

УДК 537.527.9

*Д.В. БЕЛОПЛОТОВ***, М.И. ЛОМАЕВ***, Д.А. СОРОКИН*, В.Ф. ТАРАСЕНКО******ДИНАМИКА СВЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА В АЗОТЕ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В МОМЕНТ ПРОБОЯ ПРОМЕЖУТКА С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛЯ¹**

Исследована динамика свечения плазмы разряда в азоте повышенного давления во время пробоя промежутка с неоднородным распределением электрического поля наносекундными импульсами напряжения от генератора РАДАН-220. Динамика свечения плазмы разряда, а именно темп изменения интенсивности свечения указывает на то, что пробой промежутка осуществляется в форме волны ионизации. Наблюдаемая динамика свечения плазмы разряда воспроизводится при обеих полярностях импульсов напряжения и в других газах повышенного давления, таких, как воздух, SF₆ и аргон с добавкой 2.5 % азота.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, азот, повышенное давление, РАДАН-220, волна ионизации.

Введение

Импульсные электрические разряды в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях в настоящее время исследуются различными научными группами, см., например, монографию [1]. Известно, что в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях различных газов можно сформировать диффузный разряд [2, 3]. Формирование диффузного разряда обусловлено генерацией убегающих электронов и рентгеновским излучением [2–5]. В зависимости от величины межэлектродного зазора, длительности и амплитуды импульса напряжения, а также других параметров в различных газах формируются или коронный разряд, или коронный разряд, который переходит в диффузный, или искровой разряд, которому предшествуют коронный разряд и диффузный [2, 3]. Начальная стадия таких разрядов изучена сравнительно слабо. Это связано в первую очередь с малой длительностью пучка убегающих электронов и вызываемого им импульса рентгеновского излучения, генерация которых обуславливает диффузный характер разряда при повышенных давлениях.

Цель данной работы – изучить начальную стадию пробоя в азоте повышенного давления. Данная работа продолжает исследования, результаты которых были опубликованы в [6]. Основное внимание в данной работе уделено регистрации излучения из различных зон вдоль разрядного промежутка, а также напряжения на промежутке и тока через промежутки.

Экспериментальная установка и методика измерения

Разрядная камера и схема эксперимента и показаны на рис. 1. Импульс напряжения от генератора РАДАН-220 [7] через короткую передающую линию (1) подавался на электрод с малым радиусом кривизны (2). Напряжение измерялось с помощью ёмкостного делителя (3), который устанавливался перед разрядным промежутком. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке составляла ~ 2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 0.5 нс. Ток разряда измерялся с помощью токового шунта (4). Потенциальный электрод (2) был изготовлен из фольги нержавеющей стали толщиной 100 мкм, свернутой в трубку диаметром 6 мм. Заземленный плоский электрод (5) располагался на расстоянии 13 мм от торца потенциального электрода.

Оптическое излучение через боковое окно (6) из различных областей разряда с помощью линзы (7) подавалось на высокоскоростной фотодиод PD025 (катод LNS20 компании Photek, время нарастания переходной характеристики ~ 80 пс), размещенный в металлическом экране (8). Перед фотодиодом устанавливался экран (9) с щелью шириной 1 мм. В плоскости щели строилось увеличенное (увеличение 2:1) изображение плазменного образования. Пространственное разрешение системы регистрации излучения из отдельных областей разрядного промежутка составляло ~ 1 мм в направлении продольной оси разрядного промежутка.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00105-а.

Сигналы с ёмкостного делителя напряжения и фотодиода подавались на осциллограф DPO70604 (6 ГГц, 25 Гвыб/с) (10).

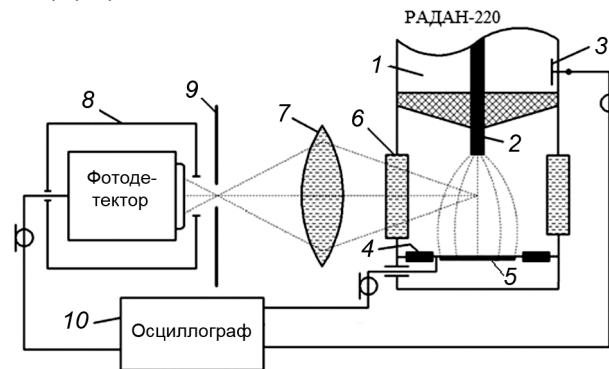


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – передающая линия генератора РАДАН-220; 2 – потенциальный электрод; 3 – ёмкостной делитель напряжения; 4 – токовый шунт; 5 – заземленный электрод; 6 – боковое окно; 7 – линза; 8 – фотоприёмник PD025 в металлическом экране; 9 – экран с щелью; 10 – осциллограф

Результаты эксперимента

В эксперименте регистрировались временные формы импульса напряжения, тока разряда и излучения из различных частей разрядного промежутка при его пробое импульсами напряжения отрицательной и положительной от генератора РАДАН-220 в азоте в диапазоне давления 0.01–0.7 МПа.

Благодаря пучку убегающих электронов в промежутке формировался диффузный разряд, который в зависимости от давления мог контрагировать через 2–5 нс. В [8–10] в этих же условиях в диапазоне давлений от 0.01–0.3 МПа в азоте, аргоне, SF_6 за фольгой регистрировался пучок убегающих электронов. С увеличением давления амплитуда пучка уменьшалась. В SF_6 пучок регистрировался до 0.05 МПа. Временные формы импульса напряжения, тока разряда, интенсивности излучения из различных частей промежутка и соответствующие им производные по времени от интенсивности представлены на рис. 2. Значения интенсивности излучения представлены в единицах мВ осциллографа. Исследование излучения из различных частей промежутка показало, что один и тот же уровень сигнала в зоне возле потенциального электрода достигается раньше, чем из зоны возле заземлённого электрода. С ростом давления задержка увеличивалась. На рис. 2, *г* представлены производные по времени от соответствующих осциллограмм импульсов излучения рис. 2, *в*, которые показывают, с каким темпом менялась во времени интенсивность излучения в разных частях промежутка. Спектральные исследования [11] показали, что спектр излучения в основном состоит из излучения второй положительной системы молекулы азота.

Темп заселения $C^3\Pi_u$ состояния молекулы азота равен темпу возбуждения этого состояния за вычетом его тушения:

$$\frac{dN_{C^3\Pi_u}(t)}{dt} = N_e(t)\alpha(E(t)/N_0)N_0 - \frac{N_{C^3\Pi_u}(t)}{\tau_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

где $N_{C^3\Pi_u}(t)$ – концентрация молекул в $C^3\Pi_u$ -состоянии, $N_e(t)$ – концентрация электронов, $\alpha(E(t)/N_0)$ – константа возбуждения, $E(t)/N_0$ – приведённая напряжённость электрического поля, N_0 – концентрация молекул в основном состоянии, τ_{eff} – эффективное время жизни молекул азота в $C^3\Pi_u$ -состоянии.

Интенсивность излучения прямо пропорционально зависит от концентрации молекул в $C^3\Pi_u$ -состоянии:

$$I(t) \sim N_{C^3\Pi_u}(t); \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} \sim \frac{dN_{C^3\Pi_u}(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $I(t)$ – интенсивность излучения.

Из формул (3) и (1) получаем

$$\frac{dI(t)}{dt} \sim \frac{dN_{C^3\Pi_u}(t)}{dt} = N_e(t)\alpha(E(t)/N_0)N_0 - \frac{N_{C^3\Pi_u}(t)}{\tau_{\text{eff}}}. \quad (4)$$

Следовательно, рис. 2, *а* в относительных единицах показывает, с каким темпом менялась концентрация молекул в $C^3\Pi_u$ -состояния. Из рис 2, *а* видно, что в тот момент времени, когда совершается пробой промежутка и в нём идут процессы ионизации, в зоне, удалённой на 1 мм от анода, $dI(t)/dt$ возрастает, достигает первого максимума, затем спадает. В момент времени, когда происходит пробой промежутка и через промежуток начинает течь ток проводимости $dI(t)/dt$ снова возрастает, достигая второго максимума, и затем снова спадает. Такое поведение $dI(t)/dt$ можно объяснить следующим образом. В правой части уравнения (4) величины $N_e(t)$ и $N_{C^3\Pi_u}(t)/\tau_{\text{eff}}$, как минимум в течение 1-й наносекунды, могут лишь только увеличиваться. В это время разность потенциалов на промежутке возрастает и в нём активно идут процессы ионизации. Однако, $\alpha(E(t)/N_0)$ сильно зависит от поля $E(t)$ и уменьшаться, если поле падает. Следовательно, произведение $N_e(t)\alpha(E(t)/N_0)N_0$ может замедлить свой рост, если поле $E(t)$ упадёт. В этом случае разница между $N_e(t)\alpha(E(t)/N_0)N_0$ и $N_{C^3\Pi_u}(t)/\tau_{\text{eff}}$ уменьшится, по сравнению с тем слу-

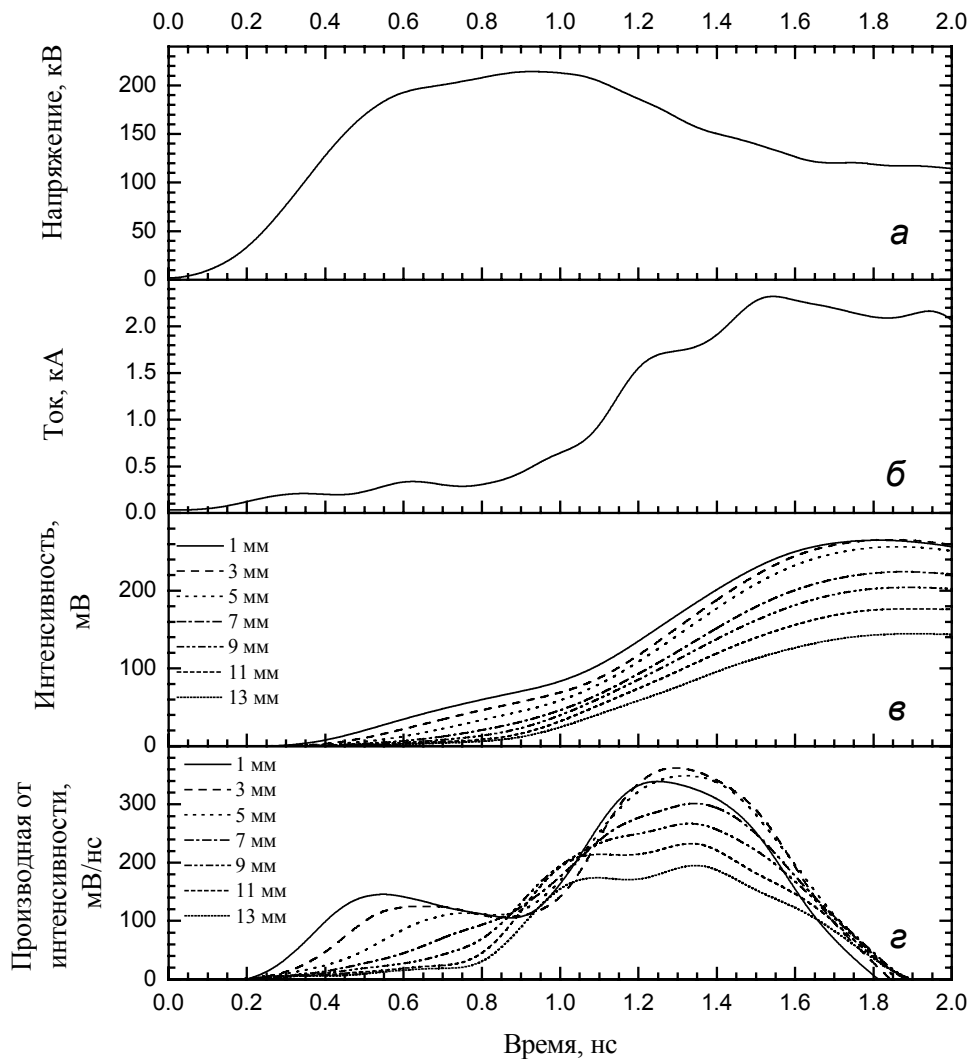


Рис. 2. Временные формы импульса напряжения (*а*), тока разряда (*б*), интенсивности излучения из различных частей промежутка (*в*) и соответствующие им производные по времени (*г*) при положительной полярности генератора РАДАН-220. Давление азота 0.7 МПа. Межэлектродный зазор 13 мм

чаем, когда поле было высоким. Можно предположить, что наблюдаемый спад $dI(t)/dt$ на рис. 2, z для зоны, удалённой на 1 мм от анода, обусловлен тем, что поле там уменьшилось. Для зоны, удалённой на 3 мм, в этот же момент времени наблюдается максимум $dI(t)/dt$, а для зоны, удалённой на 5 мм, $dI(t)/dt$ только возрастает.

Это соответствует ситуации, если по промежутку от потенциального электрода к заземлённому перемещался локальный максимум электрического поля. Другими словами перемещается волна электрического поля, то есть волна ионизации. Подтвердить или опровергнуть это предположение мог бы численный расчёт уравнения (4), в котором поле $E(t)$ задано в виде волны.

Стоит отметить, что излучение в последней четверти промежутка нарастает синхронно, когда к катоду подходит фронт волны ионизации. То есть ионизация этой части промежутка происходит практически одномоментно. Это может быть связано с тем, что, во-первых, область перед фронтом волны ионизации предыонируется убегающими электронами, мягким рентгеном и во-вторых, по мере приближения фронта волны ионизации к заземлённому электроду напряжённость поля в непробитой части промежутка возрастает и, по-видимому, достигает такого значения на всём протяжении непробитой части промежутка, при котором происходит одновременная её ионизация.

Аналогичная динамика излучения также наблюдалась при отрицательной полярности импульсов напряжения и в других газах повышенного давления (воздух, SF₆ и аргон с добавкой 2.5 % азот).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
2. Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., Tarasenko V.F. Runaway–electron–preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2009. – V. 42. – P. 185201.
3. Lomaev M.I., Tarasenko V.F., Sorokin D.A., Rybka D.V. High-pressure diffuse and spark discharge in nitrogen and air in a spatially nonuniform electronic field of high intensity // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – V. 39. – No. 11. – P. 2088–2089.
4. Tarasova L.V., Khudyakova L.N. X-Ray radiation at air pulsed discharges // J. Tech. Phys. – 1969. – V. 39. – P. 1530–1533.
5. Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F. The amplitude and current pulse duration of a super-short avalanche electron beam in air at atmospheric pressure // Instr. Exper. Techn. – 2012. – V. 55. – P. 72–77.
6. Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Начальная фаза пробоя промежутка «острие – плоскость», заполненного азотом и SF₆ повышенного давления // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 04. – С. 316–320.
7. Zagulov F.Ya., Kotov A.S., Shpak V.G., Yurike Ya.Ya., Yalandin M.I. RADAN-small-sized pulse-repetitive high-current accelerators of electrons // Prib. Tekh. Eksper. – 1989. – V. 23. – P. 146–149.
8. Tao Shao, Tarasenko V.F., Cheng Zhang, Beloplotov D.S., Wenjin Yang, Lomaev M.I., Zhongsheng Zhou, Sorokin D.A., Ping Yan. Abnormal polarity effect in nanosecond-pulse breakdown of SF₆ and nitrogen // Physics Letters A. – 2014. – V. 378. – P. 1828–1833.
9. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. Effect of Polarity of the Voltage Pulse on the Appearance of the Discharge at the Breakdown in the Non-uniform Electric Field // Physical Science International Journal. – 2014. – V. 4(5). – P. 686–691.
10. Cheng Zhang, Tarasenko V.F., Tao Shao, Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Ping Yan. Generation of super-short avalanche electron beams in SF₆ // Laser and Particle Beams. – 2014. – V. 32. – P. 331–341.
11. Lomaev M.I., Rybka D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Krivonogova K.Y. Radiative characteristics of nitrogen upon excitation by volume discharge initiated by runaway electron beam // Optics and Spectroscop. – 2009. – V. 107. – No. 1. – P. 33–40.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Белоплотов Дмитрий Викторович, аспирант;
Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Сорокин Дмитрий Алексеевич, мл. науч. сотр.;
Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией.

D.V. BELOPLOTOV, M.I. LOMAEV, D.A. SOROKIN, V.F. TARASENKO

DYNAMICS OF GLOW OF DISCHARGE PLASMA IN NITROGEN OF HIGH PRESSURE DURING BREAKDOWN OF A GAP WITH AN INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELD

Dynamics of glow of discharge plasma in nitrogen of high pressure during breakdown of a gap with an inhomogeneous electric field by high-voltages nanosecond pulses of RADAN-220 pulser was investigated. The rate of intensity change indicates that the breakdown is occurred owing to the ionization wave. Similar dynamics is repeated at both polarities of voltage pulses and at other high pressure gases such as air, SF₆ and argon with 2.5 % of nitrogen.

Keywords: *Inhomogeneous electric field, nitrogen, high pressure, RADAN-220 pulser, ionization wave.*

REFERENCES

1. Raizer Yu.P. *Physics of Gas Discharge*. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2009. [in Russian]
2. Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M A., Tarasenko V.F. (2009). Runaway– electron–preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 42, 185201.
3. Lomaev M.I., Tarasenko V.F., Sorokin D.A., Rybka D.V. (2011). High-pressure diffuse and spark discharge in nitrogen and air in a spatially nonuniform electronic field of high intensity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(11), 2088–2089.
4. Tarasova L.V., Khudyakova L.N. (1969). X-Ray radiation at air pulsed discharges. *J. Tech. Phys.*, 39, 1530–1533.
5. Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F. (2012). The amplitude and current pulse duration of a supershort avalanche electron beam in air at atmospheric pressure. *Instr. Exper. Techn.*, 55, 72–77.
6. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. (2014). Initial Stage of Breakdown of a Point-Plane Gap Filled with High-Pressure Nitrogen and SF₆. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 27(4), 324–328.
7. Zagulov F.YA., Kotov A.S., Shpak V.G., Yurike Ya.Ya., Yalandin M.I. (1989). RADAN-small-sized pulse-repetitive high-current accelerators of electrons. *Prib. Tekh. Eksp.*, 23, 146–149. [in Russian]
8. Tao Shao, Tarasenko V.F., Cheng Zhang, Beloplotov D.S., Wenjin Yang, Lomaev M.I., Zhongsheng Zhou, Sorokin D.A., Ping Yan. (2014). Abnormal polarity effect in nanosecond-pulse breakdown of SF₆ and nitrogen. *Physics Letters A*, 378, 1828–1833.
9. Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. (2014). Effect of Polarity of the Voltage Pulse on the Appearance of the Discharge at the Breakdown in the Non-uniform Electric Field. *Physical Science International Journal*, 4(5), 686–691.
10. Cheng Zhang, Tarasenko V.F., Tao Shao, Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Ping Yan. (2014). Generation of super-short avalanche electron beams in SF₆. *Laser and Particle Beams*, 32, 331–341.
11. Lomaev M.I., Rybka D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Krivonogova K.Y. (2009). Radiative characteristics of nitrogen upon excitation by volume discharge initiated by runaway electron beam. *Optics and Spectroscopy*, 107(1), 33–40.