

Нестационарные режимы тлеющего разряда в воздушной струе при атмосферном давлении*К. П. Савкин, А. Г. Николаев, Е. М. Окс, Г. Ю. Юшков, М. В. Шандриков*

Представлены результаты исследования вольт-амперной характеристики и оптических спектров тлеющего разряда атмосферного давления, функционирующего в воздушной струе с расходом до 1 л/мин. Показано, что в диапазоне токов до 100 мА и при средней мощности разряда до 50 Вт наблюдаются колебания напряжения и тока с периодом около 200 мкс, обусловленные перемещением по поверхностям электродов и изменением протяженности положительного столба разряда в потоке воздуха. В диапазоне токов от 100 до 200 мА, на фоне практически постоянного напряжения горения около 600 В, наблюдаются спонтанные переходы к режиму разряда с достаточно низким, на уровне 100 В, напряжением горения и временем жизни от нескольких сотен микросекунд, до нескольких секунд. Основной причиной появления и прекращения этого нестационарного низковольтного режима является нагрев локальных участков электродов разрядной системы в области катодного и анодного свечений до температуры плавления их материала и последующее охлаждение в результате его испарения. При токах разряда более 800 мА наблюдается появление катодных пятен и переход разряда в дуговую форму.

Ключевые слова: тлеющий разряд атмосферного давления, напряжение разряда, низковольтный режим, катодное свечение, анодное свечение, положительный столб.

Введение

Генерация плазмы при атмосферном давлении может производиться при помощи барьерного [1, 2], СВЧ-факельного [3, 4], коронного [5–7] и плазменно-струйного [8–12] разрядов. Их объединяет общий принцип нагрева молекул газа, потоки которого могут пропускаться через электродные системы этих разрядов. Наибольшие температуры

порядка тысяч градусов Цельсия достигаются при использовании мегаваттных дуговых плазмотронов [13] и мощных ВЧ-разрядов, до сотен градусов – в режиме «gliding arc» [14–17].

Применение барьерных разрядов позволяет не превышать «комнатных» значений температуры в объемах газов, где происходят процессы генерации плазмы [18]. Газоразрядная плазма при давлениях, близких к нормальному атмосферному, применяется для переработки углеводородов [19], нанесения функциональных покрытий [20], обработки материалов текстильной промышленности [21], для стерилизации и биологически активного воздействия в медицине [22–25].

В импульсном коронном разряде в воздухе атмосферного давления при наличии сильных электрических полей, создающихся наносекундными импульсами напряжения с амплитудой на уровне 300 кВ с высокими скоростями нарастания, происходит генерация пучков убегающих электронов [26]. Их возникновение происходит на фронтах распространяющихся лидеров в ветвящихся каналах коронного разряда. При торможении этих быстрых электронов на молекулах воздуха происходит генерация рентгеновского излучения [27].

Новейшим достижением в физике разрядов атмосферного давления является феномен апокамп [28–30], являющегося по сути разновидностью

Савкин Константин Петрович^{1,2}, научный сотрудник, к.т.н.
Николаев Алексей Геннадьевич^{1,2}, старший научный сотрудник, к.т.н.

Окс Ефим Михайлович^{1,3}, зав. лабораторией, зав. кафедрой, д.т.н.

Юшков Георгий Юрьевич¹, ведущий научный сотрудник, д.т.н.

Шандриков Максим Валентинович¹, научный сотрудник, к.т.н.

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. +7(3822) 49-17-76. E-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2017 г.

© Савкин К. П., Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю., Шандриков М. В., 2017

высокочастотных емкостных разрядов, функционирующих в виде плазменных струй. Однако применение разряда с апокампом позволяет моделировать плазму, генерируемую малоизученными разрядами в верхних слоях атмосферы [31].

Не ослабевает интерес к исследованию тлеющего разряда атмосферного давления в системах с двумя электродами [32–36]. Исходя из законов подобия [37], следует, что тлеющий разряд при атмосферном давлении способен генерировать плазму в достаточно малой области пространства протяженностью от нескольких десятков до сотен микрометров. Размеры привязок разрядного столба на катоде и аноде также находятся в этих пределах. Поэтому поддержание тлеющего разряда с напряжением горения 500 В и током 100 мА, типичными, например, при давлениях порядка 0,1 Па, но уже при атмосферном давлении и в непрерывном режиме, и при такой же мощности порядка 50 Вт, причем без перехода в дуговую форму является серьезной научной и технической проблемой. Плотность мощности в разрядном промежутке из-за субмиллиметровых диаметров катодной и анодной привязок токового канала составляет порядка 10^{10} Вт/м³.

В вакуумных разрядах при обеспечении плотности мощности 10^{16} Вт/м² вблизи поверхности катода за достаточно малое время, порядка 1 мкс, приводит к возникновению катодных пятен [38]. Несложно оценить, что этот импульсный способ инициирования вакуумного дугового разряда энергетически эквивалентен непрерывному тлеющему разряду при атмосферном давлении. Поэтому функционирование газового разряда с приведенными выше параметрами, но в малом объеме является достаточным для развития температурных неустойчивостей, приводящих к возникновению катодных и анодных пятен, эрозии поверхности электродов, переходу разряда в дуговой режим, срыву процесса генерации газоразрядной плазмы.

Пропускание потока плазмообразующего газа через систему разрядных электродов позволяет частично решить эти проблемы. Тем не менее, в открытых разрядных системах с плоскими электродами и с расходящимися электродами типа скользящей дуги даже при средних токах разряда менее 1 А процессы генерации разрядной плазмы являются существенно нестабильными. Это связано с тем, что пространственное положение и протяженность разрядного столба не постоянны во времени. Подобное поведение обусловлено перемещением столба под действием потока рабочего газа. Если принудительная продувка рабочего газа не производится, то токовый канал поднимается вверх вместе с потоком воздуха, нагретого в самом разряде [39].

На фоне этих процессов происходит спонтанное возникновение катодного пятна и переход разряда в дуговой режим. Если разрядный ток ограничен в цепи питания балластным сопротивлением, то одновременно с существованием диффузного столба тлеющего разряда, или независимо от него, формируется контрагированный искровой канал. Характерные времена перехода в искровой режим составляют порядка 100 нс [40] и при непрерывном режиме функционирования разряда могут быть несущественными. Тем не менее, вследствие возникновения катодных пятен, существует экспериментальный факт электрической эрозии катода и неустойчивого температурного режима в области генерации разрядной плазмы. Из-за этого возникают ограничения по потребляемой мощности и составу плазмообразующей газовой смеси.

Контроль температуры при помощи ограничения мощности в непрерывном режиме осуществляется регулировкой разрядного тока в весьма узких пределах. Более эффективным способом является смешивание малой доли молекулярных газов с гелием [41–45]. Молекула гелия не имеет колебательных и вращательных энергетических состояний. Также гелий обладает достаточно высокой теплопроводностью на уровне 152 мВт/(м К). Для сравнения, теплопроводность воздуха, при равных условиях, почти в 6 раз меньше (26,2 мВт/(м К)) [46]. Таким образом, вместе с уменьшением температуры плазмообразующего газа в разряде одновременно снижается вероятность перехода разряда в дуговую форму.

Тем не менее, возможности простейшей двухэлектродной разрядной системы, функционирующей в воздушной струе при атмосферном давлении, ещё не исчерпаны. Поэтому целью данной работы является исследование процессов генерации газоразрядной плазмы в диффузном тлеющем разряде, определение условий возникновения нестационарных режимов, в которых нарушается однородность положительного столба разряда и происходит температурная эрозия электродов.

Постановка работы

Мы применяли генератор плазмы атмосферного давления на основе двух коаксиальных электродов. В качестве плазмообразующей среды использовался «проблемный» (с точки зрения обеспечения температурной стабильности) воздух. Исследованы характеристики и особенности функционирования непрерывного газового разряда в потоке воздуха в стабильном высоковольтном режиме с типичным напряжением горения на уровне

450 В, характерным для тлеющего разряда атмосферного давления, а также в нестационарном низковольтном режиме (80–120 В), переход к которому происходил спонтанно. Этот режим сопровождался температурной эрозией электродов и имел продолжительность от десятых долей до нескольких единиц секунд.

Схема эксперимента

Устройство экспериментального макета представлено на рис. 1. Для электропитания разряда применялся источник постоянного напряжения с амплитудой до 2000 В. Нагрузкой являлась двухэлектродная разрядная система. Для разных режимов функционирования использовались балласт-

ные резисторы 1,8 кОм и 10 кОм. Измерение напряжения разряда производилось при помощи высоковольтного делителя напряжения Tektronix P6015A с соотношением плеч $R_2:R_1 = 1:1000$, измерение тока производилось при помощи низкоиндуктивного шунта 50 Ом. Сигналы с делителя напряжения и шунта подавались на вход осциллографа TDS 3014B.

Для создания воздушной струи применялся портативный компрессор 1 мембранного типа, обеспечивающий избыточное давление на уровне $0,8 \text{ кгс/см}^2$. Анализ свечения газоразрядной плазмы производился с применением оптического спектрометра 8 марки USB2000 Ocean Optics. Для фиксации изображений разряда применялась цифровая камера 10 Canon EOS 550D.

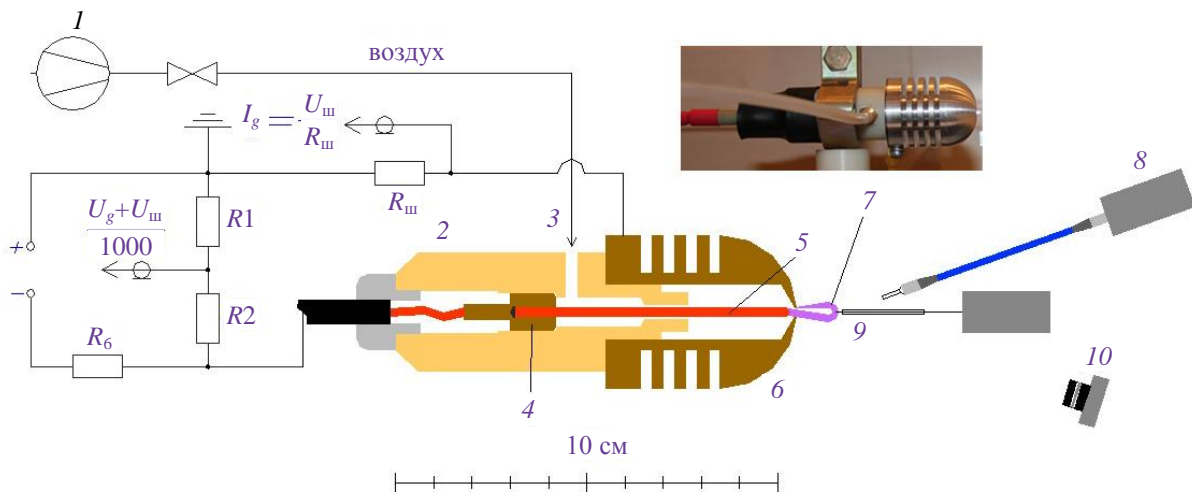


Рис. 1. Схема эксперимента и фотография генератора плазмы (1 – воздушный компрессор; 2 – изолятор; 3 – отверстие для напуска газа; 4 – держатель электрода; 5 – стержневой электрод; 6 – внешний электрод; 7 – плазма разряда; 8 – оптический спектрометр; 9 – система измерения температуры, находящаяся под плавающим потенциалом; 10 – фотокамера).

Разрядная система генератора состоит из изолятора, канала напуска газа 3, держателя электрода 4, стержневого электрода 5 и внешнего электрода 6. Для исследования влияния материалов электрода на характеристики функционирования разряда применялся внешний электрод, изготовленный из алюминиевого сплава Д16 со сменными вставками из магния, меди, нержавеющей стали, титана и тантала, а также сменные стержневые электроды из меди, магния и тантала. Диаметр электродов 5 был от 2 до 3 мм, и они были заострены со стороны, обращенной к выходному отверстию. Радиус кривизны острия составлял порядка 0,1 мм. Диаметр выходного отверстия в электроде 6 равнялся 2,5 мм. Кратчайшее расстояние между острием стержневого электрода 5 и кромкой отверстия в электроде 6 не превышало 3 мм.

Разряд стабильно функционировал при достаточно малых расходах газов на уровне 0,2–1 л/мин, при этом происходило вытеснение положительного столба за пределы электрода 6. Независимо от расхода плазменное образование имело форму вытянутой петли 7 высотой не более 8 мм.

Инициирование газового разряда производилось двумя способами: 1 – повышением напряжения источника питания до возникновения пробоя; 2 – кратковременным замыканием катода и анода при помощи внешнего проводника и последующим размыканием. В первом случае среднее значение напряжения пробоя составляло не менее 1300 В в неподвижном воздухе, но при напряжении уровня 600 В в потоке воздуха. Присутствие тлеющего разряда внутри разрядной системы в неподвижном воздухе обеспечивало стабильную генерацию плазмы в разрядном столбе за пределами сферического электрода при условии плавного увеличения газового потока.

Разряд в неподвижном воздухе и в воздушной струе

Визуальное наблюдение свечения разрядной плазмы без газовой струи вполне отчетливо позволяет различать области катодного свечения и анодной привязки, а также область свечения положительного столба (см. рис. 2). Учитывая, что диаметр отверстия в аноде составляет 2,5 мм, можно оценить характерные размеры областей тлеющего разряда, реализуемого в данной системе электродов. Диаметр катодного свечения – около 1 мм; диаметр положительного столба – около 0,6 мм; диаметр области периферийного свечения – около 1,3 мм.

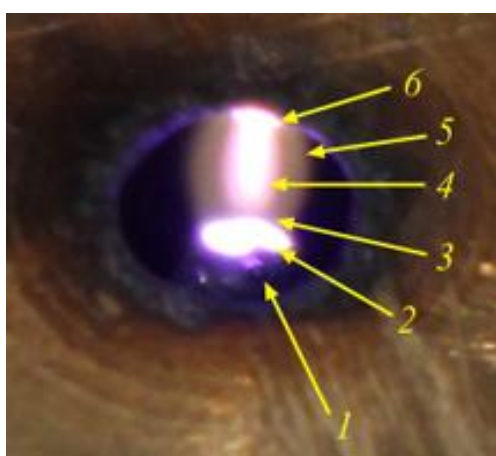


Рис. 2. Фотография интегрального свечения разряда в неподвижном воздухе: 1 – центральный стержневой электрод–катод; 2 – катодное свечение; 3 – фарадеево темное пространство; 4 – положительный столб; 5 – периферийное свечение; 6 – анодное свечение. Напряжение разряда – 420 В, ток разряда – 40 мА.

Диаметр области привязки к поверхности анода по представленным изображениям оценить не представляется возможным, поскольку в реальности данная область чрезвычайно мала и имеет очень яркое свечение. Структура разряда является типичной для тлеющих разрядов при давлении порядка 10^5 Па. Их характерным признаком является слабо выраженная область отрицательного свечения [34, 47, 48].

При пропускании воздушной струи через разрядную систему происходило вытеснение плазмы за пределы выходной апертуры в аноде, и положительный столб принимал форму вытянутой петли, «опирающейся» концами на вершину стержневого электрода – катода и острую кромку отверстия выходной апертуры сферического анода (см. рис. 3). В этом режиме фарадеево темное пространство становилось визуально неразличимо, а анодное свечение занимало участок, равный половине длины окружности выходной апертуры вследствие его частого хаотичного перемещения.

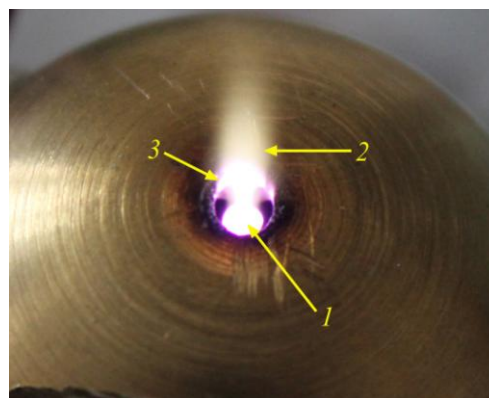


Рис. 3. Фотография интегрального свечения разряда в воздушной струе: 1 – катодное свечение; 2 – положительный столб разряда; 3 – анодное свечение. Напряжение разряда – 650 В, ток разряда – 40 мА.

При мощности разряда в воздушной струе на уровне 30 Вт была измерена температура на расстоянии 3 мм от выходной апертуры генератора плазмы. В этой точке термометра погружалась непосредственно в плазму положительного столба. Измеренное значение составляло немногим более $1500\text{ }^\circ\text{C}$, т. е. на уровне температуры плавления железа. Прямым подтверждением этому является возможность оплавления конца тонкой стальной проволоки, например, канцелярской скрепки, а также сваривания двух подобных проволок.

Модуляция напряжения и тока разряда при функционировании в воздушной струе

Несмотря на постоянное напряжение питания, при функционировании разряда наблюдалась хаотичная пилообразная модуляция напряжения (± 50 В) и тока (± 10 мА) с периодом от 100 до 200 мкс, как это видно на рис. 4. При использовании в качестве материалов анода алюминия, нержавеющей стали, титана, тантала в сочетании с медным катодом, а также при аноде и катоде, выполненных из одного материала (алюминия, магния, меди, тантала), данный эффект также присутствовал. Известно, что подобные колебания напряжения и тока разряда также наблюдались при функционировании слаботочных коаксиальных плазмотронов, функционирующих в смеси метан–воздух [19, 49]. Однако при разряде в неподвижном воздухе, а также в потоке аргона при использовании настоящей разрядной системы (рис. 1) подобная модуляция не наблюдалась.

Эксперименты с регистрацией изображений разрядной плазмы в потоках воздуха и аргона с частотой 60 с^{-1} и экспозицией в течение 8 миллисекунд показали, что при функционировании в потоке аргона положительный столб разряда менее подвижен, в отличие от случая с применением

воздушной струи. Этот экспериментальный факт следует отнести к особенностям разряда в воздушной струе, когда происходит реакция материалов электродов с кислородом и азотом с образованием диэлектрических пленок на их поверхностях. Очевидно, что в связи с этим перемещением происходило изменение длины положительного столба разряда и, вместе с ней, сопротивления разрядного канала. При увеличении сопротивления возрастало напряжение горения и снижался ток разряда. Относительно средних значений напряжения (около 560 В) и тока (около 60 мА) амплитуды модуляций составляют порядка 10–15 % соответственно. Если исходить из предположения, что электрическое сопротивление пропорционально протяженности положительного столба разряда, то оценочное изменение протяженности плазменного столба составляет не более 2 мм, что вполне выполнимо в условиях применявшейся разрядной системы.

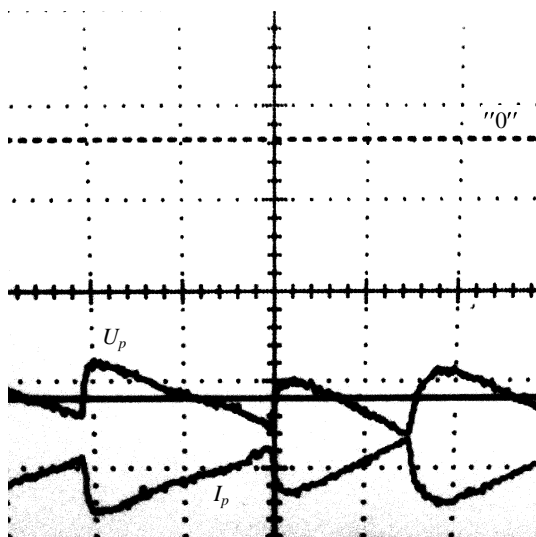


Рис. 4. Осциллограммы разряда в воздушной струе: верхний луч — напряжение разряда (200 В/дел); нижний луч — ток разряда (20 мА/дел); время — 100 мкс/дел; материал электродов — медь.

Вольт-амперные характеристики разряда

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) тлеющего разряда в неподвижном воздухе в непрерывном режиме (см. рис. 5) демонстрируют практически линейное снижение напряжения разряда от 450 В до 400 В с ростом тока от 12 мА до 78 мА. При функционировании разряда в воздушной струе напряжение горения увеличивается и в том же диапазоне разрядных токов находится в пределах от 660 В до 470 В. Кроме того, вольт-амперная характеристика становится немонотонной с минимумом при токе разряда около 70 мА. Увеличение напряжения горения обусловлено тем,

что потоком воздуха положительный столб разряда выносится за пределы эмиссионной апертуры в аноде, а при этом увеличивается его длина и, как следствие, возрастает электрическое сопротивление.

Очевидно, что данную кривую ВАХ (для разряда в воздушной среде) можно разделить на три участка. При токах разряда от 30 до 45 мА напряжение горения практически постоянно на уровне 650 В. На этом участке вид вольт-амперной характеристики напоминает ВАХ, полученную в неподвижном воздухе. В диапазоне от 45 до 70 мА наблюдается уменьшение напряжения до 470 В, причем зависимость на этом участке кривой имеет практически линейный вид. При таких значениях токов и напряжений наблюдение невооруженным глазом позволяет различить свечение нескольких разрядных каналов различной длины, но менее коротких, чем основной положительный столб. Очевидно, что эти, т. н. «второстепенные» токопроводящие каналы, шунтируют основной разрядный канал, тем самым снижая сопротивление разрядного промежутка, что приводит к уменьшению напряжения горения.

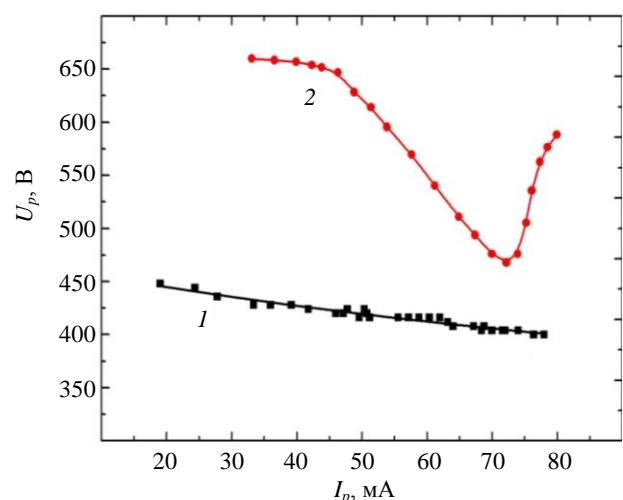


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики: 1 — разряд в неподвижном воздухе; 2 — разряд в потоке воздуха.

При токах разряда более 70 мА наблюдается относительно резкое возрастание напряжения почти до 600 В. Данный участок ВАХ характеризуется прекращением увеличения площади катодного свечения на поверхности стержневого электрода, что характерно для перехода разряда в режим аномального тлеющего.

Нестационарный низковольтный режим разряда в воздушной струе при атмосферном давлении

При токе разряда в диапазоне 100–200 мА в случайные моменты времени наблюдались спонтанные переходы к специфической форме горения,

при которой напряжение разряда уменьшалось до уровня 80–120 В и соответственно изменялся характер свечения плазмы. Продолжительность такого режима составляла от нескольких сотен микросекунд до нескольких секунд. На рис. 6 представлены типичные осциллограммы, где подобный режим длился около 1,3 с.

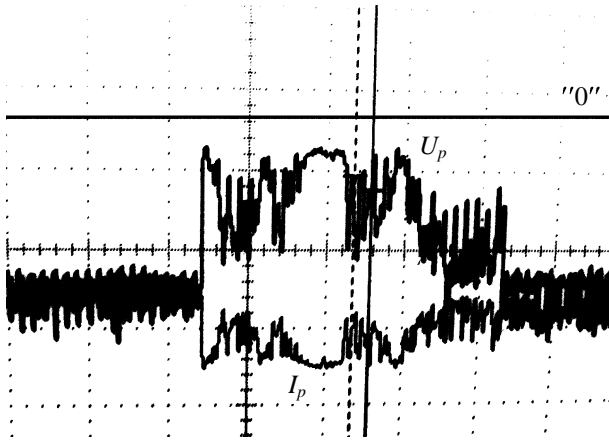


Рис. 6. Осциллограммы напряжения U_p (верхний луч, 200 В/дел) и тока I_p (нижний луч, 50 мА/дел) разряда; время — 400 мс/дел.

Исследование оптических спектров излучения разрядной плазмы подтвердило существование двух режимов: стабильного, которому соответствует спектр на рис. 7 (сверху), когда напряжение горения было на уровне 500 В, и спонтанно возникающего и прекращающегося режима с напряжением горения разряда 80–120 В (рис. 7, посере-

дине). В этом случае кроме присутствия группы линий, соответствующих второй положительной группе азота, типичной для разряда в воздухе, наблюдаются линии, соответствующие возбужденным атомам меди.

Для исследования низковольтного режима горения разряда с испарением материалов катода и анода был поставлен модельный эксперимент, когда катод и анод генератора плазмы были изготовлены из магния. Выбор в пользу этого материала сделан из-за такого параметра, как давление насыщенных паров, которое является достаточно высоким при сравнительно низкой температуре плавления [46], по сравнению с медью.

Фотографии на рис. 8 демонстрируют этапы возникновения светящихся зеленым цветом образований на электродах разрядной системы. Рис. 8, а — разряд функционирует в «газовом» режиме. Катодное свечение фиолетового цвета, свечение разрядной плазмы в большей степени диффузное. Рис. 8, б — возникает яркое бело-желтое свечение участка анода, а возможно, и катода, разрядный канал при этом из диффузного становится контрагированным. Очевидно, что это способствует разогреву участков электродов, к которым привязан столб разряда. На рис. 8, в явно присутствует зеленое свечение. Особенно заметно, как на рис. 8, г анодная привязка светится зеленым. Этому режиму соответствует оптический спектр, в котором присутствуют линии возбужденных атомов магния и одна линия однозарядных ионов магния (см. рис. 7, нижний спектр).

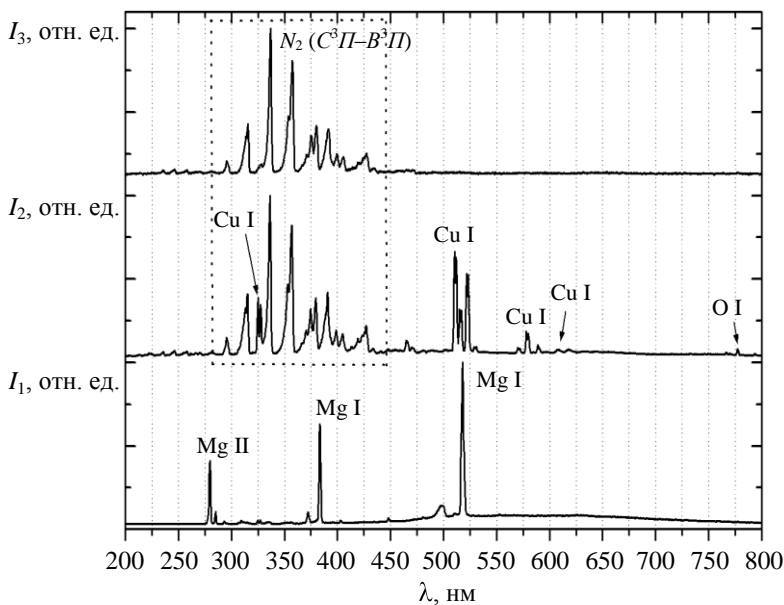


Рис. 7. Оптические спектры излучения разрядной плазмы (верхний — напряжение горения разряда $U_d = 500$ В, материал электродов — медь; посередине — $U_d = 100$ В, материал электродов — медь; нижний — $U_d = 100$ В, материал электродов — магний).

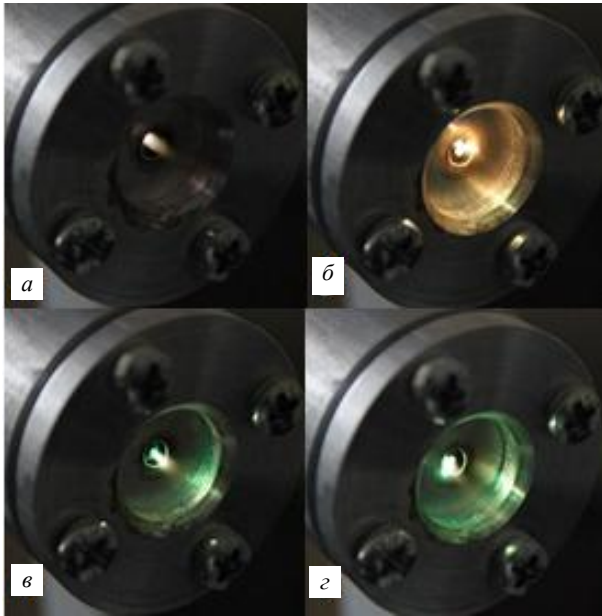


Рис. 8. Фотографии участков локального испарения магниевых электродов генератора плазмы: а – разряд функционирует в «газовом» режиме; б – возникает яркое белое свечение участка анода; в – явно присутствует зеленое свечение; г – анодная привязка светится зеленым.

Как было ранее известно [19, 50], переход тлеющего разряда атмосферного давления в низковольтную форму практически всегда обусловлен его переходом из диффузной формы к контрагированной искровой, а затем к дуговому разряду с катодными пятнами. Это происходит из-за развития взрывоэмиссионной неустойчивости на поверхности катода за времена порядка 100 нс. Длительность разряда в дуговой форме обусловлена ёмкостью электрической цепи и величиной, сопротивления, ограничивающего ток. При их характерных значениях на уровне 10^{-10} Ф и 10^4 Ом несложно оценить, что длительность функционирования разряда с катодным пятном должна составлять порядка 10^{-6} с. Однако в [50] длительность разряда в микронном зазоре, предположительно в дуговой форме, составляет около 10^{-4} с, а в [19] – на уровне 10^{-3} с, причем на фоне квазинепрерывного тлеющего разряда. Очевидно из-за такой особенности в работе [19] вводится термин «тлеющий разряд с катодным пятном», а в [50] – «гибридный дуговой/тлеющий микроразряд».

При токе разряда от 800 мА наблюдалось значительное увеличение протяженности видимого свечения плазменного образования за пределами разрядной системы на длину до 3–5 см (см. рис. 9), против 0,8–1 см при стабильном высоковольтном режиме. На фоне возникновения нестационарного режима с напряжением горения 100 В и в случайные моменты времени происходило снижение разрядного тока до уровня 200 мА за время около 20 нс (рис. 10). При этом напряжение увеличива-

лось до 600 В. Затем за время около 60 нс напряжение снижалось до уровня 250 В, а разрядный ток достигал значения 1,4 А, что немного больше порогового тока катодного пятна для меди [51]. Далее напряжение и ток разряда (после совершения затухающих колебаний за время около 200 нс) возвращались к прежним значениям на уровне 100 В и 850 мА. Это явление также наблюдалось при изменении полярности электропитания. Когда внешний электрод со сменной медной вставкой являлся катодом, светящиеся образования перемещались именно по внешней поверхности вставки. Последующий визуальный осмотр этой поверхности показал следы, характерные для катодной эрозии в дуговом разряде [51].



Рис. 9. Фотография интегрального свечения разряда в присутствии многочисленных переходов к дуговой форме, причем при среднем токе разряда 850 мА (материал электродов – медь, внешний электрод – катод).

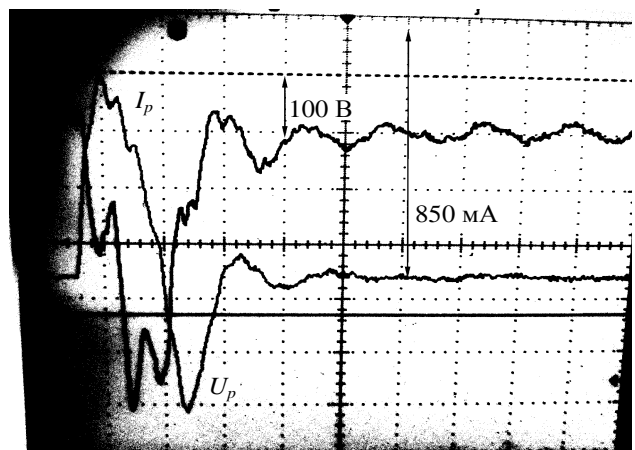


Рис. 10. Осциллограммы напряжения и тока в момент возникновения и релаксации искровой формы разряда (ток – 200 мА/дел.; напряжение – 100 В/дел.; время – 40 нс/дел.).

Уменьшение тока разряда при увеличении напряжения соответствует сжатию разрядного стол-

ба и увеличению удельной мощности в области катодной привязки. Последующее увеличение тока за достаточно малое время вызвано возникновением взрывоэмиссионных центров на катоде, а дальнейшее его снижение (при восстановлении прежнего уровня напряжения разряда) соответствует их релаксации.

В условиях настоящего исследования происходило появление катодных пятен и переход к дуговому разряду, но такой процесс не являлся преобладающим при поддержании специфического нестационарного режима, когда напряжение горения было на уровне 80–120 В, а ток разряда не более 150 мА.

Экспериментальные факты (рис. 6 и 7) не позволяют исключить определяющего влияния температурных условий разрядной системы на эмиссионные процессы. Зеленый оттенок свечения плазмы может характеризоваться появлением возбужденных атомов магния – материала, из которого изготовлены электроды разрядной системы. Очевидно, что небольшие участки их поверхности в области катодного и анодного свечений нагреваются до температуры плавления. Следствием этого является испарение атомов магния, их возбуждение и ионизация. Процесс испарения сопровождается снижением температуры, в результате чего происходит восстановление высоковольтного режима до следующего нагрева. Значения разрядного тока на уровне нескольких сотен миллиампер значительно ниже порогового тока существования катодного пятна для магния, как, впрочем, и для меди. Следовательно, переход от диффузного и высоковольтного режима (600 В) горения к нестационарному низковольтному режиму не является признаком возникновения катодных пятен в привычном их понимании применительно к дуговому разряду. По-видимому, этот переход является следствием процессов возникновения и релаксации температурных неустойчивостей на электродах разрядной системы.

Заключение

В работе исследована двухэлектродная разрядная система, функционирующая в воздушной струе при атмосферном давлении. Обнаружены процессы перехода непрерывного тлеющего разряда атмосферного давления в воздушной струе в нестационарный режим, характеризующийся временем жизни от сотен микросекунд до единиц секунд, появлением на электродах разрядной системы локальных областей с интенсивным испарением их материалов, приводящего к достаточно низкому напряжению горения разряда на уровне 100 В при токе от 100 мА до 200 мА. Спонтанный характер возникновения и прекращения данного режима

обусловлен процессами нагрева активных поверхностей электродов до температуры плавления и охлаждения под влиянием испарения.

Определенный интерес представляет дальнейшее исследование процессов, приводящих к стабилизации режима с локальным испарением материалов электродов разряда атмосферного давления в газовой струе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-48-700654-р_а. Измерение и анализ оптических спектров были выполнены при поддержке программы «Повышения конкурентоспособности ТГУ» в рамках гранта № 8.2.06.2017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelschatz U. // Plasma Chem. Plasma Process. 2003. Vol. 23. No. 1. P. 1.
2. Williamson J. M., Trump D. D., Bletzinger P., Ganguly B. N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. No. 39. P. 4400.
3. Yamamoto M., Murayama S. // Japan J. Appl. Phys. 1963. Vol. 2. P. 65.
4. Murayama S. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 5478.
5. Астафьев А. М., Кудрявцев А. А. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. № 18. С. 84.
6. Лепёхин Н. М., Присеко Ю. С., Пуресев Н. И., Филипов В. Г. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. № 12. С. 59.
7. Амиров Р. Х., Баренгольц С. А., Коростелев Е. В., Пестовский Н. В., Петров А. А., Савинов С. Ю., Самойлов И. С. // ПЖТФ. 2016. Т. 42. № 17. С. 64.
8. Walsh J. L., Kong M. G. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 111501.
9. Cao Z., Walsh J. L., Kong M. G. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 021501.
10. Tyata R. B., Subedi D. P., Shrestha A., Baral D. // Katmandu University Journal of Science. 2012. Vol. 8. No. 1. P. 15.
11. Anghel S. D., Simon A., Papiu M. A., Dinu O. E. // Rom. Journ. Phys. 2011. Vol. 56. P. 90.
12. Jiang N., Ji A., Cao Z. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 013308.
13. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.
14. Zhu J., Gao J., Li Zh., Ehn A., Aldén M., Larsson A., Kusano Yu. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 234102.
15. Korolev Yu. D., Frants O. B., Landl N. V., Bolotov A. V., Nekhoroshev V. O. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. Vol. 23. P. 054016.
16. Ozlem M. Ya., Saveliev A. V., Fridman A. A., Kennedy L. A. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 2245.
17. Kusano Y., Teodoru S., Leipold F., Andersen T. L., Sørensen B. F., Rozlosnik N., Michelsen P. K. // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202. No. 22–23. P. 5579.
18. Yang H., Lu R., Xian Y., Gan L., Lu X., Yang X. // Physics of Plasmas. 2015. Vol. 22. P. 122006.
19. Ландль Н. В., Королев Ю. Д., Франц О. Б., Гейман В. Г., Касьянов В. С., Болотов А. В. // Изв. Вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/2. С. 166.
20. Pfuch A., Horn K., Beier O., Spange S., Grünler B., Schimanski A. // Изв. Вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3/3. С. 22.

21. Akishev Yu., Grushin M., Napartovich A., Trushkin N. // *Plasmas and Polymers*. 2002. Vol. 7. No. 3. P. 261.
22. Tanaka H., Mizuno M., Toyokuni S., Maruyama S., Kodera Ya., Terasaki H., Adachi T., Kato M., Kikkawa F., Hori M. // *Physics of Plasmas*. 2015. Vol. 22. P. 122004.
23. Binenbaum Y., Ben-David G., Gil Z., Slutsker Y. Z., Ryzhkov M. A., Felsteiner J., Krasik Ya. E., Cohen J. T. // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. No. 1. P. e0169457.
24. Wu S., Cao Y., Lu X. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2016. Vol. 44. No. 2. P. 134.
25. Fridman Gr., Fridman G., Gutsol A., Shekhter A. B., Vasilets V. N., Fridman A. // *Plasmas and Polymers*. 2008. Vol. 5. P. 503.
26. Тарасенко В. Ф. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. – Томск: SST, 2015.
27. Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. № 3. С. 64.
28. Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х. // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. № 12. С. 857.
29. Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. А., Тарасенко В. Ф. // *Прикладная физика*. 2016. № 6. С. 32.
30. Панарин А. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // *Оптика и спектроскопия*. 2017. Т. 122. № 2. С. 185.
31. Соснин Э. А., Бакуит Е. Х., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. // *ПЖТФ*. 2017. Т. 105. № 10. С. 600.
32. Arkhipenko V. I., Kirillov A. A., Safronau Ya. A., Simonchik L. V., Zgirouski S. M. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. Vol. 18. P. 045013.
33. Andrade F. J., Wetzel W. C., Chan G. C.-Y., Webb M. R., Gamez G., Ray S. J., Hieftje G. M. // *J. Anal. At. Spectrom.* 2006. Vol. 21. P. 1175.
34. Machala Z., Marode E., Laux Ch. O., Kruger Ch. H. // *J. Adv. Oxid. Technol.* 2004. Vol. 7. No. 2. P. 133.
35. Jiang W., Tang J., Wang Yi., Zhao W., Duan Yi. // *Sci. Rep.* 2014. Vol. 4. P. 06323.
36. Yang Y., Shi J. J., Harry J. E., Proctor J., Garner C. P., Kong M. G. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2005. Vol. 33. No. 2. P. 302.
37. Месяц Г. А. // *УФН*. 2006. Т. 176. № 10. С. 1069.
38. Anders A., Brown I. G., MacGill R. A., Dickinson M. R. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1998. Vol. 31. P. 584.
39. Ландль Н. В., Королев Ю. Д., Франц О. Б., Гейман В. Г., Касьянов В. С., Яковлев В. В. // *Изв. Вузов. Физика*. 2014. Т. 57. № 3/2. С. 162.
40. Королев Ю. Д., Франц О. Б., Ландль Н. В., Гейман В. Г., Ененко А. А., Постников Б. В., Ломанович К. А. // *TBT*. 2010. Т. 48. № 1 (доп. выпуск). С. 35.
41. Arkhipenko V. I., Kirillov A. A., Simonchik L. V., Zgirouski S. M. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14. P. 757.
42. Mansour M. M., El-Sayed N. M., Farag O. F., Elghazaly M. H. // *Arab J. Nucl. Sci. Appl.* 2013. Vol. 46. No. 1. P. 116.
43. Arkhipenko V. I., Kirillov A. A., Simonchik L. V., Zgirouski S. M. // *J. Appl. Spectrosc.* 2005. Vol. 72. No. 4. P. 576.
44. Brandenburg R., Wagner H.-E., Michell P., Trunec D., Stahel P. / *Proceedings 26th Intern. Conf. on «Phenomena in Ionized Gases»* (Greifswald, Germany. 2003). Vol. 4. P. 45–46.
45. Sousa J. S., Niemi K., Cox L. J., Algwari Q. Th., Gans T., O'Connell D. // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109. P. 123302.
46. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. *Физические величины. Справочник*. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
47. Arkhipenko V. I., Kirillov A. A., Safronau Ya. A., Simonchik L. V., Zgirouski S. M. // *Eur. Phys. J. D*. 2012. Vol. 66. P. 252.
48. Prevosto L., Kelly H., Mancinell B., Chamorro J. C., Cejas E. // *Physics of Plasmas*. 2015. Vol. 22. P. 023504.
49. Petitpas G., Gonzalez-Aguilar J., Darmon A., Metkemeijer R., Fulcheri L. / *Proceedings Intern. Conf. on «Phenomena in Ionized Gases»* (Prague, Czech Republic. 2007). P. 1177.
50. Mitra B., Levey B., Gianchandani Yo. B. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36. No. 4. P. 1913.
51. Кесаев И. Г. *Катодные процессы электрической дуги*. — М.: Наука, 1962.

PACS: 52.80.Tn

Non-steady state modes of the atmospheric pressure glow discharge in air jet

K. P. Savkin¹, A. G. Nikolaev¹, E. M. Oks^{1,3}, G. Yu. Yushkov¹, and M. V. Shandrikov¹

¹Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia

²National Research Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

Received October 19, 2017

The results of an investigation of the current-voltage characteristic and optical spectra of a glow discharge of atmospheric pressure operating in an air jet at a flow rate of no more than 1 l/min are presented. In the current range of up to 100 mA and at an average discharge power of up to 50 W, voltage and current oscillations with a period of the order of 200 μs are observed, caused by movement along the electrode surfaces and a change in the length of the positive column of the discharge in the air flow. At the currents from 100 to 200 mA, against a background of almost constant discharge voltage of about 600 V, spontaneous transitions to the discharge mode with a low, about

100 V, discharge voltage and lifetime from several hundred microseconds to several seconds are observed. The main reason for the appearance and relaxation of this non-steady state low-voltage mode is the heating of the local portions of the electrodes in the region of the cathode and anode glow to the melting point of their material, and subsequent cooling, because of its evaporation. At discharge currents of more than 800 mA, cathode spots appear and the discharge transits into the arc.

Keywords: atmospheric pressure glow discharge, discharge voltage, low-voltage mode, cathode glow, anode glow, positive column.

REFERENCES

1. U. Kogelschatz, *Plasma Chem. Plasma Process.* **23** (1), 1 (2003).
2. J. M. Williamson, D. D. Trump, P. Bletzinger, and B. N. Ganguly, *J. Phys. D: Appl. Phys.* No. 39, 4400 (2006).
3. M. Yamamoto and S. Murayama, *Japan J. Appl. Phys.* **2**, 65 (1963).
4. S. Murayama, *J. Appl. Phys.* **39**, 5478 (1968).
5. A. M. Astaf'ev and A. A. Kudryavtsev, *Tech. Phys. Lett.* **40**, 816 (2014).
6. N. M. Lepekhin, Yu. S. Priseko, N. I. Puresev, and V. G. Filippov, *Tech. Phys. Lett.* **40**, 523 (2014).
7. R. Kh. Amirov, S. A. Barenkol'ts, E. V. Korostelev, N. V. Pestovskii, A. A. Petrov, S. Yu. Savinov, and I. S. Samoilov, *Tech. Phys. Lett.* **42**, 912 (2016).
8. J. L. Walsh and M. G. Kong, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 111501 (2008).
9. Z. Cao, J. L. Walsh, and M. G. Kong, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 021501 (2009).
10. R. B. Tyata, D. P. Subedi, A. Shrestha, and D. Baral, *Katmandu University Journal of Science.* **8** (1), 15 (2012).
11. S. D. Anghel, A. Simon, M. A. Papiu, and O. E. Dinu, *Rom. Journ. Phys.* **56**, 90 (2011).
12. N. Jiang, A. Ji, and Z. Cao, *J. Appl. Phys.* **106**, 013308 (2009).
13. A. S. Koroteev, V. M. Mironov, and Yu. S. Svirtchuk, *Plasmatrons: Design, Characteristics, Calculation* (Mashinostroenie, Moscow, 1993) [in Russian].
14. J. Zhu, J. Gao, Zh. Li, A. Ehn, M. Aldén, A. Larsson, and Yu. Kusano, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 234102 (2014).
15. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, N. V. Landl, A. V. Bolotov, and V. O. Nekhoroshev, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 054016 (2014).
16. M. Ya. Ozlem, A. V. Saveliev, A. A. Fridman, and L. A. Kennedy, *J. Appl. Phys.* **87**, 2245 (2000).
17. Y. Kusano, S. Teodoru, F. Leipold, T.L. Andersen, B. F. Sørensen, N. Rozlosnik, and P. K. Michelsen, *Surf. Coat. Technol.* **202** (22–23), 5579 (2008).
18. H. Yang, R. Lu, Y. Xian, L. Gan, X. Lu, and X. Yang, *Physics of Plasmas.* **22**, 122006 (2015).
19. N. V. Landl, Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Heiman, V. S. Kasjanov, and A. V. Bolotov, *Russian Physics Journal.* **57** (3/2), 166 (2014).
20. A. Pfuch, K. Horn, O. Beier, S. Spange, B. Grünler, and A. Schimanski, *Russian Physics Journal.* **57** (3/3), 22 (2014).
21. Yu. Akishev, M. Grushin, A. Napartovich, and N. Trushkin, *Plasmas and Polymers.* **7** (3), 261 (2002).
22. H. Tanaka, M. Mizuno, S. Toyokuni, S. Maruyama, Ya. Kodera, H. Terasaki, T. Adachi, M. Kato, F. Kikkawa, and M. Hori, *Physics of Plasmas* **22**, 122004 (2015).
23. Y. Binenbaum, G. Ben-David, Z. Gil, Y. Z. Slutsker, M. A. Ryzhkov, J. Felsteiner, Ya. E. Krasik, and J. T. Cohen, *PLoS ONE* **12**, e0169457 (2017).
24. S. Wu, Y. Cao, and X. Lu, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** (2), 134 (2016).
25. Gr. Fridman, G. Fridman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, *Plasmas and Polymers.* **5**, 503 (2008).
26. V. F. Tarasenko, *Generation of Runaway Electrons and X-rays in the Discharges of High Pressure* (SST, Tomsk, 2015) [in Russian].
27. I. D. Kostyrya, V. F. Tarasenko, A. N. Tkachev, and S. I. Yakovlenko, *Tech. Phys.* **51**, 356 (2006).
28. E. A. Sosnin, V. S. Skakun, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsin, V. F. Tarasenko, and E. Kh. Baksht, *JETP Letters.* **103**, 761 (2016).
29. M. V. Andreev, V. S. Kuznetsov, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. A. Paporin, and V. F. Tarasenko, *Prikl. Fiz. No. 6*, 32 (2016).
30. A. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Optics and Spectroscopy.* **122**, 168 (2017).
31. E. A. Sosnin, E. Kh. Baksht, V. A. Panarin, V. S. Skakun, and V. F. Tarasenko, *JETP Letters.* **105**, 641 (2017).
32. V. I. Arkhipenko, A. A. Kirillov, Ya. A. Safronau, L. V. Simonchik, and S. M. Zgirouski, *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 045013 (2009).
33. F. J. Andrade, W. C. Wetzel, G. C.-Y. Chan, M. R. Webb, G. Gamez, S. J. Ray, and G. M. Hieftje, *J. Anal. At. Spectrom.* **21**, 1175 (2006).
34. Z. Machala, E. Marode, Ch. O. Laux, and Ch. H. Kruger, *J. Adv. Oxid. Technol.* **7** (2), 133 (2004).
35. W. Jiang, J. Tang, Yi. Wang, W. Zhao, and Yi. Duan, *Sci. Rep.* **4**, 06323 (2014).
36. Y. Yang, J. J. Shi, J. E. Harry, J. Proctor, C. P. Garner, and M. G. Kong, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** (2), 302 (2005).
37. G. A. Mesyats, *Phys. Usp.* **176** (10), 1069 (2006).
38. A. Anders, I. G. Brown, R. A. MacGill, and M. R. Dickinson, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**, 584 (1998).
39. N. V. Landl, Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Heiman, V. S. Kasjanov, and V. V. Yakovlev, *Russian Physics Journal.* **57** (3/2), 162 (2014).
40. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, N. V. Landl, V. G. Geiman, A. A. Enenko, B. V. Postnikov, and K. A. Lomanovich, *High. Temp.* **48** (1), 35 (2010).
41. V. I. Arkhipenko, A. A. Kirillov, L. V. Simonchik, and S. M. Zgirouski, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 757 (2005).
42. M. M. Mansour, N. M. El-Sayed, O. F. Farag, and M. H. Elghazaly, *Arab J. Nucl. Sci. Appl.* **46** (1), 116 (2013).
43. V. I. Arkhipenko, A. A. Kirillov, L. V. Simonchik, and S. M. Zgirouski, *J. Appl. Spectrosc.* **72** (4), 576 (2005).
44. R. Brandenburg, H.-E. Wagner, P. Michell, D. Trunec, P. Stahel, in *Proceedings 26th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases* (Greifswald, Germany, 2003). Vol. 4. P. 45–46.
45. J. S. Sousa, K. Niemi, L. J. Cox, Q. Th. Algwari, T. Gans, and D. O'Connell, *J. Appl. Phys.* **109**, 123302 (2011).
46. I. S. Grigoriev and E. Z. Meylikhov, *The Physical Quantities: The Handbook* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
47. V. I. Arkhipenko, A. A. Kirillov, Ya. A. Safronau, L. V. Simonchik, and S. M. Zgirouski, *Eur. Phys. J. D.* **66**, 252 (2012).
48. L. Prevosto, H. Kelly, B. Mancinell, J. C. Chamorro, and E. Cejas, *Physics of Plasmas.* **22**, 023504 (2015).
49. G. Petitpas, J. Gonzalez-Aguilar, A. Darmon, R. Metkemeijer, L. Fulcheri, in *Proceedings Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases* (Prague, Czech Republic, 2007). P. 1177.

50. B. Mitra, B. Levey, and Yo. B. Gianchandani, IEEE Trans. Plasma Sci. **36** (4), 1913 (2008).

51. I. G. Kesaev, *Cathodic Processes of Electric Arc* (Nauka, Moscow, 1962) [in Russian].