ 130 кВ. Фронт импульса при этом составлял ~ 250 пс на уровне 0.1–0.9, а длительность импульса напряжения на полувысоте в случае согласованной нагрузки составляла ~ 1 нс. Генератор РАДАН-220 формировал импульсы напряжения с фронтом ~ 500 пс и амплитудой на высокоомной нагрузке ~ 250 кВ. Длительность импульса на полувысоте в случае согласованной нагрузки составляла ~ 2 нс. Применение срезающего разрядника на генераторе СЛЭП-150 дало возможность провести исследования при длительности импульса напряжения на полувысоте 100 и 200 пс при уменьшении амплитуды импульса напряжения до ~ 50 кВ. Интегральная картина свечения разряда фотографировалась через сетку (анод) или окно (перпендикулярно продольной оси промежутка) фотоаппаратом SONY A100. Кроме того, с помощью фотоприемника PD025 компании Photec с временным разрешением ~ 100 пс исследовалось изменение мощности излучения в области 200–900 нм во времени. Спектры излучения разряда снимались с помощью спектрометра EPP2000C-25 (StellarNet Inc.) с известной спектральной чувствительностью в области от 200 до 850 нм.

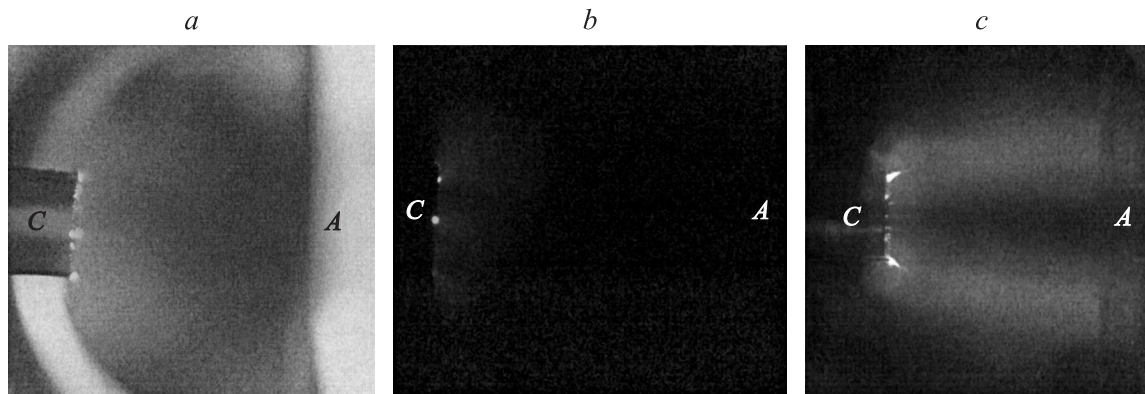


Рис. 1. Фотография излучения разряда при длительности импульса напряжения 200 ps (*a, b*) и 2 ns (*c*). *a, b* — генератор СЛЭП-150, длина промежутка $d = 16$ mm, воздух при давлении $p = 0.1$ МПа. *c* — генератор РАДАН-220, $d = 14$ mm, азот, $p = 0.3$ МПа.

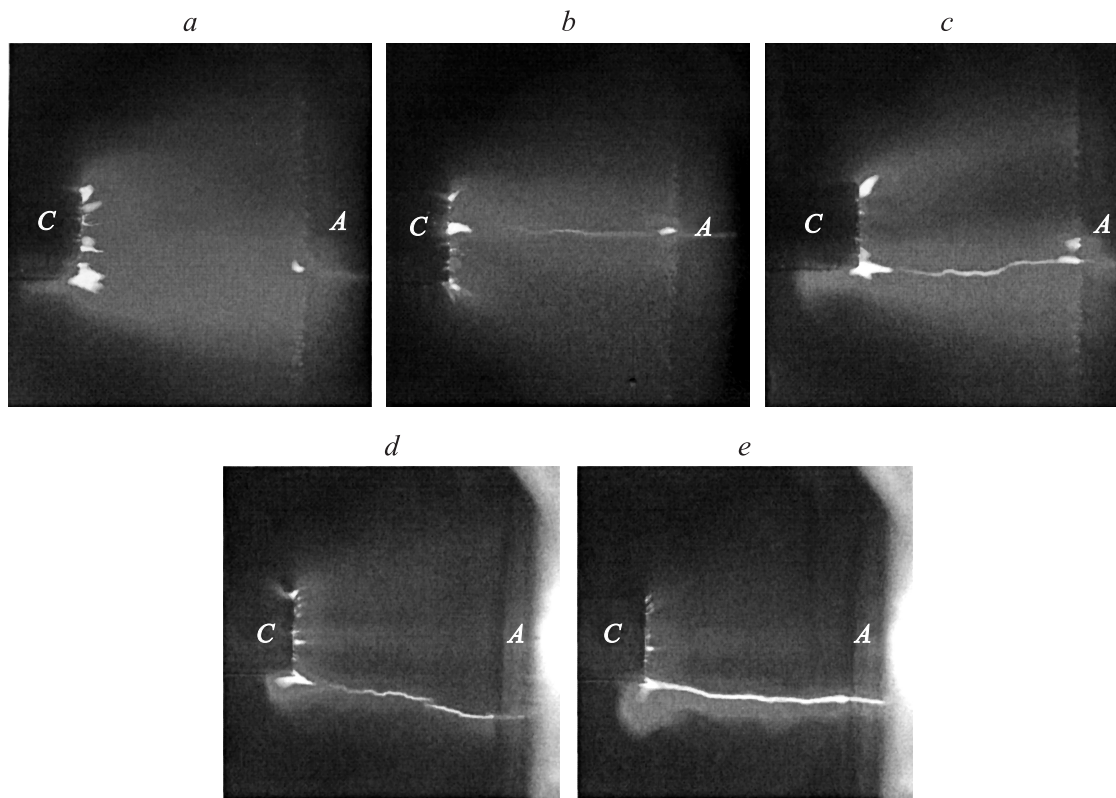


Рис. 2. Фотографии излучения разряда при длительности импульса напряжения 2 ns в воздухе при $p = 0.05$ МПа (*a, b, c*) и смеси азота добавкой 200 Pa метана при $p = 0.15$ МПа (*d, e*). Генератор РАДАН-220, $d = 14$ mm.

Электрические сигналы с шунтов, емкостных делителей, коллектора и фотоприемника регистрировались осциллографом TDS-6604 (6 GHz , $20 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$) или DPO70604 (6 GHz , $25 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$).

Проведенные исследования подтвердили, что при высоких электрических полях, концентрации электрического поля на катоде и субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения формируется ОРИПЭЛ. Установлено, что начальной стадией ОРИПЭЛ является диффузная корона, которая появляется за время в сотни пикосекунд.

На рис. 1 показаны фотографии разряда в воздухе атмосферного давления при длительности импульса напряжения 200 ps на полувысоте и межэлектродном зазоре 16 mm. На рис. 1, *a* промежуток дополнительно освещался от настольной лампы, а снимок разряда был получен за 16 импульсов. На рис. 1, *b* освещения промежутка не было, а фотография излучения разряда была сделана за 2 импульса. На катоде в обоих случаях видны яркие пятна и их число возрастает при увеличении количества импульсов. В прикатодной области на обеих фотографиях видно диффузное свечение. Увеличение

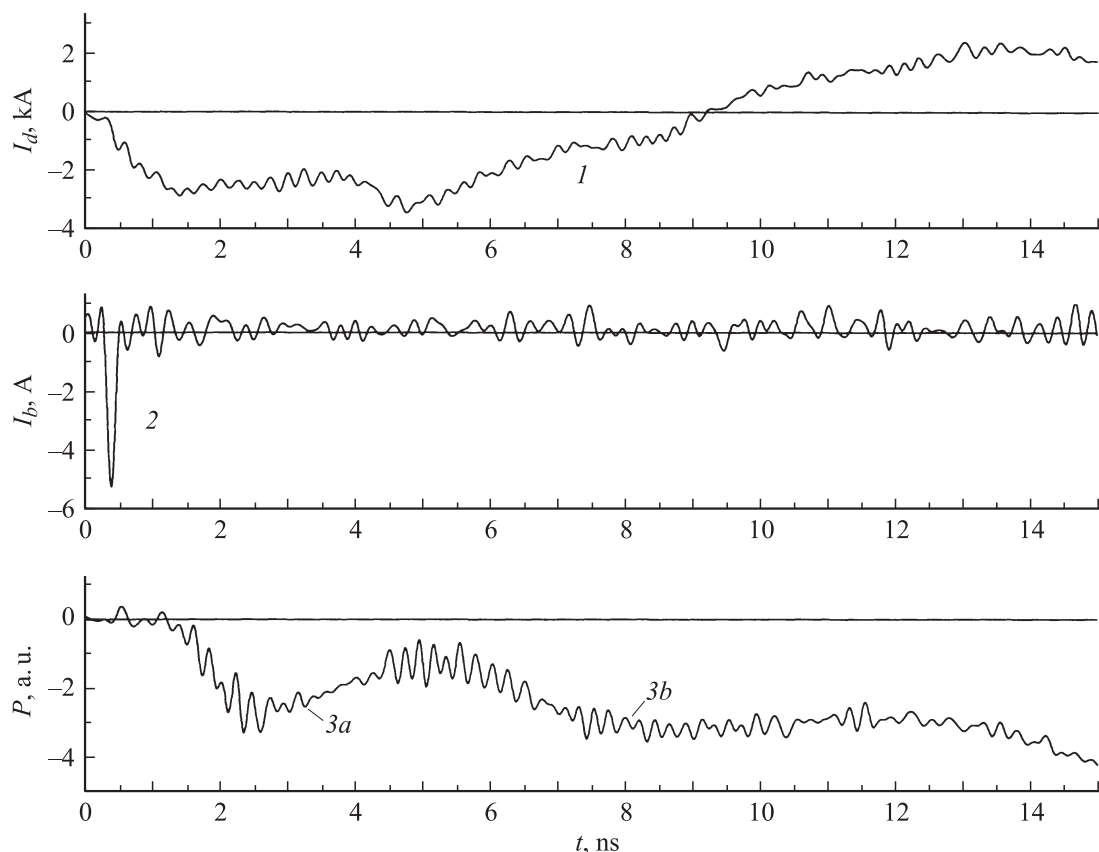


Рис. 3. Осциллограммы импульса разрядного тока I_d (1), тока пучка убегающих электронов I_b (2) за анодом, а также излучения ОРИПЭЛ (3, а) и искры (3, б). Генератор РАДАН-220, $d = 6$ мм, азот, $p = 0.35$ МПа.

длительности импульса напряжения до 1–2 ns приводит к формированию во всем промежутке диффузного разряда, рис. 1, с. Интенсивность излучения катодных пятен возрастает, а также увеличивается их размер.

На рис. 1, с и рис. 2 хорошо видны лидеры искрового канала, которые распространяются к аноду. Лидерами искрового канала предлагаем называть более яркие по сравнению с диффузным разрядом каналы, которые пробивают только часть промежутка. При этом интенсивность их излучения существенно меньше, чем интенсивность излучения искрового канала. Однако скорость анодонаправленных лидеров сравнительно мала, и они в течение импульса напряжения, длительность которого с учетом отражений может возрасти с генератором РАДАН-220 до десятков наносекунд, продвигаются к аноду не более чем на 3 мм. Яркие пятна на аноде в азоте при давлении 0.1–0.3 МПа обычно не наблюдались (см. рис. 1, с).

Было обнаружено, что промежуток в данных условиях пробивает лидер искрового канала, который распространяется от анода, а его движению к катоду предшествует образование анодного пятна. Различные фазы пробоя промежутка лидером более легко было наблюдать в воздухе (см. рис. 2, а-с) и в смеси азота с добавками метана (см. рис. 2, d, e). На рис. 2, а видно, что движению катодоаправленного лидера предшествует появление

анодного пятна. На следующем этапе от анодного пятна прорастает лидер искрового канала со сравнительно малой интенсивностью излучения, который может иметь изгибы под прямым углом. На рис. 2, b, d видно, что перед катодным пятном до образования искры имеется область с диффузным свечением разряда. Это показывает, что лидер на данных фотографиях еще не достиг катода. Рис. 2, e иллюстрирует вид разряда при лидере, который закоротил промежуток (искровой разряд, сформировавшийся в конце импульса напряжения). Интенсивность излучения искры возросла, а изгибы на канале сгладились. На рис. 2, e интенсивность излучения искры относительно мала, и хорошо видно излучение диффузного разряда. При уменьшении длины разрядного промежутка и (или) увеличении длительности импульса напряжения интенсивность излучения искры существенно превышает интенсивность излучения ОРИПЭЛ. В этом случае на фотографиях разряда видны только искры.

Спектральные исследования показали, что основной вклад в излучение диффузного разряда в азоте, воздухе, смеси азота с метаном и водородом дает вторая положительная система азота в ближней УФ-области спектра. Излучение искры является широкополосным и регистрируется в области от 200 до 800 nm. Измерения концентрации электронов по штарковскому уширению

линий водорода показали, что в азоте атмосферного давления в искровом канале она составляет $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Напряжение на промежутке подавалось от генератора РАДАН-220. Для определения момента появления искры были проведены измерения зависимости интенсивности излучения диффузного разряда и искры от времени для значений давления от 0.02 до 0.6 МПа. При зазоре 14–16 мм в азоте искровые каналы формировались только при давлении ~ 0.5 МПа и более. Излучение искры начинало регистрироваться через время ~ 5 ns и более. Минимальная задержка между максимальной интенсивностью излучения второй положительной системы азота и максимальной интенсивностью широкополосного излучения искры при давлении ~ 0.5 МПа составляла ~ 10 ns. Для сокращения времени формирования искры межэлементный зазор был уменьшен до 6 мм.

На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов тока разряда, излучения и тока пучка убегающих электронов (СЛЭП [9]), регистрируемых за отверстием диаметром 1 мм в аноде, полученные при давлении азота 0.35 МПа. Все осциллограммы синхронизованы во времени с точностью ~ 100 ps (импульсы тока разряда и тока пучка) и ~ 500 ps (импульсы тока разряда и излучения). Анализ полученных данных подтвердил, что и при малых зазорах разрядного промежутка излучение искры регистрируется после появления излучения диффузного разряда. Максимум излучения искры (при наличии нескольких максимумов — первый) всегда в исследованных условиях запаздывал относительно излучения диффузного разряда. Минимальное запаздывание появления излучения искры относительно тока разряда при высоком давлении составило ~ 2 ns. Запаздывание генерации СЛЭП относительно начала тока разряда составляло при этом ~ 500 ps.

В данной работе получены данные о переходе диффузного разряда в искровой разряд. Показано, что при высоких напряженностях электрического поля, катоде с малым радиусом кривизны и наличии катодных пятен лидер искрового канала может распространяться от плоского анода к катоду. В работе [10] в воздухе атмосферного давления при пробое в неоднородном электрическом поле была зарегистрирована скорость катодонаправленного стримера, большая, чем у анодонаправленного стримера. Оба стримера двигались от электрода с малым радиусом кривизны. Это дает основание полагать, что большие скорости катодонаправленных лидеров искрового канала и стримеров можно объяснить генерацией убегающих электронов в области концентрации электрического поля. Убегающие электроны при движении лидера к аноду осуществляют преионизацию области перед ним, и делают фронт плотной плазмы более размытым, чем у катодонаправленного лидера. Соответственно концентрации электрического поля перед фронтом лидера и скорость его движения уменьшаются.

В работе также показано, что катодные пятна при больших скоростях роста напряжения на промежутке

формируются при коронном разряде за время ~ 200 ps. Образование анодных пятен происходит после пробоя промежутка плотной плазмы или, возможно, в момент приближения фронта плотной плазмы к аноду.

Список литературы

- [1] Коренюгин Д.Г., Марциновский А.М., Орлов К.Е. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 20. С. 34–40.
- [2] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982.
- [3] Репин П.Б., Репьев А.Г., Данченко Н.Г. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 23. С. 51–58.
- [4] Репин П.Б., Репьев А.Г. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 78–85.
- [5] Карелин В.И., Тренькин А.А. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 37–43.
- [6] Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., and Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. N 18. P. 1261–1269.
- [7] Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе. Под ред. С.И. Яковленко. М.: Наука, 2007. Т. 63.
- [8] Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., and Rybka D.V. // Plasma Devices and Operation. 2008. Vol. 16. N 4. P. 267–298.
- [9] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [10] Wang D., Jikuya M., Yoshida S., Namihira T., Katsuki S., Akiyama H. // IEEE Trans. of Plasma Sci. 2007. Vol. 35. N 4. P. 1098–1103.