

УДК 537.523:537.527

**ВЗРЫВНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА КАТОДЕ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НАНОСЕКУНДНОГО  
ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

**Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.,  
докт. техн. наук МЕХТИЗАДЕ Р. Н., инженеры БОНДЯКОВ А. С., КЯЗУМОВ Ш. А.**

*Институт физики НАН Азербайджана*

Пробой газов при давлениях от десятков до тысяч торр под действием импульсов высокого напряжения наносекундной длительности исследуется долгое время [1, 2]. В связи с успехами техники высоковольтных наносекундных импульсов усилился интерес к наносекундным разрядам в газах. Несмотря на быстрый рост числа экспериментальных исследований [3, 4]

и технических применений [5, 6] наносекундных газовых разрядов, переход к новому временному масштабу не повлек за собой соответствующего пересмотра фундаментальных положений классических моделей пробоя, разработанных для условий, близких к статическим [7, 8], хотя еще в [3] определены качественно новые черты газовых разрядов в наносекундном диапазоне времени.

При достаточно больших перенапряжениях закономерности пробоя плотных газов в развитии всего газоразрядного процесса отличаются от закономерностей классических форм разрядов. Несоответствие общепринятым локальным моделям особенно проявляется при перенапряжениях  $\Delta \gg 1$ . Действительно, с ростом  $\Delta$  параметры разряда резко изменяются, и энергия направленного движения электронов сравнивается с полной кинетической энергией. Это приводит к тому, что на фронте стримера могут генерироваться «убегающие электроны» при  $E_0 < E_{кр}$ , где  $E_{кр}$  – критическая напряженность поля, обеспечивающая непрерывное ускорение электронов, начиная с тепловых энергий  $T_e \cong 1-10$  эВ [9]. Начиная с некоторых достаточно больших  $E_0$ , вытеснение поля на фронт стримера вследствие его поляризации осуществляется за время порядка времени движения «убегающих электронов» вблизи фронта. В результате реализуется синхронное движение области усиливающегося краевого поля и ускоряющихся электронов [10–12]. С ростом  $\Delta$  выход фотонов из лавин резко снижается [3]. Более того, при  $\Delta \gg 1$  это не является принципиальным, так как «убегающие электроны» обеспечивают высокую скорость распространения ионизованной области к аноду, а сопутствующее рентгеновское излучение, ионизуя газ и вызывая фотоэффект на катоде, обуславливает движение катодонаправленного фронта ионизации. И, наконец, поскольку при  $\Delta \gg 1$  пробой инициируется автоэлектронной эмиссией [3, 4, 12] и первичная лавина становится критической вблизи точки инициирования  $\sim 100$  мкм от катода, происходит самосогласованное усиление поля положительного объемного заряда и автоэлектронной эмиссии [13].

В [13–15] выполнены исследования оптического излучения объемных разрядов в воздухе при атмосферном давлении. В спектрах прикатодной плазмы обнаружены континуум с характерным максимумом, а также полосы второй положительной системы молекулы  $N_2$ , линии  $NI$ , линии  $NI$  (656, 285 нм) и линии атомов материала катода. В случае катода из нержавеющей стали наблюдалось более 100 линий  $FeII$  и 17 линий  $CrII$ . Линии ионов с более высокой кратностью ионизации не обнаружены.

Настоящая статья посвящена исследованию взрывных процессов на катоде при формировании наносекундного импульсного разряда в воздухе при различных параметрах газового промежутка.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Эксперименты проводились на установке, созданной на базе малогабаритного генератора импульсов напряжения 100 кВ и позволяющей проводить регистрацию наносекундных импульсов высокого напряжения, прикладываемых к газовому промежутку, с электронно-оптической хронографией свечения, сопровождающего предпробойные и пробойные процессы в промежутке. Использовалась электродная система плоский электрод – электрод с малым ра-

диусом кривизны, что обеспечивало усиление поля у потенциального электрода-катода.

Катод был выполнен в виде трубки из стальной фольги диаметром 6 мм и толщиной 110 мкм или из стального шара диаметром 9,5 мм. Плоский электрод изготовлен из латунной пластинки и соединен с корпусом камеры через шунт. В качестве плоского электрода также использовался сетчатый анод. При установке сетчатого анода фотографировалось свечение разряда в промежутке с торца.

Для регистрации импульсов напряжения использовался емкостной делитель. Ток разряда регистрировался с помощью шунта, собранного из малоиндуктивных резисторов. Для измерения электрических сигналов использовался осциллограф TDS6604 (6GHz, 20GS/s).

Датчики с осциллографом соединялись широкополосными коаксиальными кабелями.

Интегральная картина свечения разряда снималась через сетку или окно фотоаппаратом SONY A100. На генераторе имелась возможность изменять полярность импульса напряжения на электроде с малым радиусом кривизны. Измерения проводились только после длительной тренировки поверхности электродов импульсами высокого напряжения.

На газовый промежуток подавались импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой 100 кВ, фронтом около 1 нс по уровням 0,1–0,9 и шириной на полувысоте около 2 нс (рис. 1).

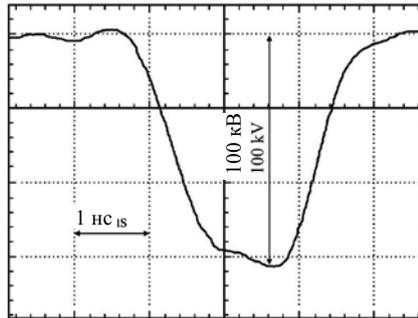


Рис. 1. Осциллограмма импульса напряжения

Импульсный разряд короткой длительности возбуждался в воздушном промежутке в резконеоднородном поле при различных давлениях воздуха  $p = 1-3$  атм. Потенциальным электродом – катодом служили стальной стержень с различным радиусом кривизны  $r = 1-4$  мм и алюминиевый шар диаметром 16 мм. В качестве анода использовалась медная пластина. На разрядный промежуток поочередно подавали импульсы отрицательной полярности с амплитудой 80 кВ и длительностью фронта 8 нс. До возбуждения разряда электроды подвергали электрохимической обработке. Два электрода (катод и графитовый) опускали в раствор дистиллированной воды (80 %) и  $\text{FeSO}_4$  (20 %). Обработка проводилась в течение 20 мин. После нее катод высушивался и подвергался воздействию импульса высокого напряжения. До возбуждения импульсного разряда и после разрядного процесса рабочая поверхность электрода тщательно исследовалась с помощью отражающего микроскопа МПСУ-1 и фотографировалась цифровой камерой SAMSUNG S 500

Digimax 5.1x. Микрофотографии рабочей поверхности катода с различными радиусами кривизны  $r = 1-8$  мм приведены на рис. 2.

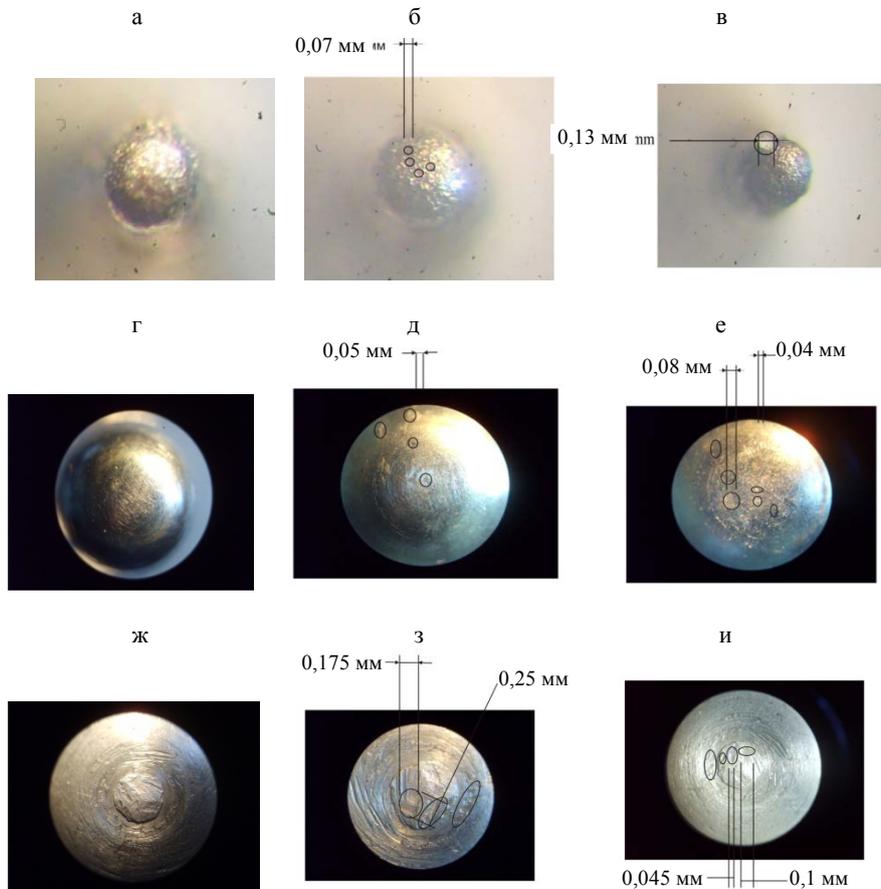


Рис. 2. Фотографии поверхностей электродов с различными радиусами кривизны до и после импульсного разряда при различных давлениях воздуха: а – стержень,  $r = 1$  мм, до разряда; б – то же,  $p = 1$  атм, после разряда; в – то же,  $p = 3$  атм, после разряда; г – стержень,  $r = 4$  мм, до разряда; д – то же,  $p = 1$  атм, после разряда; е – то же,  $p = 3$  атм, после разряда; ж – шар,  $r = 8$  мм, до разряда; з – то же,  $p = 1$  атм, после разряда; и – то же,  $p = 3$  атм, после разряда

**Результаты экспериментов.** До возбуждения наносекундного разряда на поверхности электрода имеются микрон неоднородности – вис커еры, на месте которых после взрыва образуются микрократеры диаметром 40–180 мкм. На некоторых снимках они расположены группами, а на некоторых – отдельно и окружены оплавленной поверхностью. Характер эрозии зависит как от термодинамических характеристик материала электрода, его радиуса кривизны, так и от давления газа в разрядном промежутке. При пониженных давлениях эрозия выражена меньше. Кривые зависимости размеров микрократеров от параметров газового промежутка приведены на рис. 3.

Размеры микрократеров на поверхности стержня ( $r = 1$  мм) увеличиваются с 70 мкм при  $p = 1$  атм до 130 мкм при  $p = 3$  атм. Следует отметить, что при  $p = 1$  атм микрократеры расположены группами, а при  $p = 3$  атм наблюдается единственный микрократер большего диаметра. С увеличением радиуса кривиз-

ны потенциального электрода  $r = 4$  мм и при  $p = 1$  атм размеры отдельных микрократеров несколько меньше по сравнению с  $r = 1$  мм и расположены они разрозненно по рабочей поверхности электрода. С повышением давления до  $p = 3$  атм размеры микрократеров несколько увеличиваются. Как видно из рис. 2ж–и, поверхность алюминиевого шара ( $r = 8$  мм) не идеальна. При  $p = 1$  атм после приложения к электроду импульса высокого напряжения на поверхности шара также образуются микрократеры, но значительно больших размеров. С увеличением давления воздуха до  $p = 3$  атм их размеры несколько уменьшаются.

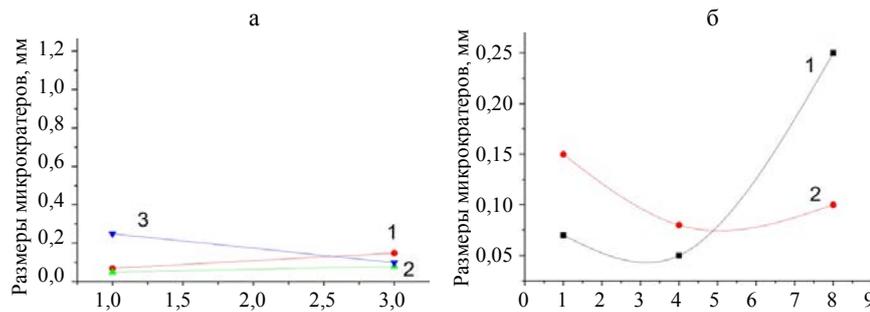


Рис. 3. Зависимость размеров микрократеров на электродах (катодах) от параметров газового промежутка: а – от давления воздуха (кривые 1–3); б – от радиуса кривизны электрода при различных давлениях воздуха; 1 –  $p = 1$  атм; 2 –  $p = 3$  атм

Следует отметить, что количество микронеоднородностей на рабочей поверхности электродов с малым радиусом кривизны ( $r = 1$  мм) намного меньше, чем на других электродах, поэтому при воздействии импульса высокого напряжения напряженность поля концентрируется на малом количестве вискеров. Это, в свою очередь, приводит к мощной взрывной эмиссии электронов с каждого отдельно взятого микроострия и, при давлениях, выше атмосферного, – к образованию на месте взрыва больших микрократеров. Усилением поля в зоне микроострий при резконеоднородном поле и при высоком давлении можно объяснить значительное увеличение размеров микрократеров на поверхности стержня ( $r = 1$  мм) при  $p = 3$  атм. С увеличением радиуса кривизны потенциального электрода количество микронеоднородностей на рабочей поверхности увеличивается. В результате этого происходит ослабление напряженности поля на отдельно взятой неоднородности, что соответственно приводит к ослаблению взрывных процессов на отдельных вискерах, уменьшению размеров микрократеров и увеличению их общей площади.

Взрывообразное изменение микрорельефа поверхности катода обусловлено в основном импульсным нагревом микровыступов током термоавтоэлектронной эмиссии критической плотности. Наряду с джоулевым нагревом микроэмиттера следует учитывать ударный разогрев ионами газоразрядной плазмы, приобретающими значительную энергию в усиленном поле вблизи микровыступа, фокусирующем ионы. Этот фактор существенно облегчает взрывную электронную эмиссию в газовом разряде.

## ВЫВОДЫ

Согласно результатам исследований можно предложить следующий механизм процессов, происходящих при формировании наносекундного импульсного разряда при повышенных давлениях воздуха. После приложения к разрядному промежутку импульса высокого напряжения происходит локальное усиление поля на микронеоднородностях потенциального электрода. Процессы бурной ионизации вблизи катода приводят к образованию лавин, на фронте которых концентрируются высокоэнергетичные электроны.

Образующийся вследствие этого положительный объемный заряд вблизи катода приводит к резкому увеличению напряженности поля и взрывным процессам с микроострий. Убегающие электроны, образующиеся в результате таких процессов, вызывают рентгеновское излучение в прикатодной плазме и осуществляют дальнейшее быстрое продвижение лавины к аноду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Neuman, M. // Phys. Rev. – 1937. – Vol. 52. – P. 652.
2. Fletcher, R. C. // Ibidem. – 1940. – Vol. 76. – P. 1501.
3. Месяц, Г. А., Бычков, Ю. И., Кремнев, В. В. // УФН. – 1972. – Т. 107. – С. 201
4. Ковальчук, Б. М. Сильноточные наносекундные коммутаторы / Б. М. Ковальчук, В. В. Кремнев, Ю. Ф. Поталицын. – Новосибирск: Наука, 1979.
5. Павловский, А. И., Босамыкин, В. С., Карелин, В. И., Никольский, В. С. // КЭ. – 1976. – Т. 3. – С. 601.
6. Павловский, А. И., Басманов, В. Ф., Босамыкин, В. С., Горохов, В. В., Карелин, В. И., Репин, П. Б. // КЭ. – 1987. – Т. 14. – С. 428.
7. Павловский, А. И., Карелин, В. И. // Вестник Киев. ун-та. – 1988. – Вып. 29. – С. 115.
8. Бабич, Л. П., Станкевич, Ю. Л. // ЖТФ. – 1972. – Т. 42. – С. 1669.
9. Аскарьян, Г. А. // Труды ФИАН СССР. – 1973. – Т. 66. – С. 66.
10. Станкевич, Ю. Л., Калинин, В. Г. // ЖТФ. – 1966. – Т. 36. – С. 1499.
11. Бабич, Л. П., Бабич, Л. П., Лойко, Т. В., Шамраев, Б. Н. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. – 1979. – Т. 22. – С. 100.
12. Бабич, Л. П., Бабич, Л. П., Лойко, Т. В., Тарасова Л. В. // Тезисы докладов 2-го симпозиума по сильноточной электронике. – Томск, 1975. – С. 69.
13. Бабич, Л. П., Березин И. А., Лойко Т. В., Тарасов М. Д., Тарасова Л. В., Чикина Р. С. // ЖТФ. – 1977. – Т. 47. – С. 195.
14. Исследования характеристик и структуры наносекундных импульсных разрядов в воздухе / Э. Д. Курбанов [и др.] // Проблемы энергетики. – 2006. – № 3–4.
15. Физические процессы в плотных газах при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения / И. П. Кужекин [и др.] // Проблемы энергетики. – Баку, 2007. – № 3. – С. 58–65.

Поступила 20.10.2011