

Люминесценция атомов и ионов алюминия при импульсно-периодическом наносекундном разряде, инициируемом убегаящими электронами, в азоте

Д.В. Белоплов, В.Ф. Тарасенко, М.И. Ломаев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 9.12.2015 г.

Исследованы спектральные и амплитудно-временные характеристики плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в азоте при давлении от 30 до 760 торр. Импульсы напряжения (амплитуда 13 кВ, длительность на полувысоте 10 нс, длительность фронта 4 нс, отрицательная полярность, частота 60 Гц) подавались на катод, изготовленный из алюминия в виде конуса с диаметром основания 6 мм, углом раствора при вершине конуса 30° и радиусом закругления вершины конуса около 0,2 мм. Плоский алюминиевый анод располагался на расстояниях 2 и 6 мм от вершины катода. В эксперименте регистрировались импульсы напряжения, ток разряда, спектральный состав и временной ход излучения плазмы разряда. При межэлектродном расстоянии 2 мм вблизи вершины катода наблюдались цветные мини-струи паров алюминия. Размер струй достигал 1 мм. Зарегистрированы интенсивные линии атомов (Al I) и ионов (Al II) алюминия с длиной волны 394,4; 396,15 нм и 622,62; 623,17; 704,21; 705,66; 706,36 нм соответственно. Длительность люминесценции Al I и Al II (более 2 мкс) превышала длительность тока разряда (около 1 мкс).

Ключевые слова: наносекундный импульсно-периодический разряд, азот, неоднородное распределение электрического поля, алюминий, струи паров металла, цветные мини-струи; nanosecond pulse-periodic discharge, nitrogen, non-uniform electric field distribution, aluminum, metal vapor jets, colored mini jets.

Введение

Высоковольтные наносекундные газовые разряды широко применяются в науке, технике и технологиях [1, 2], что обусловлено уникальными свойствами газоразрядной плазмы. В связи с этим большое внимание со стороны исследователей уделяется изучению свойств и процессов формирования плазмы газового разряда [3–6]. В недавних работах [7, 8] при исследовании разряда, инициируемого убегаящими электронами, наблюдались светящиеся образования в виде мини-струй голубого и красного цветов, берущих начало с поверхности электродов. В этих экспериментах на промежутке «трубка–плоскость», «лезвие–плоскость» и «лезвие–лезвие» длиной порядка 1 см подавались высоковольтные (≈ 250 кВ) наносекундные ($\tau_{0,5} = 2$ нс) импульсы напряжения. Голубые мини-струи наблюдались вблизи острейного электрода, в то время как красные мини-струи – вблизи плоского электрода. При этом длина струй в некоторых условиях была сопоставима с межэлектродным расстоянием. Кроме того, в одном из импульсов мини-струя красного цвета отмечалась в центре промежутка [7].

В работах [7, 8] выяснить природу этих струй по спектральному составу излучения и его временному ходу не удалось, поскольку местоположение струй менялось от импульса к импульсу. Однако в работах [9, 10] при использовании частотных наносекундных генераторов напряжения и промежутка с геометрией «острие–плоскость» были получены данные о спектральном составе и временном ходе излучения. Было установлено, что цвет мини-струй определяется переходами атомов и ионов металла, из которого изготовлен электрод. В зависимости от материала электрода наблюдались голубые (нержавеющая сталь, алюминий) и зеленые (медь) мини-струи, но не мини-струи красного цвета. В работах [7, 8] плоский электрод, вблизи которого наблюдались мини-струи красного цвета, был изготовлен из алюминия.

Цель настоящей работы – определить условия, при которых наблюдаются мини-струи красного цвета, выявить соответствующие переходы атомов и/или ионов алюминия, зарегистрировать временной ход интенсивности излучения. Стоит отметить, что данный режим горения разряда, при котором происходит интенсивное образование паров металла, в частности атомов и ионов металла в возбужденном состоянии, и их взаимодействие с окружающей газовой средой интересны с точки зрения нанесения покрытий, получения ультрадисперсных (нано-) порошков различного состава, применяемых в химии, медицине, а также при создании новых композитных материалов.

* Дмитрий Викторович Белоплов (rff.qep.bdim@gmail.com); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru).

Описание установки

Экспериментальное исследование спектральных и амплитудно-временных характеристик излучения плазмы разряда проводилось на установке, включающей в себя генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения NPG-15/2000N (амплитуда напряжения в падающей волне $U = 13-18$ кВ, длительность фронта $\tau_{\text{ф}} = 4$ нс, длительность импульса на полувысоте $\tau_{0,5} = 10$ нс, частота $f = 60-3200$ Гц, отрицательная полярность), откачиваемую разрядную камеру со встроенным емкостным делителем напряжения и токовым шунтом, спектрометр Ocean Optics HR2000+ES (рабочий диапазон длин волн $\Delta\lambda = 190-1100$ нм, спектральное разрешение $\sim 0,9$ нм), монохроматор МДР-23, ФЭУ Hamamatsu H7732-10 (диапазон чувствительности ФЭУ 185-900 нм, длительность переходной характеристики 2,2 нс), осциллограф Tektronix TDS3034 (500 МГц, 5 Гс/с), компьютер (рис. 1).

Импульсы напряжения с частотой следования 60 Гц подавались на алюминиевый катод 3, изготовленный в виде конуса с диаметром основания 6 мм, углом раствора при вершине конуса 30° и радиусом кривизны вершины $\approx 0,2$ мм. Плоский алюминиевый анод 4 располагался на расстоянии d , равном 2 и 6 мм от вершины катода. С помощью емкостного делителя напряжения 5 и токового шунта, состоящего из тонкопленочных низкоиндуктивных чип-резисторов 6, регистрировались соответственно импульсы напряжения и тока разряда. Линзами 8 на экранах с отверстием (диаметр отверстия 0,5 мм) 9 строилось увеличенное в 3 раза изображение плазмы разряда. Это позволяло осуществлять регистрацию излучения из выделенных зон разрядного промежутка с пространственным разрешением $\approx 0,17$ мм.

Для регистрации спектрального состава излучения плазмы разряда к отверстию первого экрана 9 пристыковывался световод 10, подключенный к спектрометру 11. Данные со спектрометра поступали на компьютер 15. Спектры пропускания окон 7, линз 8 и световода 10, а также спектральная чувствительность спектрометра 11 были известны и учитывались при обработке полученных спектров. Для регистрации амплитудно-временных характеристик излучения плазмы разряда за вторым экраном 9 располагался монохроматор 12, на выходе которого был установлен ФЭУ 13. Сигналы с емкостного делителя, токового шунта и ФЭУ регистрировались осциллографом 14. Осциллограф работал в режиме усреднения по 512 импульсам. Запуск осциллографа осуществлялся от сигнала с делителя напряжения. Данные с осциллографа поступали на компьютер. Разрядная камера откачивалась форвакуумным насосом, после чего заполнялась азотом. Давление p азота менялось от 30 до 760 торр.

Результаты эксперимента

При межэлектродном зазоре $d = 2$ мм из-за несогласования сопротивления плазмы разряда, волнового сопротивления кабеля и выходного сопротивления генератора падающая на промежуток волна напряжения испытывала многократные отражения от разрядного промежутка и выхода генератора. Это привело к тому, что ток разряда представлял собой последовательность коротких импульсов (пичков) с длительностью на полувысоте 10 нс (рис. 2). Период следования пичков составлял 35 нс. Полная длительность тока разряда составляла ≈ 1 мкс. При $d = 6$ мм осциллограммы импульсов напряжения

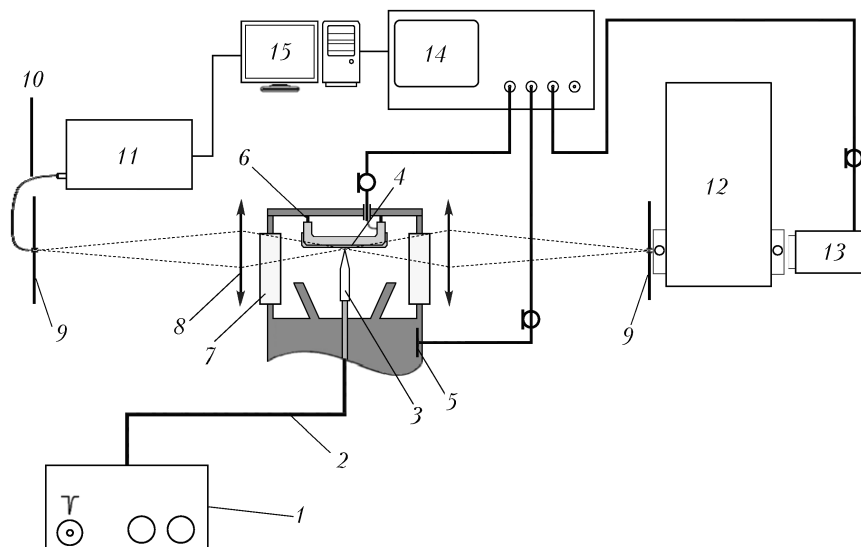


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор NPG-15/2000N; 2 – 75-омный кабель; 3 – катод; 4 – анод; 5 – емкостный делитель напряжения; 6 – чип-резисторы токового шунта; 7 – окно; 8 – линза; 9 – экран с отверстием ($\varnothing = 0,5$ мм); 10 – световод; 11 – спектрометр Ocean Optics HR2000+ES; 12 – монохроматор МДР-23; 13 – ФЭУ Hamamatsu H7732-10; 14 – осциллограф Tektronix TDS3034; 15 – компьютер

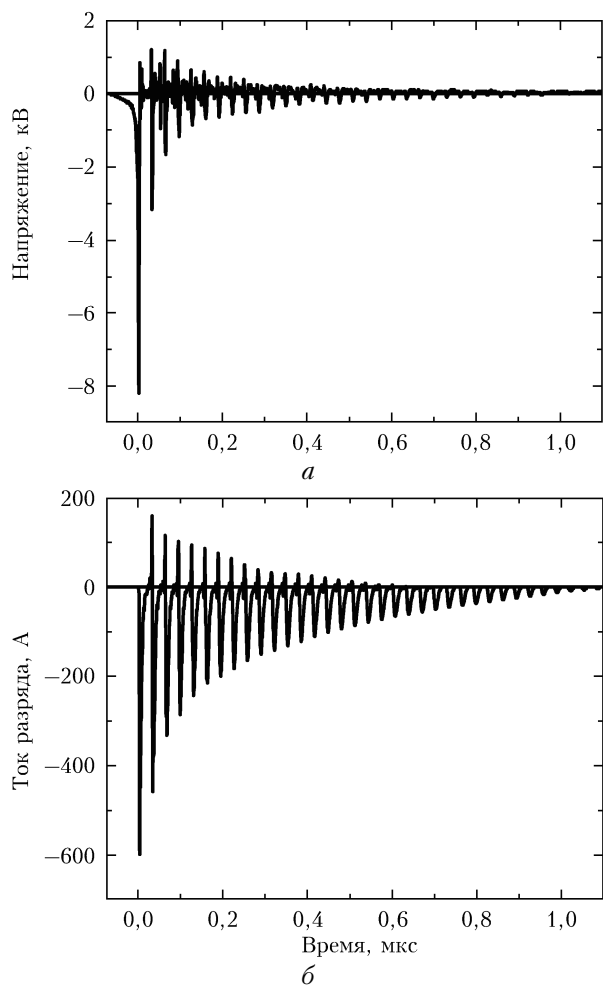


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (*а*) и тока разряда (*б*) в азоте при давлении 100 торр. Межэлектродное расстояние 2 мм

и тока разряда представляли собой последовательность 2–3 пиков. При этом полная длительность тока разряда составляла ≈ 100 нс.

При $d = 2$ мм и давлении азота до 100 торр формировался диффузный разряд. В этих условиях вблизи вершины катода наблюдалась яркосветящаяся область размером ≈ 1 мм в виде цветных мини-струй, берущих начало с катодных пятен. Основание струй имело голубой цвет, в то время как их вершина красная (рис. 3). Наблюдаемые цветные мини-струи, вероятно, являются парами металла, образующимися при взрыве микронеоднородностей на поверхности катода. Из [11] известно, что при взрыве микронеоднородностей (микроострий) образуется прикатодная плазма (катодный факел), расширяющаяся в вакууме со скоростью ~ 20 мкм/нс для катода из алюминия. Таким образом, материал катода с высокой скоростью инжектируется в пространство между электродами, где происходит возбуждение атомов и ионов металла катода. При давлении азота 100 торр и более разряд контрагировал. По мере роста давления размер цветных мини-струй уменьшался (рис. 3, *б*, *з*). Уменьшение размера струй обусловлено тем, что с ростом концентрации молекул газа

уменьшается расстояние, на которое разлетается материал катода вследствие его торможения. В режиме контракции при высоких (более 100 торр) давлениях азота токовый канал замыкался на вершину катода. В результате площадь поперечного сечения зоны токопрохождения становилась меньше, что привело к росту плотности тока разряда и как следствие к интенсификации процесса эрозии катода.

При $d = 6$ мм цветные мини-струи паров металла наблюдались только при давлении азота менее 30 торр, когда длительность тока разряда с учетом отраженных импульсов достигала 1 мкс. При давлении азота от 100 торр и выше длительность тока разряда уменьшилась до 100 нс и цветные мини-струи не наблюдались. Отметим, что при $d = 6$ мм во всем исследованном диапазоне давлений формировался диффузный разряд.

На рис. 4 представлены спектры излучения плазмы разряда из зоны вблизи вершины катода на расстоянии 0,66 мм от оси промежутка (рис. 4, *а*) и из центра промежутка (рис. 4, *б*). Далее по тексту зону вблизи вершины катода будем называть зона 1, а зону в центре разрядного промежутка — зона 2. Видно, что спектр излучения в зоне 1 представлен интенсивными линиями атома алюминия (Al I) в синей области с $\lambda = 394,4$ и $396,15$ нм, линиями иона алюминия (Al II) в УФ-области с $\lambda = 265,74$; $365,93$; $280,11$; $286,85$; $308,85$ нм, а также в красной области с $\lambda = 622,62$; $623,17$; $624,33$ и $704,21$; $705,66$; $706,36$ нм. Также наблюдаются интенсивные линии атома азота (N I) и атомарного иона азота (N II). В зоне 2 спектр излучения представлен интенсивными полосами второй положительной (2^+) системы азота ($N_2(C-B)$) и линиями N I и N II, в то время как излучение Al I в синей и Al II в красной областях спектра практически отсутствует. Таким образом, цвет наблюдаемых мини-струй (см. рис. 3) определяется излучением Al I с $\lambda = 394,4$ и $396,15$ нм, Al II с $\lambda = 622,62$; $623,17$; $624,33$ и $704,21$; $705,66$; $706,36$ нм. Идентификация линий соответствующих переходов осуществлялась посредством базы данных NIST Atomic Spectra Database [12].

На рис. 5 показан временной ход интенсивности излучения N I с $\lambda = 746,18$ нм, N II — $500,11$ нм, Al I с $\lambda = 396,17$ нм и Al II — $280,11$; $623,17$; $704,21$ нм и 2^+ -системы азота на длине волны $337,1$ нм из зоны 1. Из рис. 5, *в* видно, что 2^+ -система азота излучает в течение первых 100 нс. Как известно, 2^+ -система азота эффективно возбуждается при высоких значениях приведенной напряженности электрического поля $E/p \approx 150-200$ В/(см · торр) [13]. Столь высокие значения E/p (для данных условий эксперимента) могут достигаться при диффузном режиме горения разряда. Следовательно, в течение первых 100 нс формируется диффузный разряд, который затем, при приходе на промежуток отраженных импульсов напряжения, контрагирует. Отметим, что интенсивное излучение 2^+ -системы азота на длине волны $337,1$ нм регистрировалось вплоть до 760 торр.

Временной ход интенсивности излучения N II с $\lambda = 500,11$ нм (рис. 5, *а*, кривая 1) указывает на то,

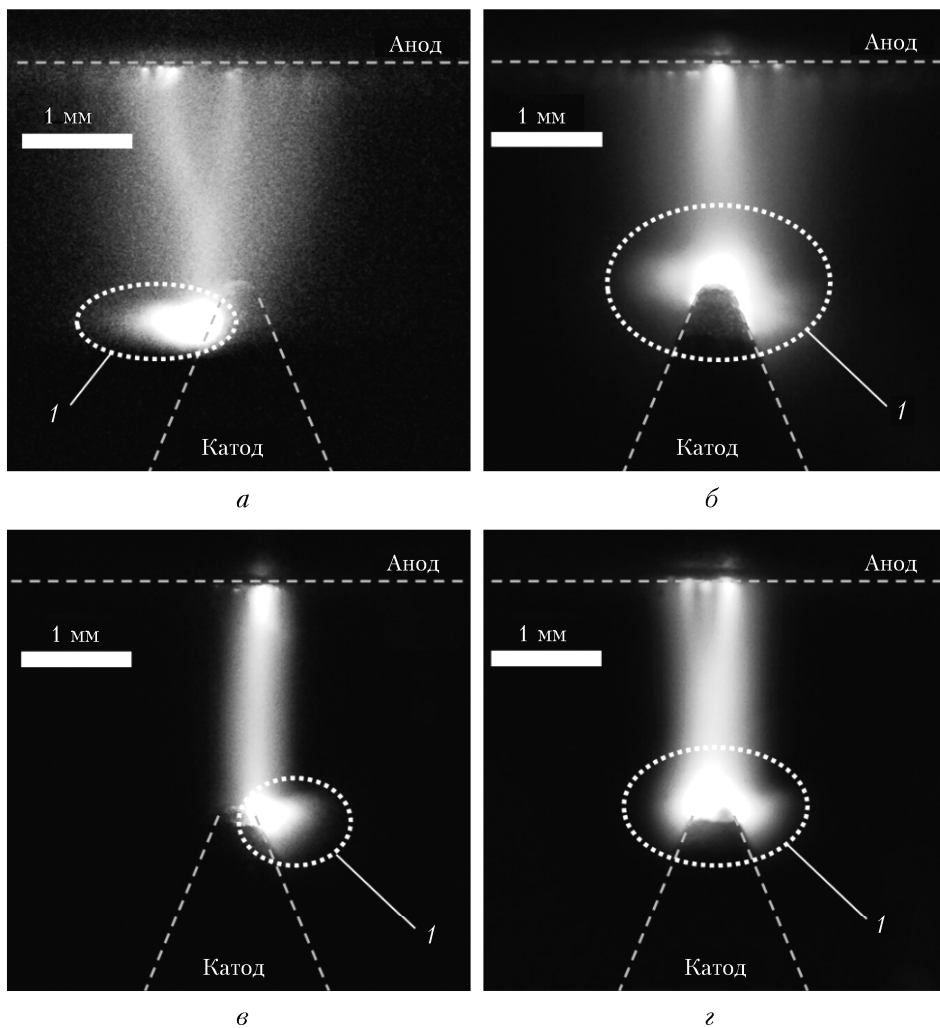


Рис. 3. Изображение свечения плазмы наносекундного импульсно-периодического разряда в азоте при давлении 30 (*а, б*) и 100 торр (*в, г*). Длительность экспозиции: *а, в* – 1/100 с; *б, г* – 1 с. 1 – цветные мини-струи паров металла. Частота следования импульсов напряжения 60 Гц. Межэлектродное расстояние 2 мм

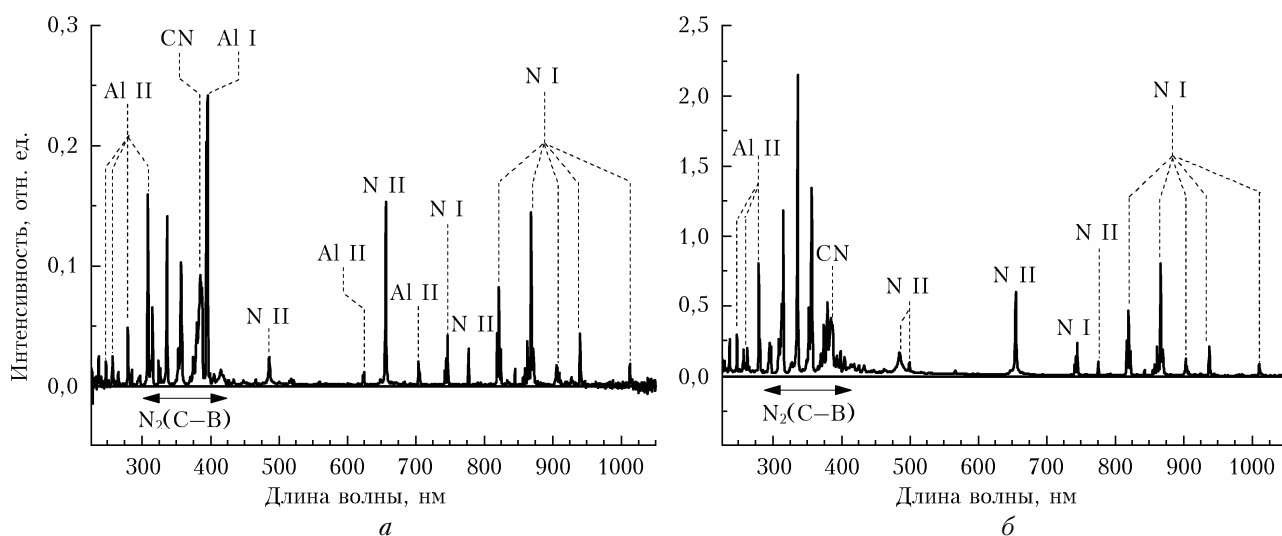


Рис. 4. Спектры излучения плазмы импульсно-периодического разряда в азоте при давлении 100 торр: *а* – на расстоянии 0,66 мм от оси разрядного промежутка вблизи вершины катода; *б* – в центре промежутка. Частота следования импульсов напряжения 60 Гц. Межэлектродное расстояние 2 мм

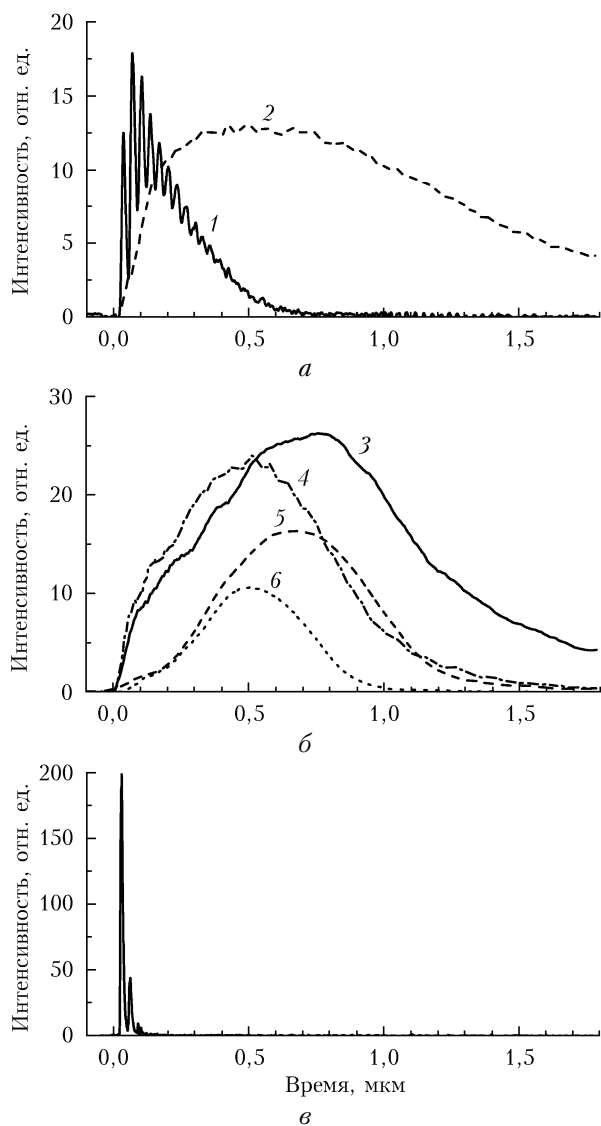


Рис. 5. Осциллограммы импульсов излучения: *а* – атомарного иона азота с $\lambda = 500,11$ нм (1) и атома азота с $\lambda = 746,18$ нм (2); *б* – атома алюминия с $\lambda = 396,17$ нм (3) и иона алюминия с $\lambda = 280,11$ (4), 623,17 (5), 704,21 нм (6); *в* – молекулы азота (2^+ -система) с $\lambda = 337,1$ нм на расстоянии 0,66 мм от оси разрядного промежутка вблизи вершины катода. Давление азота 100 торр. Межэлектродное расстояние 2 мм. Частота следования импульсов напряжения 60 Гц

что по мере развития разряда происходит наработка атомарного иона азота. Корреляция с осциллограммами импульсов напряжения и тока разряда (см. рис. 2) может свидетельствовать о частичном возбуждении N II прямым электронным ударом, в то время как временной ход интенсивности излучения N I с $\lambda = 746,18$ нм (рис. 5, *а*, кривая 2) соответствует рекомбинационному характеру возбуждения. На это также указывает длительность излучения N I (более 2 мкс), которая значительно превышает полную длительность тока разряда (~ 1 мкс).

Временной ход интенсивности излучения Al I (рис. 5, *б*, кривая 3) и Al II (кривые 4–6) также указывает на рекомбинационный характер возбуждения

соответствующих переходов. Однако в этом случае на временной ход дополнительное влияние оказывает конечная скорость разлета паров металла. Требуется определенное время на то, чтобы пары металла, образовавшиеся при взрыве микронеоднородностей на поверхности металла, достигли зоны 1, в которой осуществлялась регистрация излучения. Максимум интенсивности излучения Al I и Al II наблюдается на спаде импульса тока разряда.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что в импульсно-периодическом наносекундном разряде, инициируемом убегающими электронами, в диапазоне давлений азота от 30 до 760 торр при рассогласовании импеданса нагрузки с импедансом передающего кабеля реализуется такой режим горения разряда, при котором происходит интенсивное образование паров металла вследствие взрыва микронеоднородностей на поверхности острейшего электрода. Пары металла инжектируются в межэлектродное пространство, где происходит возбуждение атомарных и ионных линий металла. Инжектируемые в промежуток пары металла имеют вид цветных мини-струй, цвет которых определяется излучением атомов и ионов металла. Так, при использовании алюминиевых электродов цвет струй определяется излучением атома алюминия с длинами волн 394,4 и 396,15 нм, а также иона алюминия с длинами волн 622,62; 623,17; 624,33; 704,21; 705,66 и 706,36 нм. Анализ данных о временном ходе интенсивности излучения показал, что возбуждение соответствующих переходов носит рекомбинационный характер. Из экспериментальных данных также следует, что при давлениях азота 100 торр и более контрагирование разряда наступает при повторном приходе на промежуток импульса напряжения, отраженного при первом приходе. При первом приходе импульса напряжения в промежутке формируется диффузный разряд, что подтверждается интенсивным излучением второй положительной системы азота вплоть до 760 торр. В режиме согласованной нагрузки при давлении азота до 760 торр формируется диффузный разряд. Однако в этом режиме цветные мини-струи паров металла не наблюдаются.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

1. *Low temperature plasma technology: Methods and applications* / Ed. by Paul K. Chu, Xin Pei Lu. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2014. 493 p.
2. *Low Temperature Plasma. Fundamentals, Technologies, and Techniques* (2nd ed.) / Ed. by R. Hippler, H. Kersten, M. Schmidt, K.H. Schoenbach. Weinheim: Wiley, 2008. 945 p.
3. *Packan D.M.* Repetitive nanosecond glow discharge in atmospheric pressure air. Stanford: Stanford University, 2003. 164 p.
4. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges* / Ed. by V.F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 598 p.
5. *Pai D.Z., Lacoste D.A., Laux C.O.* Nanosecond repetitively pulsed discharges in air at atmospheric pressure –

- the spark regime // *Plasma Sources Sci. Techn.* 2010. V. 19, N 6. 065015.
6. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksht E.Kh., Yan P., Shut'ko Y.* Repetitive nanosecond-pulse discharge in a highly nonuniform electric field in atmospheric air: X-ray emission and runaway electron generation // *Laser Part. Beams*. 2012. V. 30, N 3. P. 369–379.
 7. *Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А.* О наблюдении в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов, миниспайтов и голубых мини-струй // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 11. С. 1017–1019.
 8. *Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F.* Mini sprites and mini blue jets in nanosecond diffuse discharge in high-pressure nitrogen // *Dev. Appl. Ocean. Eng.* 2014. V. 3. P. 63–68.
 9. *Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* О процессе излучения голубых и зеленых струй в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 4. С. 349–353; *Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Tarasenko V.F.* On the nature of radiation of blue and green jets in laboratory discharges initiated by runaway electrons // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 476–480.
 10. *Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Tarasenko V.F.* Blue and green jets in laboratory discharges initiated by runaway electrons // *J. Phys.: Conf. Series*. 2015. V. 652. 012012.
 11. *Бузаев С.П., Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Взрывная эмиссия электронов // *Успехи физ. наук*. 1975. Т. 115, № 1. С. 101–120.
 12. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J.* NIST ASD Team (2014). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.2). URL: <http://physics.nist.gov/asd> (Accessed November 9, 2015).
 13. *Тарасенко В.Ф.* Эффективность азотного УФ-лазера с накачкой самостоятельным разрядом // *Квант. электрон.* 2001. Т. 31, № 6. С. 489–494.

D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev. **Luminescence of atoms and ions of aluminum in pulse-periodic nanosecond discharge initiated by runaway electrons in nitrogen.**

Spectral and amplitude-temporal characteristics of plasma of a pulse-periodic nanosecond discharge initiated by runaway electrons in nitrogen in a pressure range 30–760 torr are investigated. Voltage pulses ($U = 13$ kV, FWHM is 10 ns, front duration is 4 ns, negative polarity, $f = 60$ Hz) applied to a cathode made of aluminum. The cathode had a cone form. Diameter of cone base, apex angle, and corner radius of cone apex were 6 mm, 30° , and 0.2 mm, respectively. A flat anode was located at distances of 2 and 6 mm from the cathode apex. Waveforms of voltage pulses, discharge current, radiation intensity, and spectra of discharge plasma were registered. At an interelectrode distance of 2 mm, colored jets of metal vapor were observed near the cathode apex throughout the pressure range. Size of jets was about 1 mm. Intense lines of atoms (Al I) and ions (Al II) of aluminum with wavelengths of 394.4; 396.15 nm and 622.62; 623.17; 704.21; 705.66; 706.36 nm were registered, respectively. Luminescence duration ($> 2 \mu\text{s}$) of the both was larger than the discharge current duration ($\sim 1 \mu\text{s}$).