

Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления с помощью лазерного монитора

Д.В. Белоплов¹, М.В. Тригуб^{2,3}, В.Ф. Тарасенко¹,
Г.С. Евтушенко³, М.И. Ломаев^{1*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 18.12.2015 г.

С помощью лазерного монитора и теневой методики на основе CuVg-лазера исследованы газодинамические процессы, протекающие при импульсно-периодическом наносекундном разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления. На катод, изготовленный из меди в виде конуса с диаметром основания 6 мм, углом раствора при вершине конуса 30° и радиусом закругления вершины конуса около 0,2 мм, подавались импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой 13 кВ с длительностью на полувысоте 10 нс и длительностью фронта 4 нс, с частотой 60–3200 Гц. Плоский заземленный анод располагался на расстоянии 2 мм от вершины катода. Установлено, что продукты плазмы разряда, содержащие пары меди, выносятся в радиальном направлении вдоль поверхности плоского электрода за 2,5 мс на расстояние 24 мм. При этом температура нагретого газа составляет $\sim 1 \cdot 10^3$ К. Использование схемы лазерного монитора в проходящем свете позволило получить контрастные изображения оптических неоднородностей, возникающих в разряде.

Ключевые слова: наносекундный импульсно-периодический разряд, воздух атмосферного давления, убегающие электроны, теневая методика, лазерный монитор, лазер на парах бромиды меди, струи паров металла, цветные мини-струи; nanosecond pulse-periodic discharge, atmospheric pressure air, runaway electrons, schlieren method, laser monitor, copper bromide laser, metal vapor jets, colored mini jets.

Введение

Импульсно-периодические высоковольтные наносекундные разряды в газах широко используются в самых разных областях науки и техники [1, 2]. Возможности применения плазмы таких разрядов определяются ее уникальными свойствами, поэтому большое внимание исследователей направлено на решение фундаментальных проблем, связанных с формированием, диагностикой, транспортировкой и осуще-

ствлением воздействия плазмы разряда на различные объекты [3, 4].

В недавних работах [5–7] исследовались спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы наносекундного импульсно-периодического разряда, инициируемого убегающими электронами, в воздухе, азоте и аргоне различного давления. На промежуток «острие–плоскость» длиной 2 мм подавались наносекундные (≈ 10 нс) импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой ≈ 13 кВ, и было установлено, что вблизи вершины острейного электрода (катода) образуются мини-струи паров металла, формирующие светящуюся область с характерным размером ~ 1 мм. Цвет этой области определялся излучением на переходах атомов и ионов металла, из которого был изготовлен катод.

* Дмитрий Викторович Белоплов (rff.qep.bdim@gmail.com); Максим Викторович Тригуб (trigub@tpu.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (evt@tpu.ru); Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru).

Длительность излучения атомов металла в несколько раз превышала длительность тока разряда. Образование мини-струй паров металла в таком разряде, по-видимому, обусловлено взрывом микрон неоднородностей на поверхности катода и выносом материала катода в межэлектродное пространство.

Наиболее любопытный результат был получен при использовании медных электродов. При разряде в азоте и воздухе наблюдалось свечение оранжевого цвета в виде «диска», образующегося из канала разряда и прилегающего к поверхности плоского электрода. Видимый размер «диска» достигал примерно 1 см. В спектре излучения этого диска наблюдались линии атомов меди. Длительность излучения атомов меди составляла ≈ 2 мс, что на 3 порядка превосходило полную длительность тока разряда. При разряде в аргоне подобного свечения не наблюдалось.

Как оказалось, длительное свечение атомов меди обусловлено резонансной передачей энергии с метастабильного уровня азота $A^3\Pi_u^+$ (время жизни относительно спонтанного излучения составляет 13 с) на уровень $3d^{10}4d$ атома меди [8]. Содержащиеся в «диске» продукты плазмы разряда осаждались на боковой поверхности разрядной камеры в виде кольца, ширина которого определялась толщиной «диска». Вынос продуктов плазмы разряда из зоны токопрохождения на значительное расстояние и последующее их осаждение на стенках разрядной камеры указывают на протекание газодинамических процессов в межимпульсный период. Поэтому целью данной работы была визуализация газодинамических процессов, происходящих в импульсно-периодическом разряде, инициируемом уходящими электронами, методами теневой съемки на основе лазерного монитора [9].

Отметим, что такой режим разряда, при котором интенсивно образуются пары металла, взаимодействующие с окружающей газовой средой, может представлять интерес с точки зрения нанесения различных покрытий, получения ультрадисперсных (нано-) порошков и пр.

Описание установки

Эксперимент проводился на установке, включавшей в себя генератор высоковольтных наносекундных импульсов напряжения NPG-15/2000N (напряжение $U = 13\text{--}18$ кВ, длительность фронта $\tau_{\text{ф}} = 4$ нс, длительность импульса на полувысоте $\tau_{0,5} = 10$ нс, частота $f = 60\text{--}3200$ Гц, отрицательная полярность), разрядную камеру, CuVg-лазер и высокоскоростную камеру. В разрядной камере были установлены электроды, изготовленные из меди. Катод имел форму конуса с диаметром основания 6 мм, углом раствора при вершине конуса 30° и радиусом закругления вершины $\approx 0,2$ мм. Плоский анод располагался на расстоянии 2 мм от вершины катода. С помощью емкостного делителя напряжения и токового шунта, изготовленного из тонкопленочных низ-

коиндуктивных чип-резисторов, регистрировались импульсы напряжения и тока разряда. CuVg-лазер имел длину активной области 50 см и диаметр 5 см. Средняя мощность излучения составляла 3 Вт, максимальная частота следования импульсов излучения 30 кГц и длительность импульса генерации по основанию 40 нс. Для возбуждения использовалась схема прямого разряда накопительного конденсатора через тиратрон [10].

Визуализация газодинамических процессов, протекающих в разрядной камере, осуществлялась с помощью теневой методики и посредством визуализации в активной оптической системе с усилителем яркости — лазерным монитором [9]. Использование схемы синхронизации позволяло регистрировать изображения, сформированные одиночным импульсом излучения CuVg-лазера, с помощью высокоскоростной камеры [11]. Несмотря на то что минимальная длительность экспозиции камеры составляет 2 мкс, каждый кадр формировался за 40 нс. Теневая методика широко используется для визуализации оптических неоднородностей и слабоконтрастных объектов. Схема визуализации газодинамических процессов, протекающих в разрядной камере, с помощью этой методики приведена на рис. 1, а.

Лазер на парах бромида меди, включающий в себя активный элемент 1 и блок питания 2, использовался для просвечивания разрядного промежутка между катодом 11 и анодом 12. С помощью коллиматора 6 диаметр лазерного пучка увеличивался в 3 раза. С помощью объектива 7 и зеркала 9 формировалось изображение разрядного промежутка на экране 10. Диафрагмой 8 отсекались те лучи, которые отклонялись возникающими оптическими неоднородностями. Схема синхронизации 3 формировала синхроимпульс для запуска высокоскоростной камеры 4. Снимки с камеры 4 сохранялись на компьютере 5.

Визуализация газодинамических процессов в разрядной камере осуществлялась также с помощью лазерного монитора. Для повышения контраста получаемых изображений использовалась схема в проходящем свете (рис. 1, б) [12]. Принцип действия лазерного монитора заключается в следующем. Активная среда лазера 1 работает в режиме сверхсветимости и через объектив 7 просвечивает разрядный промежуток между катодом 11 и анодом 12. Излучение, пройдя через него, отражается от зеркала 13 и повторно проходит через возникающие оптические неоднородности в разрядном промежутке. Линзы 7 и 14 строят изображение разрядного промежутка, яркость которого увеличивается в активной среде лазера. При этом пучки, попадающие в активную среду, дважды преломляются в разрядной камере. Изображение формируется на матрице камеры 4, для исключения насыщения используются нейтральные светофильтры 15. С помощью схемы синхронизации 3 обеспечивается регистрация изображения, формируемого одним импульсом сверхсветимости лазера. Разрядная камера заполнялась воздухом атмосферного давления.

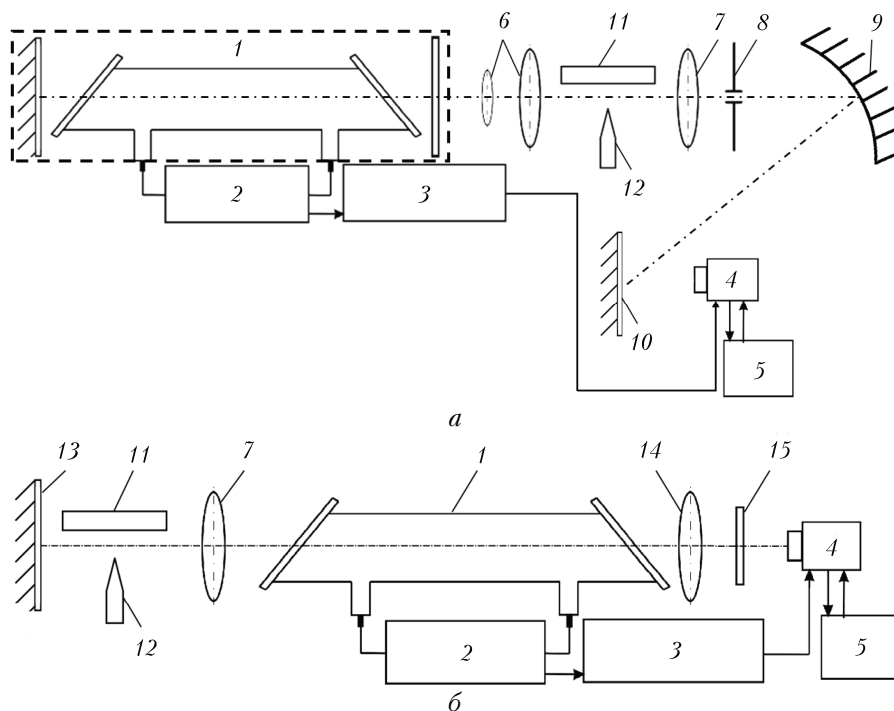


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для визуализации газодинамических процессов: *a* – теневая методика; *б* – лазерный монитор. 1 – активный элемент лазера на парах бромида меди; 2 – блок питания; 3 – схема синхронизации; 4 – высокоскоростная камера; 5 – компьютер; 6 – коллиматор; 7 – объектив; 8 – диафрагма; 9 – сферическое зеркало; 10 – экран; 11 – анод; 12 – катод; 13 – плоское зеркало; 14 – линза; 15 – нейтральный светофильтр

Результаты эксперимента

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда. Из-за рассогласования нагрузки падающая на промежуток волна напряжения испытывала многократные отражения от разрядного промежутка и выхода генератора. В результате ток разряда представлял собой последовательность коротких ($\tau_{0,5} \approx 10$ нс) импульсов (пичков) с периодом следования 35 нс. При этом полная длительность тока разряда составляла ≈ 1 мкс.

Исследование спектральных и амплитудно-временных характеристик в работах [6, 7] показали, что в течение первых 100 нс в промежутке формируется диффузный разряд, который затем, при приходе на промежуток отраженных импульсов напряжения, контрагирует и переходит в искровой режим. На это указывает интенсивное излучение второй положительной (2^+) системы азота в течение первых 100 нс, которая, как известно, эффективно возбуждается при высоких значениях приведенной напряженности электрического поля $E/p \approx 150-200$ В/(см · торр). Такие высокие значения E/p (для данных условий эксперимента) могут достигаться при диффузном режиме разряда. Формирование диффузного разряда обеспечивается за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения в предпробойной стадии [13, 14], которые обеспечивают предыонизацию газа перед фронтом плазмы, распространяющейся от катода к аноду, тем самым создавая условия для формирования диффузного разряда.

В этих условиях вблизи вершины катода наблюдались мини-струи паров металла зеленого цвета размером меньше 1 мм. В режиме лазерного монитора (см. рис. 1, б) были получены кадры, на которых видны ударная волна (рис. 3, а, б), формируемая расширяющимся искровым каналом, и пары металла (рис. 3, б, в). Отметим, что синхронизация генератора NPG-15/2000N с CuBr-лазером не осуществлялась и эксперимент проводился в режиме случайной выборки. Из рис. 3, а видно, что в результате быстрого расширения плазмы разряда из-за высокого градиента давления формируется цилиндрическая ударная волна (УВ), которая затем, как видно на рис. 3, б, переходит в полусферическую. Кроме того, удалось зафиксировать УВ и пары металла, которые на рис. 3, б видны как темные пятна. К сожалению, из-за отсутствия синхронизации генератора NPG-15/2000N с CuBr-лазером не удалось оценить скорость УВ. Однако если принять скорость УВ равной скорости звука при атмосферном давлении воздуха ≈ 340 м/с (оценка «снизу») и определить из рис. 3, б расстояние от оси разрядного промежутка до фронта УВ, то можно вычислить время, за которое УВ прошла это расстояние. В результате получаем величину ~ 1 мкс (оценка «сверху»).

На рис. 4, а представлено изображение промежутка, полученного зеркальным фотоаппаратом Sony A100 за 60 импульсов, цифрой 1 показан оранжевый «диск», описанный во введении. На рис. 4, б–д видны изображения промежутка, полученные теневой методикой в режиме случайной выборки и демонстрирующие протекание газодинамических процессов.

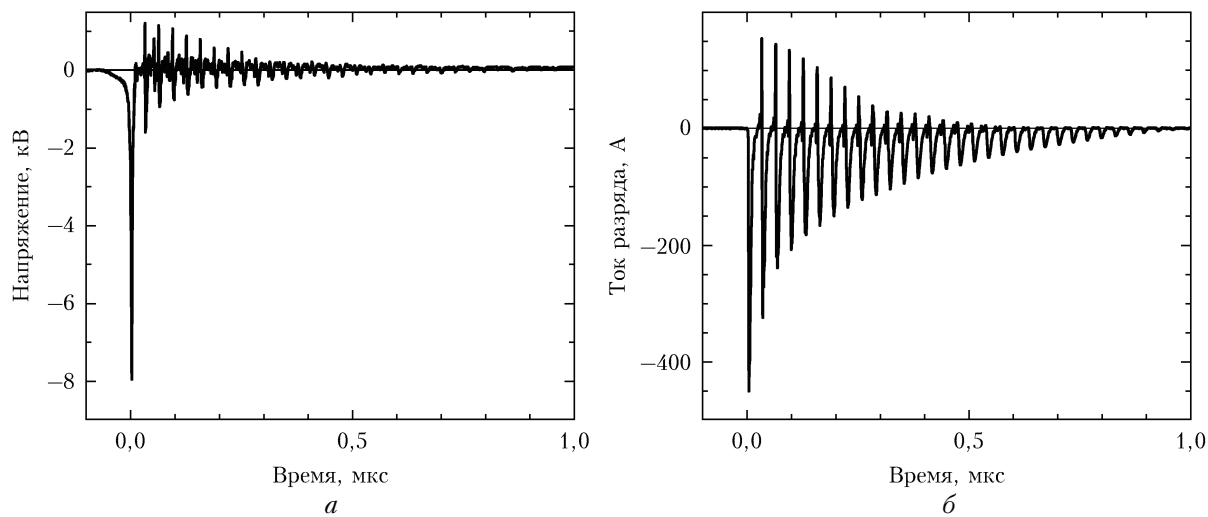


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (*а*) и тока разряда (*б*) в воздухе при атмосферном давлении. Межэлектродное расстояние 2 мм

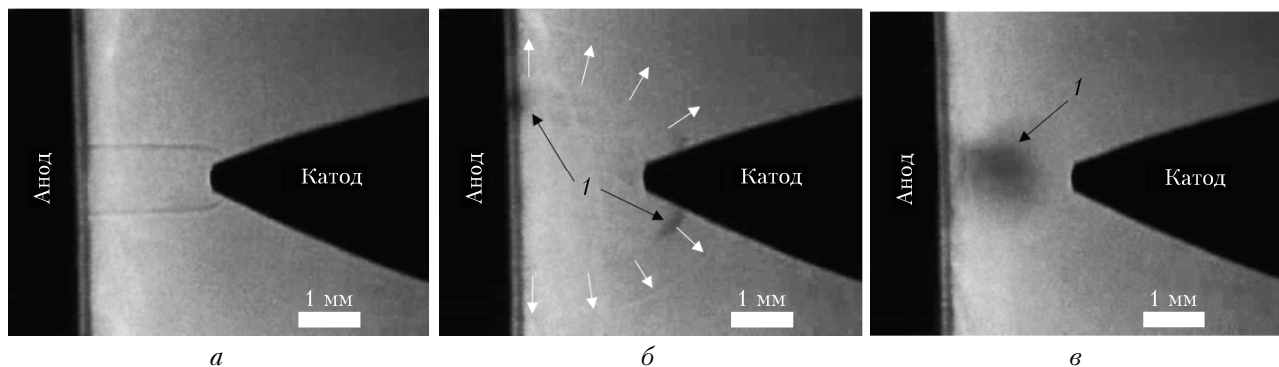


Рис. 3. Изображения разрядного промежутка, полученные с помощью лазерного монитора в режиме случайной выборки. Промежуток заполнен воздухом атмосферного давления. Белыми стрелками показано положение фронта ударной волны. 1 – пары меди

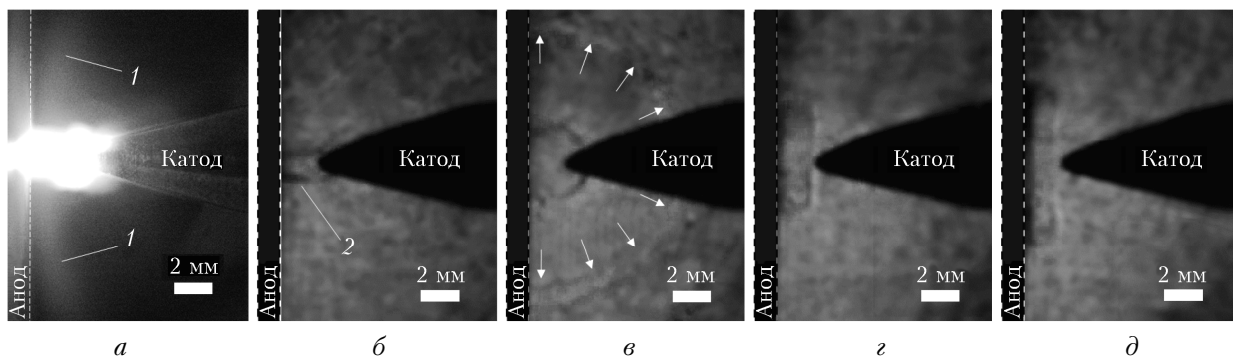


Рис. 4. Изображения разрядного промежутка, заполненного воздухом атмосферного давления: *а* – получено зеркальным фотоаппаратом Sony A100 за 60 импульсов; *б–д* – получены с помощью теневой методики в режиме случайной выборки. Белыми стрелками показано положение фронта ударной волны; 1 – оранжевый «диск», 2 – нагретый в результате протекания тока воздух

Из рис. 4 можно восстановить следующую картину. При протекании тока через промежуток происходит значительное выделение энергии, что приводит к быстрому (~ 1 мкс) разогреву газа и росту давления в зоне протекания тока. Из-за большого градиента давления разогретый газ начинает расширяться со скоростью, превышающей скорость звука, до тех

пор, пока давление p_1 внутри разогретого газа не станет равным внешнему давлению p_2 , при этом с границы разогретого газа стартует УВ. Определив примерный объем зоны токопрохождения по снимкам, полученным с помощью фотоаппарата Sony A100, и примерный объем разогретого газа в тот момент, когда его расширение прекращается, т.е. когда p_1

становится равным p_2 , используя уравнение Менделеева–Клапейрона, можно оценить температуру разогретого газа, которая составила $\sim 1 \cdot 10^3$ К. Дальнейшее расширение разогретого газа происходит в радиальном направлении, в то время как в осевом наблюдается сжатие (см. рис. 4, *з, д*). При этом со стороны катода в зону разряда поступает холодный газ с периферии. Было установлено, что длительность процесса составляет $\approx 2,5$ мс, что коррелирует с длительностью излучения атомов меди в «диске» (см. рис. 4, *а*) вследствие резонансной передачи энергии с метастабильного $A^3\Pi_u^+$ уровня азота на уровень $3d^{10}4d$ атома меди. Таким образом, с помощью теневой методики было подтверждено предположение о выносе продуктов плазмы разряда в радиальном направлении под действием газодинамических процессов.

Заключение

Исследования газодинамических процессов, протекающих при наносекундном импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления посредством визуализации с помощью лазерного монитора и теневой методики позволили установить некоторые черты данных процессов. Так, было подтверждено, что при разряде образуются пары металла, которые за временной интервал менее 1 мкс попадают в межэлектродное пространство, где происходит возбуждение атомарных и ионных линий металла. Часть этих паров вместе с продуктами плазмы разряда в течение $\approx 2,5$ мс выносятся в радиальном направлении под действием газодинамических процессов, после чего оседают на стенках газоразрядной камеры. По динамике расширения разогретого газа была оценена его температура, которая составила $\sim 1 \cdot 10^3$ К.

Работа выполнена за счет грантов Российского научного фонда, проекты № 14-29-00052, 14-19-00175.

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.

D.V. Beloplotov, M.V. Trigub, V.F. Tarasenko, G.S. Evtushenko, M.I. Lomaev. Visualization of gas-dynamic processes at a pulse-periodic discharge initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air with a laser monitor.

Gasdynamic processes that take place at a pulse-periodic discharge initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air were studied with a laser monitor based on a CuBr laser. Voltage pulses ($U = 13$ kV, FWHM is 10 ns, front duration is 4 ns, negative polarity, $f = 60\text{--}3200$ Hz) applied to a cone copper cathode with diameter of cone base, apex angle, and corner radius of cone apex of 6 mm, 30° , and 0.2 mm, respectively. A flat copper anode was located at a distance of 2 mm from the cathode. It was established that products of discharge plasma with copper vapors are transferred in radial direction along a surface of the flat anode during 2.5 ms to a distance of 24 mm. The temperature of air heated by the discharge in the moment of its expanding was $\sim 1 \cdot 10^3$ K. It was shown that use of the laser monitor in transmitted light allows obtaining contrast images of optical inhomogeneities that arise at a gas discharge.

Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде...

161

4. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges* / Ed. by V.F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 598 p.
5. *Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А.* О наблюдении в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов, мини-спрайтов и голубых мини-струй // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 1017–1019.
6. *Белоплотов Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* О природе излучения голубых и зеленых струй в лабораторных разрядах, инициируемых пучком убегающих электронов // Оптика атмосфер. 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.
7. *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.
8. *Мухеев П.А., Шепеленко А.А., Куряев Н.В., Воронцов А.И.* Люминесценция атомов меди в послесвечении глеющего разряда постоянного тока в быстром потоке азота // Сб. 3-й Междунар. симпоз. по теор. и прикладной плазмохимии. Плс. Иваново: ИГХТУ, 2002. Т. 3. С. 138–141.
9. *Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V.* Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, N 3. 033111 (5 p.).
10. *Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А.* Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1112–1115.
11. *Дашинимаева Е.З., Власов В.В., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В.* Использование лазерного монитора в визуально-измерительном контроле // Контроль. Диагностика. 2014. № 11. С. 44–47.
12. *Рыбка Д.В., Тригуб М.В., Сорокин Д.А., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф.* Особенности коронного разряда в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 306–310; *Rybka D.V., Trigub M.V., Sorokin D.A., Evtushenko G.S., Tarasenko V.F.* Corona discharge in atmospheric pressure air when using modulated voltage pulses // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 582–586.
13. *Tao S., Cheng Z., Zheng N., Ping Y., Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Shut'ko Y.V.* Diffuse discharge, runaway electron, and X-ray in atmospheric air in an inhomogeneous electric field in repetitive pulsed mode // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98, N 2. 021503. 3 p.
14. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksh E.K., Yan P., Shut'ko Y.V.* 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. 369–378.