

УДК 537.527.9
EDN: YYNZLI

PACS: 52.80.-s

Влияние влажности воздуха на излучение наносекундного разряда при пробое промежутка острière–остриière

© Д. В. Белоплов, В. Ф. Тарасенко*, А. Н. Панченко, Д. А. Сорокин

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634050 Россия*** E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru**Статья поступила в редакцию 15.01.2026; после доработки 2.02.2026; принята к публикации 20.02.2025**Шифр научной специальности: 1.3.9*

Исследованы оптические свойства наносекундных разрядов, возбуждаемых импульсами напряжения длительностью 0,7 и 13 нс, в воздухе с различной влажностью при атмосферном давлении. Изучен переход от диффузного разряда к контрагированному, который имеет неоднородное распределение излучения по длине промежутка. Получены оптические эмиссионные спектры плазмы данных разрядов в различных режимах. Подтверждено, что при наносекундном пробое возникает диффузный «канал» плазмы (диффузный разряд) в результате слияния встречных стримеров большого диаметра. Установлено, что при относительно большой длительности импульса в промежутке вначале формируется диффузный разряд, который затем контрагирует. Канал разряда при этом состоит из отдельных филаментов и характеризуется свечением белого цвета. Показано, что спектры излучения плазмы диффузного и контрагированного разрядов отличаются друг от друга наличием широкополосного континуума, а также интенсивных атомарных и ионных линий кислорода, азота, водорода и материала электродов. Установлено, что увеличение относительной влажности воздуха повышает спектральную плотность энергии излучения атомов и ионов металла и широкополосного излучения. Выдвинуто предположение, объясняющее появление широкополосного континуума во влажном воздухе при контрагированном разряде.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, наносекундный разряд, атмосферный воздух, пары воды, водородный континуум, светящиеся треки.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-41-51

Введение

Исследованиям разрядов, возбуждаемых импульсами напряжения короткой длительности посвящено большое число работ, см. монографии и обзор [1–3], а также ссылки в них. Благодаря практическому использованию таких разрядов и сложности физических процессов их исследование продолжается в настоящее время [4, 5]. При разрядах в воздухе атмосферного давления плазма, формируемая между электродами, может быть сравнительно однородной (объёмные и диффузные

разряды [1, 2, 6, 7]) или иметь форму канала с высокой степенью ионизации (искровые разряды [8, 9]).

Существует разновидность импульсных разрядов (диффузные и искровые), развивающихся при высоких напряжённостях электрического поля в коротких промежутках острière–остриière или острière–плоскость, см., например, статьи [10–13]. В работах [14–17] было установлено, в том числе с помощью ICCD камеры, что при таких разрядах спустя 5 мкс и более в промежутке наблюдаются треки частиц, вылетающих с электродов. При этом спектр

излучения плазмы таких искровых разрядов характеризуется широкополосным континуумом, а излучение неоднородно распределено как в продольном, так и в поперечном направлениях канала разряда [14]. Природа этого излучения и условия его возникновения не изучены в полной мере до сих пор. Отметим, что широкополосный континуум в воздухе при различных давлениях наблюдался во многих работах, см., например, [18, 19]. Так, в работе [18] континуум в области 250–700 нм регистрировался при импульсно-периодическом искровом разряде, тогда как при диффузном разряде наблюдались полосы второй положительной (2^+) системы молекулы азота N_2 . В статье [19] динамика излучения широкополосного континуума и полос 2^+ системы N_2 была зарегистрирована из филаментов при импульсно-периодическом поверхностном разряде. В обеих работах эксперименты проводились в воздухе атмосферного давления и континуум был отнесён к рекомбинационному. Для появления рекомбинационного континуума контрагированные разряды обеспечивают достаточную концентрацию электронов. Искровой канал или филамент имеют малый диаметр, соответственно, в нём, при достаточном электрическом поле, достигается высокая концентрация электронов. Например, в филаментах, см. работы [11, 12], концентрации электронов может достигать $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Основное отличие искрового лидера от филамента заключается в том, что искровой лидер или лидеры, стартующие с ярких точек на электродах, замыкают разрядный промежуток, образуя искровой канал, который имеет сравнительно однородное распределение свечения по длине промежутка, а филамент или несколько филаментов окружены более тёмными областями и могут формироваться на расстоянии от электродов.

Отметим, что широкополосные континуумы также регистрируются при малых удельных энерговкладах в плазменных диффузных струях белого цвета, формируемых при низком давлении воздуха, который содержит пары воды, см., например, работу [20]. Влияние влажности на характеристики различных типов разряда в воздухе и азоте атмосферного давления исследовалось во многих работах [21, 22, 23]. В статье [21] было показано, что

при разряде между двумя электродами из игл, установленными на расстоянии 2 мм, добавки паров воды существенно не влияют на температуру газа и плотность электронов. В работе [22] было установлено, что добавки паров воды к синтетическому воздуху при относительной влажности менее 30 % не влияют на динамику развития разряда и быстрый нагрев газа. Однако влияние содержания паров воды на появление широкополосного континуума, а также его природа, в этих и других работах ранее не исследовалось.

Цель данной работы – выявить влияние влажности воздуха при давлении 760 Торр на возникновение широкополосного континуума при пробое промежутка остриё–остриё импульсами напряжения наносекундной длительности, а также предложить объяснение физической природы континуума при относительно малых удельных энерговкладах.

Экспериментальная установка и методики

Для исследования характеристик разряда применялась установка, показанная на рис. 1, применённая ранее в работах [14–17] для изучения пробоя в различных газах.

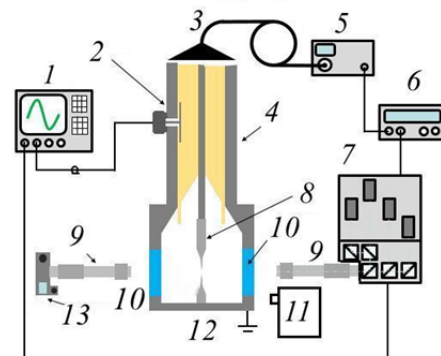


Рис. 1. Схема установки. 1 – осциллограф, 2 – ёмкостный делитель напряжения, 3 – высоковольтный коаксиальный кабель (75 Ом), 4 – коаксиальная передающая линия (75 Ом), 5 – импульсный генератор, 6 – цифровой генератор задержек, 7 – 4-канальная ICCD камера, 8 – высоковольтный электрод, 9 – длиннофокусный микроскоп, 10 – кварцевые окна, 11 – спектрометр, 12 – заземлённый электрод, 13 – фотоаппарат

Fig. 1. Setup diagram. 1 – oscilloscope, 2 – capacitive voltage divider, 3 – high-voltage coaxial cable (75 Ohm), 4 – coaxial transmission line (75 Ohm), 5 – pulse generator, 6 – digital delay generator, 7 – 4-channel ICCD camera, 8 – high-voltage electrode, 9 – long-focus microscope, 10 – quartz windows, 11 – spectrometer, 12 – grounded electrode, 13 – camera

Газоразрядная камера имела короткую передающую линию 4 со встроенным ёмкостным делителем напряжения 2, регистрирующим импульсы напряжения, подаваемые на промежутки. Необходимо отметить, что двойное время пробега волной напряжения расстояния от ёмкостного делителя напряжения до промежутка составляло $\approx 0,75$ нс. В результате в зоне делителя происходило наложение фронта импульса напряжения, отражённого от промежутка, на спад падающего импульса. Ток разряда измерялся токовым шунтом из тонкоплёночных SMD-резисторов (Vishay Intertechnology), выложенных по периметру электрода 12. Сопротивление шунта составляло 8,7 мОм. По бокам разрядной камеры были установлены две круглые кварцевые (КУ-1) пластинки 10, для вывода оптического излучения плазмы разряда наружу.

Наносекундные импульсы напряжения от генератора отрицательной полярности ГИН-55-01 или от генератора ГИН-50-1 положительной полярности подавались на вход

передающей линии разрядной камеры по коаксиальному кабелю 3 с волновым сопротивлением 75 Ом. Характеристики режимов работы генераторов и FID технология их создания описаны в работе [24]. Генератор ГИН-55-01 формировал импульсы длительностью на полувысоте $\tau_{0,5} \approx 0,7$ нс, временем нарастания $\tau_{0,1-0,9} \approx 0,7$ нс и амплитудой в падающей волне U_0 до 35 кВ. На рис. 2 показаны импульсы напряжения и тока, полученные при разряде в воздухе при давлении $p = 760$ Торр в режиме однократных импульсов.

Из-за отсутствия согласования импедансов генератора и газоразрядной нагрузки импульс напряжения испытывал отражения как от промежутка, так и от генератора, сопротивление которого за время до прихода отражённого импульса уменьшалось до малой величины. В результате импульсы напряжения возвращались на промежуток после отражений от генератора ГИН-55-01 через ≈ 50 нс и каждый раз меняли полярность.

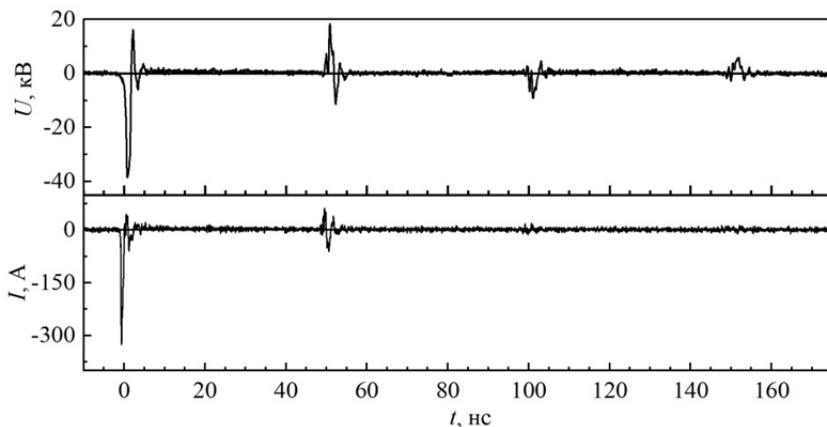


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока разряда I при давлении воздуха 760 Торр полученные с использованием генератора ГИН-55-01. Режим однократных импульсов. $U_0 = -33$ кВ

Fig. 2. Waveforms of voltage pulses U and discharge current I at an air pressure of 760 Torr obtained using the GIN-55-01 generator. Single pulse mode. $U_0 = -33$ kV

На рис. 2 показаны первые импульсы напряжения и тока, а также по три отражённых. При давлении воздуха 760 Торр и напряжении в падающей волне генератора $U_0 = 33$ кВ во время первого импульса энергоклад в плазму составил ≈ 4 мДж. Энергия в падающей волне равнялась 8,4 мДж. Из осциллограмм видно, что амплитуда тока разряда во втором импульсе уменьшилась в ≈ 5 раз.

Генератор ГИН-50-1 формировал импульсы напряжения с длительностью на полувысоте 13 нс, фронтом 2,2 нс и амплитудой в падающей волне до +25 кВ. На рис. 3 показаны импульсы напряжения и тока в двух временных масштабах, полученные в режиме однократных импульсов при $p = 760$ Торр.

Энергия в импульсе генератора ГИН-50-1 при $U_0 = +16$ кВ равнялась 41 мДж. При этом во время первого импульса напряжения энергоклад в газ составлял ≈ 27 мДж (65 % энергии импульса). Особенностью режима возбуждения с данным генератором являлось увеличение времени запаздывания пробоя промежутка и наличие большого числа отраженных импульсов напряжения и тока разряда из-за низкого ($\ll 75$ Ом) сопротивления плазмы. Таким образом возбуждение воздуха продолжалось затухающими импульсами не менее 1 мкс. Из-за меньшей длины кабеля 3, см. рис. 1, с генератором ГИН-50-1 задержка прихода отражённых импульсов сократилась до 27 нс, что также оказывало влияние на режим ввода энергии в газ.

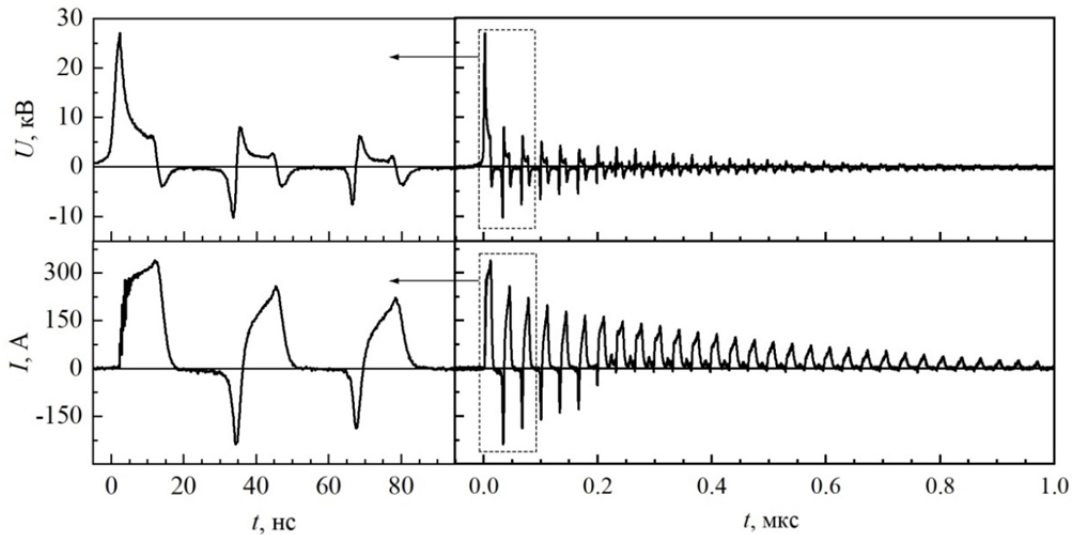


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока разряда I при давлении воздуха 760 Торр, полученные с использованием генератора ГИН-50-1, показанные в двух временных масштабах. Режим однократных импульсов. $U_0 = +16$ кВ. $p = 760$ Торр

Fig. 3. Waveforms of voltage pulses U and discharge current I at an air pressure of 760 Torr, obtained using the GIN-50-1 generator, shown in two time scales. Single pulse mode. $U_0 = +16$ kV. $p = 760$ Torr

Амплитуда падающей волны импульса напряжения U_0 обоих генераторов могла регулироваться. При холостом ходе напряжение на промежутке удваивалась. Сигналы с емкостного делителя напряжения и шунта записывались осциллографом Tektronix MSO64B (8 ГГц, 20 выборок в нс).

Излучательные характеристики наносекундного разряда регистрировались из плазмы между двумя электродами, которые устанавливались на расстоянии 4 мм и изготавливались из отрезков швейных игл с диаметром у основания 0,75 мм. Их длина после длительной тренировки равнялась $\approx 5,5$ мм, а радиусы закругления были у высоковольтной иглы ≈ 100 мкм и у заземлённой иглы ≈ 300 мкм. Причём, заземлённая игла при предварительной тренировке электродов изменила форму на большей длине, и она стала притупленной. В результате радиус закругления переходной области от торцевой поверхности острия с радиусом 300 мкм к поверхности конуса у вершины иглы составлял ≈ 100 мкм. Данная форма электродов применялась в экспериментах для того, чтобы их поверхность существенно не изменялась от импульса к импульсу. При использовании острых игл, радиус кривизны острия существенно изменяется за несколько импульсов.

Для съёмки свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат Canon

EOS 2000D (число пикселей 24,7 Мп, размер матрицы $22,3 \times 14,9$ мм, размер пикселя 3,72 мкм), оснащённый длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax (Infinity Photo-Optical Company) с объективом CF-3. Микроскоп в данной конфигурации обеспечивал увеличение 3,56 с предельным разрешением 1,7 мкм. Длительность экспозиции фотоаппарата составляла 1 с, а его чувствительность варьировалась в диапазоне 100–6400 ISO. Фотографирование разрядного промежутка проводилось в режиме однократных импульсов.

Оптические эмиссионные спектры разрядной плазмы регистрировалось при помощи спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.) с известной спектральной чувствительностью, который устанавливался напротив окна 10. Световод в этих экспериментах не использовался и излучение на спектрометр попадало из всего разрядного промежутка. Аппаратная функция спектрометра составляла $\approx 1,2$ нм. Каждый спектр был получен в режиме усреднения за 1000 реализаций разряда.

Для получения время-разрешённых изображений свечения плазмы разряда применялась 4-канальная ICCD камера HSFC PRO с минимальной длительностью экспозиции 3 нс и минимальной задержкой между каналами 0,1 нс. Синхронизация ICCD камеры и высоковольтных генераторов осуществлялась цифровым генератором задержек DG645. Запуск

каналов ICCD камеры мог осуществляться за 2–3 нс до прибытия импульса напряжения на промежуток. Это позволяло запечатлеть динамику стримеров, время формирования которых могло быть менее 1 нс, за один импульс при последовательном включении каналов.

Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась сухим воздухом с относительной влажностью $Y \approx 8\%$, атмосферным воздухом с $Y \approx 25\%$, смесью сухого воздуха с $Y \approx 8\%$ и водорода при $p \approx 1,5$ Торр, а также дополнительно увлажнённым атмосферным воздухом ($Y \approx 50\%$). Основные измерения были проведены при

давлении воздуха $p \approx 760$ Торр. Исходная температура воздуха T в лаборатории была ≈ 23 °С.

Экспериментальные результаты

Как было показано ранее в работах [14, 15], формирование разряда в данных условиях происходит при генерации убегающих электронов и наличии тормозного рентгеновского излучения [7]. Это способствовало инициированию в промежутке диффузного разряда, фотографии которого показаны на рис. 4.

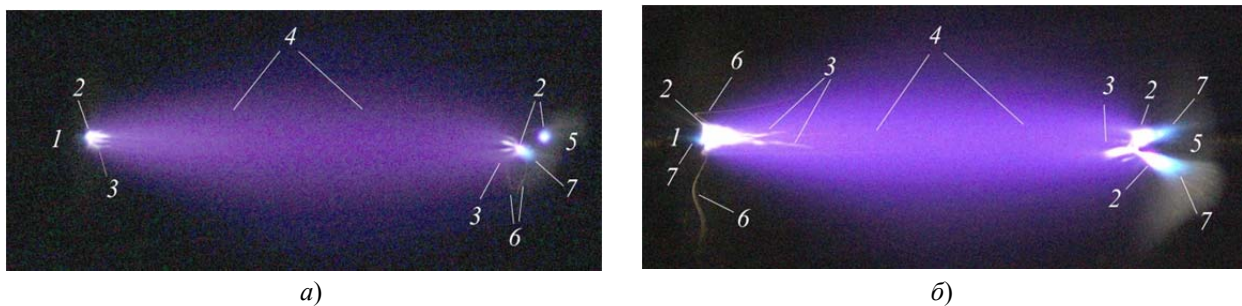


Рис. 4. Время-интегральные изображения свечения промежутка, полученные при однократном разряде в воздухе при давлении $p = 760$ Торр и высокой чувствительности матрицы фотоаппарата (ISO 6400). Напряжение генератора ГИН-55-1 равно 18 (а) и 33 кВ (б). Относительная влажность исходного воздуха $Y \approx 25\%$, температура воздуха $T = 23$ °С. 1 – заземлённый электрод, 2 – яркие белые пятна на электродах, 3 – филаменты белого цвета, 4 – диффузный разряд, 5 – высоковольтный электрод, 6 – треки частиц, 7 – голубое свечение паров железа, которое составляло основу швейных игл

Fig. 4. Time-integrated images of the gap glow obtained with a single discharge in air at a pressure of $p = 760$ Torr and high sensitivity of the camera matrix (ISO 6400). The voltage of the GIN-55-1 generator is 18 (a) and 33 kV (b). Relative humidity of the source air $Y \approx 25\%$, air temperature $T = 23$ °C. 1 – grounded electrode, 2 – bright white spots on the electrodes, 3 – white filaments, 4 – diffuse discharge, 5 – high-voltage electrode, 6 – particle tracks, 7 – blue glow of iron vapor, which formed the basis of sewing needles

С генератором ГИН-55-01 в промежутке формировался диффузный разряд и только у электродов были видны яркие белые пятна 2, короткие филаменты 3 и области голубого свечения атомов и ионов железа 7. Поскольку свечение плазмы в промежутке на исходных фотографиях было слабым, на рис. 4 приведены изображения, полученные после коррекции яркости и контраста. Фотографии разряда без коррекции изображений и с коррекцией приведены в работах [14–17]. При напряжении генератора ГИН-55-01 в падающей волне 18 кВ, формирование диффузного разряда, показанное на рис. 4а, повторялось со вероятностью близкой к 100 %. При $U_0 = 33$ кВ форма диффузного разряда, показанное на рис. 4б, сохранялась с 90 % вероятностью, а в 10 % импульсов напряжения в середине промежутка

появлялись филаменты. Осциллограммы импульсов напряжения и тока при этом существенно не изменялись. Цвет диффузного разряда 4 на обоих изображениях был фиолетовым и только у электродов видны яркие белые пятна 2. Кроме того, на большинстве фотографий можно было видеть треки частиц 6, вылетающих из электродов, и области локального голубого свечения 7 у электродов 1, 5. Подробная информация о формировании треков частиц приведена в работах [14–17], поэтому здесь не будем описывать динамику их формирования и разлёта. Отметим только, что при наносекундных разрядах в различных газах появление треков частиц является обычным явлением. Однако для регистрации свечения частиц необходимо увеличивать чувствительность и пространственное разрешение

оптической системы регистрации. Появление окрашенных областей около электродов, которые имели форму струй, связано с возбуждением паров металла, цвет которых определяется материалом электродов, состоящих в основном из железа. Было установлено, что цвет струй для электродов из меди обычно зелёный, алюминия малиновый, железа и нержавеющей стали голубой [25]. Предполагаем, что появление струй металла из электродов можно связать с высокой локальной температурой и взрывом микровыступов на поверхности [1].



Рис. 5. Время-интегральные изображения разряда после коррекции уровней яркости и контраста (а) и без коррекции (б), полученные при давлении воздуха $p = 760$ Торр. Амплитуда импульса напряжения в падающей волне $U_0 = 6$ (а) и 16 кВ (б) от генератора положительной полярности ГИН-50-1. ISO равно 200 (а) и 100 (б). 1 – заземлённый электрод, 2 – яркие белые пятна на электродах, 3 – филаменты белого цвета, 5 – высоковольтный электрод, 7 – голубое свечение паров железа, 8 – свечение паров металла с зелёным оттенком. $Y \approx 25\%$, $T = 23$ °С. Режим однократных импульсов

Fig. 5. Time-integrated images of the discharge after correction of brightness and contrast (a) and without correction (b), obtained at air pressure $p = 760$ Torr. The amplitude of the voltage pulse in the incident wave $U_0 = 6$ (a) and 16 kV (b) from the positive polarity generator GIN-50-1. ISO is 200 (a) and 100 (b). 1 – grounded electrode, 2 – bright white spots on the electrodes, 3 – white filaments, 5 – high-voltage electrode, 7 – blue glow of iron vapor, 8 – glow of metal vapor with a green tint. $Y \approx 25\%$, $T = 23$ °C. Single pulse mode

При получении изображения на рис. 5а также использовалась коррекция уровней яркости и контраста, а на рис. 5б коррекции не было. Чувствительность матрицы фотоаппарата для обоих изображений была уменьшена по сравнению с изображениями на рис. 4. Форма и цвет разряда при увеличении длительности импульса напряжения существенно изменились. Яркие белые пятна 2 на электродах остались, но в промежутке появился канал белого цвета, в котором можно выделить отдельные филаменты, разделённые более тёмными областями. Отдельные филаменты 3 хорошо видны в этих условиях при уменьшении чувствительности матрицы фотоаппарата без коррекции контраста и яркости изображений, рис. 5б. Диффузный разряд, который, как будет показано далее, формируется в начальной стадии разряда и излучает преимущественно в ультрафиолетовой области спектра, из-за излучения филаментов 3 и ярких пятен 2 в видимой области на изображениях разряда

Образование в промежутке филаментов и искровых лидеров, имеющих белый цвет, регистрировалось с генератором ГИН-55-01 сравнительно редко и только при максимальном напряжении. Тогда как, яркие белые пятна у электродов и короткие филаменты наблюдались в каждом импульсе, в том числе при $U_0 = 18$ кВ.

На рис. 5 показаны изображения интегрального свечения разряда, полученные с генератором ГИН-50-1, длительность импульса напряжения на полувывоте которого была в девятнадцать раз больше, чем у генератора ГИН-55-1.

не заметен. В диффузной стадии разряда доминирует УФ-излучение полос 2^+ системы молекулы азота (переход $S^3P_u - B^3P_g$), характеризующееся короткой (1–2 нс) длительностью из-за интенсивного при атмосферном давлении столкновительного тушения S^3P_u -состояния как молекулами азота в основном состоянии, так и молекулами кислорода. При этом длительность излучения плазмы филаментов как минимум на порядок превосходит длительность излучения полос 2^+ системы молекулы азота, распределено от УФ до ближнего ИК-диапазона и попадает в максимум чувствительности фотоаппарата.

Число заметных треков частиц с генератором ГИН-50-1 существенно уменьшилось. На приведённых изображениях они не заметны из-за относительно малой яркости по сравнению с излучением ярких белых пятен и филаментов. Области локального голубого свечения у электродов 7 при увеличении длительности энерговывода несколько изменили

цвет, который получил зелёный оттенок δ . Следует отметить, что, хотя форма филаментов изменялась от импульса к импульсу, они заполняли весь промежуток как при напряжении $U_0 = 16$ кВ, так и 6 кВ с генератором ГИН-50-1.

Динамика развития разряда с генератором ГИН-50-1, зафиксированная с помощью 4-канальной ICCD камеры, показана на рис. 6.

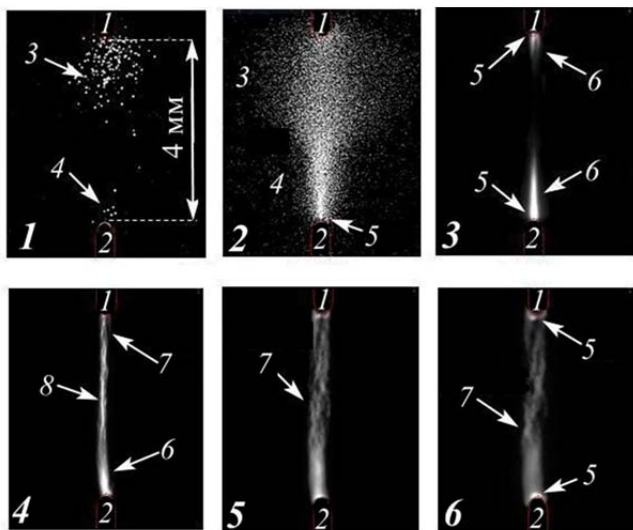


Рис. 6. Свечение разрядного промежутка при пробое воздуха с формированием диффузного разряда и искрового канала. Изображения получены с помощью 4-канальной ICCD-камеры при подаче 13-нс положительных импульсов напряжения от генератора ГИН-50-1 с напряжением в падающей волне +15 кВ. 1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – положительный стример, 4 – отрицательный стример, 5 – яркие пятна на электродах, 6 – искровые лидеры, 7 – филаменты, 8 – область встречи искровых лидеров в канале. Время съёмки кадра 1 – 0–0,2 нс, кадра 2 – 0–0,7 нс, 3 – 0–20 нс, 4 – 38–58 нс, 5 – 160–180 нс и 6 – 200–220 нс. $Y \approx 25\%$, $T = 23^\circ\text{C}$. Режим однократных импульсов

Fig. 6. Glow of the discharge gap during air breakdown with the formation of a diffuse discharge and a spark channel. The images were obtained using a 4-channel ICCD camera when applying 13 ns positive voltage pulses from a GIN-50-1 generator with an incident wave voltage of +15 kV. 1 – high-voltage electrode, 2 – grounded electrode, 3 – positive streamer, 4 – negative streamer, 5 – bright spots on the electrodes, 6 – spark leaders, 7 – filaments, 8 – spark leader meeting area in the channel. The shooting time of frame 1 is 0–0.2 ns, frame 2 – 0–0.7 ns, 3 – 0–20 ns, 4 – 38–58 ns, 5 – 160–180 ns and 6 – 200–220 ns. $Y \approx 25\%$, $T = 23^\circ\text{C}$. Single pulse mode

На рис. 6 видно, что пробой промежутка происходит в результате развития положительного стримера большого диаметра 3 и от-

рицательного стримера 4, стартующего с некоторым запаздыванием по отношению к положительному стримеру (кадр 1). Диффузный «канал» плазмы (кадр 2) возникает после столкновения и слияния стримеров на расстоянии около 2/3 длины промежутка от высоковольтного электрода 1. Именно в этой стадии доминирует излучение полос 2^+ системы молекулы азота (переход $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$).

За время ≈ 1 нс (кадр 2) у отрицательного электрода 2 появляется яркое пятно 5. К двадцатой наносекунде в промежутке видны искровые лидеры 6 (кадр 3). К сороковой наносекунде, соответствующей повторному пробую/разряду первым отражённым импульсом напряжения (см. рис. 3), в промежутке видны яркие филаменты (кадр 4), спектр излучения которых характеризуется широкополосным континуумом, а также излучением линий атомов азота и кислорода. Следует отметить на этом кадре увеличение яркости свечения искрового канала в месте встречи искровых лидеров, распространяющихся от электродов. После ≈ 60 наносекунды (кадр 4) до ≈ 200 -й (кадры 5 и 6, которые были получены при одной реализации разряда) диаметр искрового канала примерно вдвое увеличился. На кадрах 4, 5 и 6 также видны отдельные филаменты 7, расширяющиеся со временем. Из сравнения изображений на рис. 4 и рис. 5, а также на рис. 6, видно, что вначале в промежутке формируется диффузный разряд, который контрагирует при относительно большой длительности импульса.

При диффузном разряде, который стабильно формировался с короткоимпульсным генератором ГИН-55-01, в спектре излучения разрядной плазмы доминирует излучение второй положительной системы азота, рис. 7.

Наибольшую спектральную плотность энергии излучения W имеет полоса 0–0 с длиной волны 337,1 нм. Установлено, что на спектр излучения в этих условиях также влияет испарение электродов. В промежутке, в спектре излучения разрядной плазмы, регистрируются линии атомов и ионов железа, FI и FII на рис. 7. Наибольшую W эти линии имеют в области 230–265 нм. Также наблюдается слабое излучение широкополосного континуума, которое на рис. 7 малозаметно.

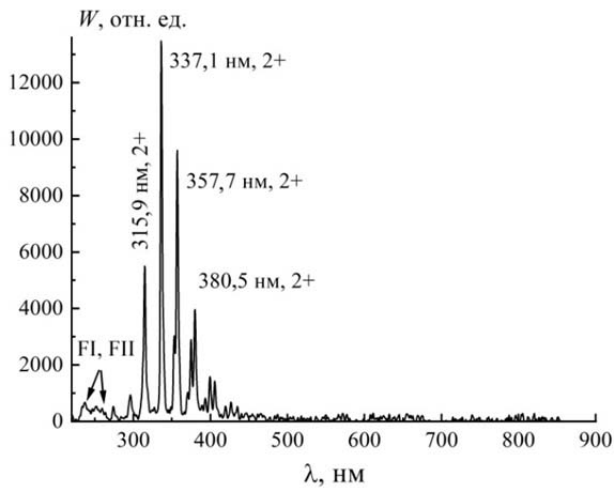


Рис. 7. Время-интегральный спектр излучения плазмы разряда в воздухе ($Y \approx 25\%$, $T = 23^\circ\text{C}$) при использовании генератора ГИН-55-01 ($f = 10$ Гц и $U_0 = 33$ кВ)

Fig. 7. Time-integrated spectrum of discharge plasma radiation in air ($Y \approx 25\%$, $T = 23^\circ\text{C}$) using the GIN-55-01 generator ($f = 10$ Hz and $U_0 = 33$ kV)

Свечение широкополосного континуума значительно усилилось при той же относительной влажности воздуха $\approx 25\%$ с увеличением длительности импульса напряжения генератора и контрагировании разряда, см. рис. 8.

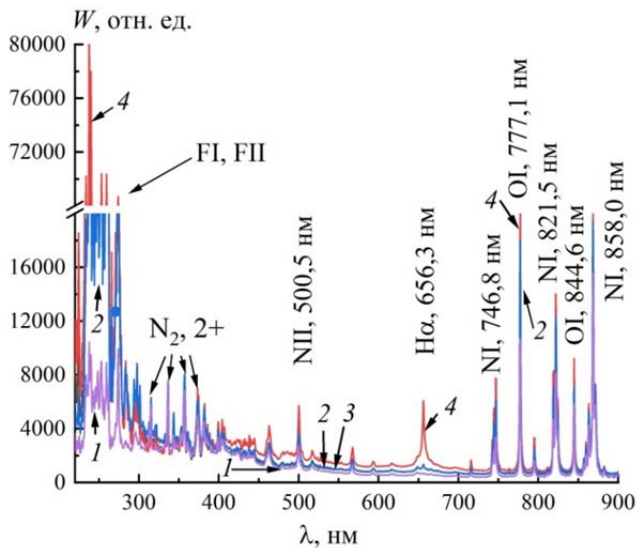


Рис. 8. Спектры излучения воздуха с относительной влажностью $Y \approx 8\%$ (1), $Y \approx 25\%$ (2), воздуха с $Y \approx 8\%$ при добавке 1,5 Торр водорода (3) и воздуха с $Y \approx 50\%$ (4). Давление смесей 760 Торр. Генератор ГИН-50-1. $f = 10$ Гц. $U_0 = 16$ кВ. $T = 23^\circ\text{C}$. Каждый спектр получен в режиме усреднения за 1000 реализаций разряда

Fig. 8. Emission spectra of air with relative humidity $Y \approx 8\%$ (1), $Y \approx 25\%$ (2), air with $Y \approx 8\%$ with the addition of 1.5 Torr of hydrogen (3) and air with $Y \approx 50\%$ (4). Mixture pressure 760 Torr. Generator GIN-50-1. $f = 10$ Hz. $U_0 = 16$ kV. $T = 23^\circ\text{C}$. Each spectrum was obtained in the averaging mode over 1000 discharge realizations

При увеличении длительности импульса генератора энергия, вкладываемая в газ, за время первого импульса увеличилась почти в 6–7 раз и возросла удельная энергия, вкладываемая в искровые лидеры и филаменты, формируемые на продольной оси разряда, как во время основного импульса напряжения, так и во время отражённых импульсов. Увеличение времени, в течение которого осуществлялся энерговыход, видно из рис. 3. В этих условиях в оптических эмиссионных спектрах излучение искрового канала доминирует над излучением полос 2^+ системы молекулы азота, и они едва различимы. Также обращают на себя внимание сильные линии атомов и однократных ионов железа (FI и FII) в ультрафиолетовой области (230–260 нм). Причём, W этих линий при увеличении относительной влажности воздуха от $Y \approx 8\%$ до $\approx 50\%$ возросла почти на порядок и стала максимальной в спектре излучения. Как и следовало ожидать, при контрагировании разряда появились линии атомов азота и кислорода, а также линии однократного иона азота (N II) в диапазоне 489,5–504,5 нм, которые наблюдаются при искровом разряде в воздухе, см., например, работу [18].

Обсуждение полученных результатов

В качестве основного результата данной работы мы считаем получение в спектре излучения широкополосного континуума в области от 230 до 900 нм, спектральная плотность энергии которого росла с увеличением относительной влажности воздуха, см. спектры 1, 2 и 4 на рис. 8. Линия атомарного водорода $H\alpha$ с длиной волны 656.3 нм имела такое же поведение, её W росла с увеличением относительной влажности воздуха. Для установления природы излучения широкополосного континуума к воздуху с малой относительной влажностью было добавлено 1,5 Торр водорода. Это добавка не повлияла на осциллограммы напряжения и тока разряда, но, как и увеличение относительной влажности воздуха, привела к увеличению W широкополосного континуума, спектр 3 на рис. 8. Кроме того, при регистрации отдельных филаментов, рис. 6, была установлено, что их цвет оставался белым при изменении интенсивности излучения

по длине и ширине канала. Причём, интенсивность излучения филаментов и их форма во время одного импульса напряжения генератора с учётом отражений со временем существенно не изменялась, кадры 5 и 6 на рис. 6. Из этого следует отличие удельных энерго вкладов в различных областях канала без изменения его цвета.

В работах [11, 12, 18, 19] широкополосное излучение искрового канала и филаментов относят к рекомбинационному континууму. Проведённые исследования показали, что увеличение относительной влажности воздуха при его постоянном давлении приводит к увеличению спектральной плотности энергии излучения широкополосного континуума. Данный континуум становился заметным, как и в работах [11, 12, 18, 19] при увеличении длительности импульса напряжения и контрагировании разряда. Мы предполагаем, что в условиях данного эксперимента, значительный вклад в излучение континуума вносит молекулярный водород, излучающий на переходе между связанным и разлётным термами $H_2(a^3\Sigma_g^+) \rightarrow H_2(b^3\Sigma_u^+)$. Пары воды заметно не влияли на электрические характеристики разряда, что совпадает с результатами работ [21, 22]. При увеличении удельных энерго вкладов и концентрации электронов в излучении искрового канала должен доминировать рекомбинационный континуум, который приведён, например, в работе [19]. Водородный континуум подробно описан в работе [26] при давлении водорода в единицы Торр. Как показано выше, форма широкополосного континуума в воздухе при его относительной влажности 25 % совпадает с формой континуума в смеси сухого воздуха (относительная влажность 8 %) с 1,5 Торр водорода. Отличие формы континуума, полученного в работе [26] и в настоящей работе, можно объяснить отличием в давлении и составе газа, а также в условиях возбуждения.

Заключение

Исследованы оптические и электрические свойства импульсного диффузного и контрагированного наносекундных разрядов между двумя остриями в воздухе с различной влажностью при атмосферном давлении. Установ-

лено, что повышение влажности воздуха при контрагировании разряда усиливает спектральную плотность энергии излучения атомов и ионов материала электродов (железа). При этом, интенсивность излучения полос второй положительной системы азота уменьшается. Показано, что во влажном воздухе в импульсно – периодическом режиме контрагированного разряда, канал которого имеет белый цвет и состоит из филаментов, появляется излучение широкополосного континуума. Выдвинуто предположение, что появление широкополосного континуума во влажном воздухе при контрагировании разряда, в том числе обусловлено излучением между связанным и разлётным термами молекулярного водорода на переходе $H_2(a^3\Sigma_g^+) \rightarrow H_2(b^3\Sigma_u^+)$. Подтверждено образование тонких светящихся треков частиц, стартующих из областей плазмы ярко белого цвета на электродах. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых применений установок с импульсно-периодическими разрядами в неоднородном электрическом поле.

Работа выполнена в рамках
Государственного задания ИСЭ СО РАН,
проект № FWRM-2026-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korolev Y. D., Mesyats G. A. Physics of pulsed breakdown in gases. – URO-PRESS, 1998. Chapter 5.
2. Babich L. P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomen. Futurepast. Inc. – USA: Arlington, Virginia, 2003.
3. Roupasov D. V., Nikipelov A. A., Nudnova M. M., Starikovskii A. Y. / AIAA journal. 2009. Vol. 47. № 1. P. 168–185.
4. Wang D., Namihira T. / Plasma Sources Science and Technology. 2020. Vol. 29. № 2. P. 023001.
5. Pulsed Discharge Plasmas: Characteristics and Applications / Shao T., Zhang C. (eds.). – Singapore: Springer Nature, 2023.
6. Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Месяц Г. А. / ДАН СССР. 1970. Т. 191. № 1. С. 76–78.
7. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / ed. Tarasenko V. F. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014.
8. Bazelyan E. M., Raizer Y. P. Spark discharge. – CRC press, 1997.

9. Minesi Nicolas, Stepanyan S., Mariotto Pierre, Stancu Gabi Daniel, Laux Christophe / Plasma Sources Science and Technology. 2020. Vol. 29. № 8. P. 085003.
10. Pai D. Z., Lacoste D. A., Laux C. O. / Plasma Sources Science and Technology. 2010. Vol. 19. № 6. P. 065015.
11. Parkevich E., Medvedev M., Ivanenkov G., Khirianova A., Selyukov A., Agafonov A., Korneev P., Gus'kov S., Mingaleev A. / Plasma Sources Science and Technology. 2019. Vol. 28. № 9. P. 095003.
12. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Shpakov K. V., Khirianov T. F., Popov N. A. / Physical Review E. 2025. Vol. 112. № 6. P. 065211.
13. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D., Trenkin A. A. / Plasma Sources Science and Technology. 2021. Vol. 30. № 9. P. 095020.
14. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., Sorokin D. A. / Surfaces. 2023. Vol. 6. № 2. P. 214–226.
15. Тарасенко В. Ф., Белоплотов Д. В., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Сорокин Д. А. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 4. С. 312–319.
16. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., Sorokin D. A. / Plasma Science and Technology. 2024. Vol. 26. № 9. P. 094003.
17. Тарасенко В. Ф., Белоплотов Д. В., Сорокин Д. А., Хин Y. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 40–46.
18. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang C., Lomaev M. I., Sorokin D. A., Yan P., Kozyrev A. V., Baksh E. Kh. / Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 111. № 2. P. 023304.
19. Shcherbanev S. A., Khomeiko A. Y., Stepanyan S. A., Popov N. A., Starikovskaia S. M. / Plasma Sources Science and Technology. 2016. Vol. 26. № 2. P. 02LT01.
20. Тарасенко В. Ф., Бакут Е. Х., Виноградов Н. П., Сорокин Д. А. / Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 12. С. 1769–1777.
21. Van der Horst R. M., Verreycken T., Van Veldhuizen E. M., Bruggeman P. J. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2012. Vol. 45. № 34. P. 345201.
22. Brisset A., Tardiveau P., Gazeli K., Bournonville B., Jeanney P., Ouaras K., Magne L., Pasquiers S. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2012. Vol. 45. № 21. P. 215204.
23. Liqiang Q. I., Yajuan Z. / Journal of Hazardous Materials. 2013. Vol. 256–257. P. 10–15.
24. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M., Zazoulin S. High-voltage and high-PRF FID pulse generators. in *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9*. / eds. Sabath F., Giri D. V., Rachidi F., Kaelin A. – New York: Springer-Verlag, 2010. P. 301–306.
25. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Lomaev M. I. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44. № 4. P. 386–392.
26. Nunomura S., Ezumi N. / Applied Physics Express. 2024. Vol. 17. № 11. P. 116001.

PACS: 52.80.-s

Effect of air humidity on emission of nanosecond discharge during point-to-point gap breakdown

D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko*, A. N. Panchenko, and D. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics, SB RAS, Tomsk, 634050 Russia

*E-mail: vf.tarasenko@hcei.ru

Received 15.01.2026; revised 2.02.2026; accepted 20.02.2025

The optical properties of nanosecond discharges excited by voltage pulses of 0.7 and 13 ns duration were studied in air with different humidities at atmospheric pressure. The transition from a diffuse to a contracted discharge, characterized by a non-uniform radiation distribution along the gap, was investigated. Optical emission spectra of the plasma of these discharges were obtained in various modes. It was confirmed that during nanosecond breakdown, a diffuse plasma “channel” (diffuse discharge) arises as a result of the collision of counter-propagating streamers of large diameter. It was established that, with a relatively long pulse duration, a diffuse discharge forms in the gap, which then contracts. The discharge channel consists of individual filaments and is characterized by a white glow. It is shown that the plasma emission spectra of diffuse and contracted discharges differ from each other by the presence of a broadband continuum, as well as intense atomic and ionic lines of oxygen, nitrogen, hydrogen, and the electrode material. It has been established that increasing relative air humidity increases the spectral energy density of metal atoms and ions, as well as broadband radiation. A hypothesis has been put forward to explain the appearance of a broadband continuum in humid air during a contracted discharge.

Keywords: non-uniform electric field, nanosecond discharge, atmospheric air, water vapor, hydrogen continuum, luminous tracks.

REFERENCES

1. Korolev Y. D. and Mesyats G. A. Physics of pulsed breakdown in gases, URO-PRESS, chapter 5, 1998.
2. Babich L. P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment and Natural Phenomen, Futurepast. Inc. USA: Arlington, Virginia, 2003.
3. Roupasov D. V., Nikipelov A. A., Nudnova M. M., and Starikovskii A. Y., AIAA journal **47** (1), 168–185 (2009). <https://doi.org/10.2514/1.38113>
4. Wang D. and Namihira T., Plasma Sources Science and Technology **29** (2), 023001 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5bf6>
5. Pulsed Discharge Plasmas: Characteristics and Applications / ed. Shao T., Zhang C. Singapore: Springer Nature, 2023.
6. Koval'chuk B. M., Kremnev V. V., and Mesyats G. A., Dokl. AN SSSR **191** (1) 76–78 (1970) [in Russian].
7. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / ed. Tarasenko V. F. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014.
8. Bazelyan E. M. and Raizer Y. P. Spark discharge, CRC press, 1997.
9. Minesi Nicolas, Stepanyan S., Mariotto Pierre, Stancu Gabi Daniel, and Laux Christophe, Plasma Sources Science and Technology **29** (8), 085003 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab94d3>
10. Pai D. Z., Lacoste D. A., and Laux C. O., Plasma Sources Science and Technology **19** (6), 065015 (2010). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/6/065015>
11. Parkevich E., Medvedev M., Ivanenkov G., Khirianova A., Selyukov A., Agafonov A., Korneev P., Gus'kov S., and Mingaleev A., Plasma Sources Science and Technology **28** (9), 095003 (2019). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab3768>
12. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Shpakov K. V., Khirianov T. F., and Popov N. A., Physical review E **112** (6), 065211 (2025). <https://doi.org/10.1103/bq1x-2p4t>
13. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D., and Trenkin A. A., Plasma Sources Science and Technology **30** (9), 09502 (2021). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aba8cc>
14. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., and Sorokin D. A., Surfaces **6** (2), 214–226 (2023). <https://doi.org/10.3390/surfaces6020014>
15. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Lomaev M. I., Panchenko A. N., and Sorokin D. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (4), 312–319 (2023) [in Russian].
16. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Panchenko A. N., and Sorokin D. A., Plasma Science and Technology **26** (9), 094003 (2024). <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ad34aa>
17. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Sorokin D. A., and Xin Y., Applied Physics, № 6, 40–46 (2024) [in Russian].
18. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang C., Lomaev M. I., Sorokin D. A., Yan P., Kozyrev A. V., and Baksht E. Kh., Journal of Applied Physics **111** (2), 023304 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.3677951>
19. Shcherbanev S. A., Khomenko A. Y., Stepanyan S. A., Popov N. A., and Starikovskaia S. M., Plasma Sources Science and Technology **26** (2), 02LT01 (2016). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/26/2/02LT01>
20. Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Vinogradov N. P., and Sorokin D. A., Opt. Spectr. **130** (12), 1487–1495 (2022). <https://doi.org/10.21883/EOS.2022.12.55234.4014-22>.
21. Van der Horst R. M., Verreycken T., Van Velthuizen E. M., and Bruggeman P. J., Journal of Physics D: Applied Physics **45** (34), 345201 (2012). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/34/345201>
22. Brisset A., Tardiveau P., Gazeli K., Bournonville B., Jeanney P., Ouaras K., Magne L., and Pasquiers S., Journal of Physics D: Applied Physics **54** (21), 215204 (2012). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abe81e>
23. Liqiang Q. I. and Yajuan Z., Journal of Hazardous Materials **256–257**, 10–15, (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.019>
24. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M., and Zazoulin S. High-voltage and high-PRF FID pulse generators. in *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9.* / eds. Sabath F., Giri D. V., Rachidi F., Kaelin A. New York: Springer-Verlag, 2010, pp. 301–306. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77845-7>
25. Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., and Lomaev M. I., IEEE Transactions on Plasma Science **44** (4), 386–392, (2016). <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2528581>
26. Nunomura S. and Ezumi N., Applied Physics Express **17** (11), 116001 (2024). <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ad87aa>

Об авторах

Белоплотов Дмитрий Викторович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: dv.beloplotov@hcei.ru SPIN-код: 1677-3530, AuthorID: 688871

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: vf.tarasenko@hcei.ru SPIN-код: 2449-8880, AuthorID: 18759

Панченко Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: an.panchenko@hcei.ru SPIN-код: 3964-2162, AuthorID: 21478

Сорокин Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Институт сильноточной электроники СО РАН (634050, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3). E-mail: da.sorokin@hcei.ru SPIN-код: 6447-6366, AuthorID: 614296