

УДК 537.527.9

PACS: 52.80.Tn

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-4-312-319

EDN: IIGZPI



Тонкие светящиеся треки при наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле

В. Ф. Тарасенко, Д. В. Белоплов, М. И. Ломаев,
А. Н. Панченко, Д. А. Сорокин

Проведены исследования свечения наносекундного диффузного разряда между двумя остриями с высоким пространственным разрешением. При атмосферном давлении воздуха, а также при давлениях 300, 100 и 30 Торр, обнаружено большое число тонких светящихся треков, стартующие из области ярких пятен на электродах. Показано, что форма треков изменяется от прямых линий до извилистых, а направление их движения в ряде случаев может меняться на противоположное. Установлено, что в условиях формирования тонких светящихся треков, в спектре излучения диффузной плазмы при резко неоднородном электрическом поле и наносекундной длительности импульса напряжения доминируют полосы второй положительной системы азота. С помощью ICCD камеры показано, что излучение треков в первые десятки наносекунд на фоне широких стримеров и диффузного разряда не регистрируется. Выдвинута гипотеза, объясняющая появление многочисленных треков при пробое воздуха в неоднородном электрическом поле.

Ключевые слова: светящиеся треки, наносекундный разряд, воздух, неоднородное электрическое поле.

Введение

Хорошо известно, что при пробое вакуумных промежутков на катоде образуются яркие пятна и из них разлетаются частица различного размера [1]. Как показывают исследования вакуумного разряда, которые были проведены в последние годы [2–5],

уменьшение пробивного напряжения при пробое нельзя связывать только с взрывной электронной эмиссией. Для понимания причин, ограничивающих электрическую прочность вакуумной изоляции, надо также учитывать влияние сильного электрического поля на механические свойства поверхности электродов. Расчеты, проведенные в работе [5] показали, что в непрогретой области, размер которой значительно превышает размер центра взрывной эмиссии электронов, материал катода также подвергается воздействию разрушающих механических напряжений. В результате первичное появление катодного пятна при разряде в вакууме и образование плазмы у поверхности электрода приводит к множественным локальным разрушениям его ровной поверхности на периферии.

При наносекундных разрядах в газах атмосферного давления данных о разлёте частиц электродов сравнительно мало. Хотя при пробое в неоднородном электрическом поле, величина электрического поля у электродов с

Тарасенко Виктор Федотович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

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

Белоплов Дмитрий Викторович, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

Ломаев Михаил Иванович, в.н.с., д.ф.-м.н.

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

Панченко Алексей Николаевич, с.н.с., д.ф.-м.н.

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

Сорокин Дмитрий Алексеевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.

E-mail: SDMa-70@loi.hcei.tsc.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023

Принята к публикации 2.06.2023

© Тарасенко В. Ф., Белоплов Д. В., Ломаев М. И.,
Панченко А. Н., Сорокин Д. А., 2023

малым радиусом кривизны превышает 1 МВ/см и может увеличиваться за счёт микронеоднородностей и микрочастиц на электродах. В работах [6, 7] при наносекундной длительности импульса напряжения и диффузном разряде в атмосферном воздухе были зарегистрированы светящиеся следы частиц. Например, в [6] приведена фотография, на которой к частице, распространяющейся в промежутке, примыкают два стримера стартовавшие в противоположных направлениях. В работе [8] при низких давлениях аргона, возбуждаемом высокочастотным разрядом, сообщалось о наблюдении следов плазменных кристаллов.

Цель данной работы – изучить с высоким пространственным разрешением свечение плазмы разряда в атмосферном воздухе в диапазоне давлений 30–760 Торр при резко неоднородном электрическом поле и наносекундной длительности импульсов напряжения и предположить механизм появления светящихся треков.

Экспериментальная установка и методики

Исследования проводились на установке, подобной описанной в работе [9], которая показана на рис. 1а.

Импульсы напряжения от генератора ГИН-55-01 [10] по коаксиальному кабелю подавались на вход передающей линии разрядной камеры. Генератор формировал импульсы отрицательной полярности длительностью на полувывоте $\tau_{0,5} \approx 0,7$ нс (рис. 1б), временем нарастания $\tau_{0,1-0,9} \approx 0,7$ нс. Амплитуда падающего импульса напряжения U_0 была либо -33 кВ, либо -18 кВ. Энергия в импульсе при согласованной нагрузке достигала 8 и 3,5 мДж, соответственно. При холостом ходе напряжение на промежутке удваивалась.

Газоразрядная камера имела короткую передающую линию ($Z = 75$ Ом) со встроенным ёмкостным делителем напряжения. С его помощью осуществлялась регистрация импульсов напряжения, подаваемых на промежуток. Необходимо отметить, что двойное время пробега волной напряжения расстояния от ёмкостного делителя напряжения до промежутка составляло 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, собранным из тонкоплёночных SMD-резисторов (Vishay Intertechnology). Сопротивление шунта составляло 8,7 мОм.

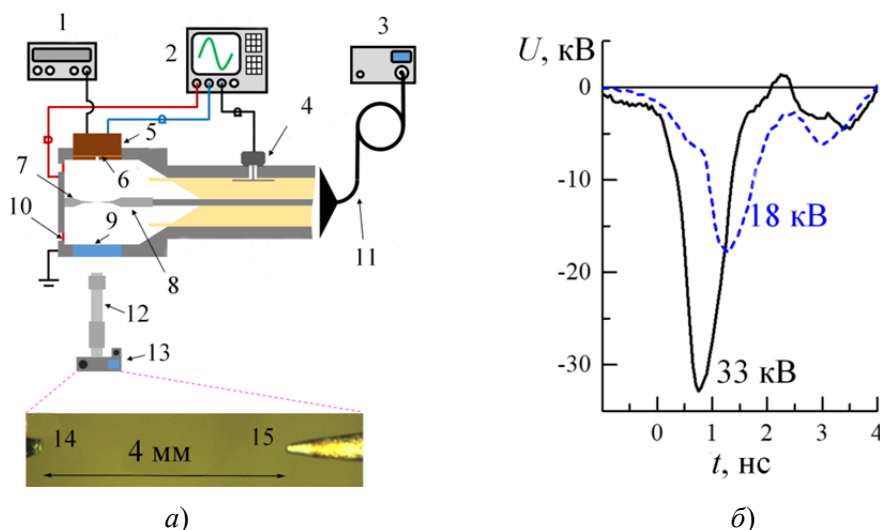


Рис. 1. Схема установки и увеличенное изображение разрядного промежутка (а), а также используемые импульсы напряжения при согласованной нагрузке (б): 1 – источник питания рентгеновского детектора; 2 – осциллограф; 3 – импульсный генератор; 4 – ёмкостной делитель; 5 – рентгеновский детектор; 6 – медная фольга; 7 и 14 – заземлённый электрод; 8 и 15 – высоковольтный электрод; 9 – кварцевое окно; 10 – шунт из SMD резисторов; 11 – высоковольтный коаксиальный кабель; 12 – микроскоп; 13 – фотоаппарат

Газоразрядная камера имела два боковых окна из КУ-1. При измерении рентгеновского излучения одно из окон снималось, и вместо него устанавливался датчик рентгеновского излучения HR-GaAs:Cr [11], в который имел временное разрешение ~ 1 нс. Диаметр входного окна датчика составлял 3 мм. В нём была установлена медная фольга толщиной 20 мкм.

Из-за отсутствия согласования импеданса газоразрядной нагрузки и генератора импульс напряжения испытывал отражения от промежутка и от генератора. В результате импульсы напряжения возвращались на промежуток каждые ≈ 50 нс и каждый раз меняли полярность при отражении от генератора.

Сигналы с шунта и емкостного делителя напряжения записывались осциллографом Tektronix MSO64B (8 ГГц, 20 выборок в нс).

Излучательные характеристики наносекундного разряда регистрировались между двумя электродами, которые 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, на которую подавались импульсы отрицательной полярности, ≈ 100 мкм, и у заземлённой иглы ≈ 300 мкм. Причём, заземлённая игла при предварительной тренировке электродов изменила форму на большей длине и стала приплюсненной. 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 один импульс [12]. Фотография разрядного промежутка показана внизу рис. 1а. Межелектродный зазор равнялся 4 мм и не менялся в данной серии экспериментов.

Для съёмки свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат Canon EOS 2000D (число пикселей 24,7 Мп, размер матрицы 22,3×14,9 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 чувствительность варьировалась в диапазоне 100–3200 ISO. Эмиссионные спектры разрядной плазмы регистрировалось при помощи спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.), оснащенного световодом из стекловолокна. Спектральная чувствительность спектрометра и пропускание световода в диапазоне $\Delta\lambda = 190$ –1100 нм известны. Разрешение оптической системы было не хуже $\sim 0,9$ нм. Кроме того, для фотографирования разряда применялась четырёхкадровая ICCD камера HSFC PRO.

Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась атмосферным воздухом с относительной влажностью 23 %. Измерения были проведены при давлениях 30, 100, 300 и ≈ 760 Торр.

Экспериментальные результаты

Исследования свечения воздуха в данной работе были проведены в условиях генерации убегающих электронов (УЭ). Наличие УЭ следует из результатов предыдущих работ, которые проводились в подобных условиях с плоским анодом из фольги [13–15], а также из измерений рентгеновского излучения (РИ) в данных условиях. Устанавливать коллектор для регистрации УЭ за анодом или вблизи него было сложно, поэтому для доказательства их наличия измерялись импульсы РИ. Рентгеновское излучение стабильно регистрировалось через боковое окно и диафрагму, которая была закрыта медной фольгой, рис. 1а. УЭ тормозились на заземлённом электроде и стенках камеры. Наличие РИ однозначно подтверждает генерацию в разряде убегающих электронов, длительность импульса тока пучка которых в подобных условиях при атмосферном давлении воздуха составляет ≈ 100 пс [15]. Генерация УЭ также следует из формирования диффузного разряда при высоких давлениях без дополнительного источника для предыонизации газа. Условия формирования диффузных разрядов, в том числе с регистрацией убегающих электронов и рентгеновского излучения описаны во многих работах, см., статьи [13, 14, 16] и обзор [15], а также ссылки в них.

Осциллограммы импульсов тока и напряжения, зарегистрированные при атмосферном давлении воздуха в условиях наблюдения светящихся треков, показаны на рис. 2.

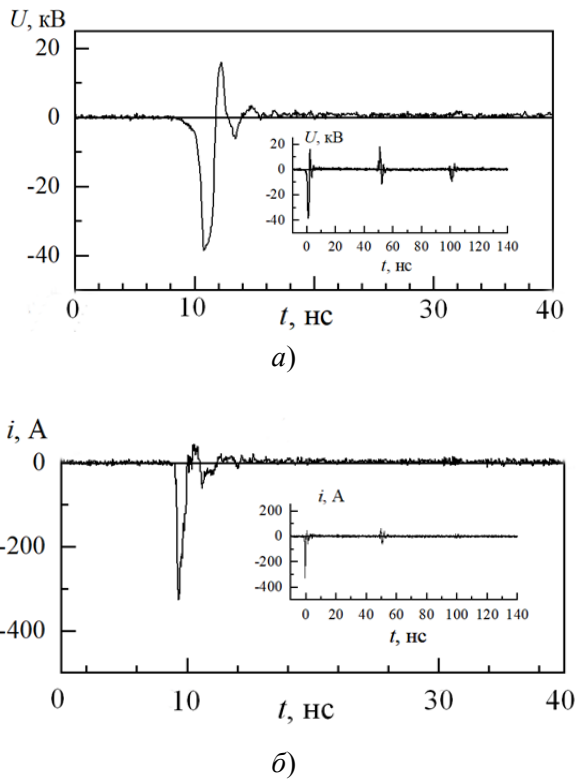


Рис. 2. Осциллограммы первого (основного) импульса напряжения на промежутке (а) и тока разряда (б). На вставках в рисунки вместе с первыми импульсами показаны отражённые импульсы напряжения и тока, которые приходили с задержкой ≈ 50 нс. $U_0 = -33$ кВ, $p = 760$ Торр

Стоит отметить, что осциллограмма показывает напряжения в зоне делителя напряжения, а не на промежутке по причине, описанной выше. Однако данная осциллограмма показывает, что импульс напряжения каждые 50 нс падает на промежуток из-за отражений от генератора и промежутка. Видно, что второй импульс напряжения (первый отражённый) имел положительную полярность, а третий – вновь отрицательную. Из осциллограмм на рис. 2 следует, что основная энергия вкладывается в плазму разряда при первом импульсе напряжения. Второй импульс тока, см. вставку на рис. 2б, имеет малую величину, а третий практически не заметен.

Наиболее важные данные были получены с применением длиннофокусного микроскопа с пространственным разрешением 1,7 мкм, который для исследования диффузного разря-

да при наносекундном разряде в резко неоднородном электрическом поле, по-видимому, был применён впервые. На рис. 3 показаны фотографии свечения разряда при атмосферном давлении воздуха и его относительной влажности 23 %.

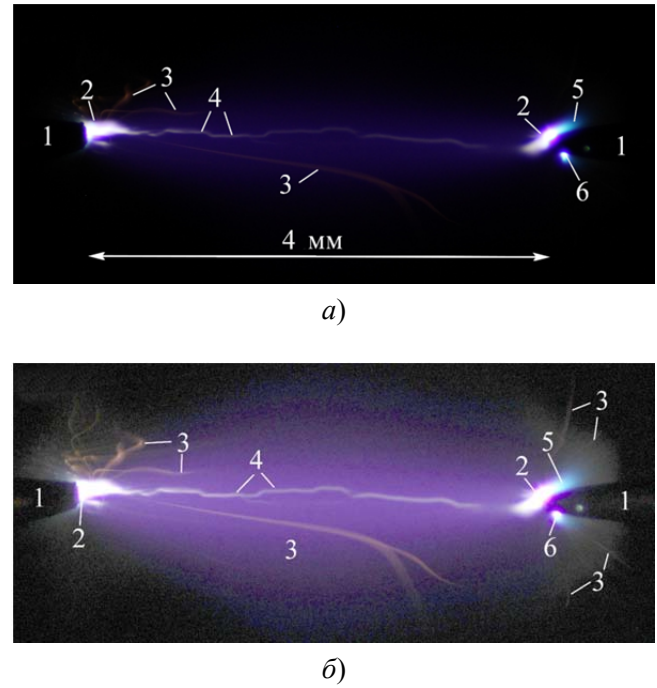


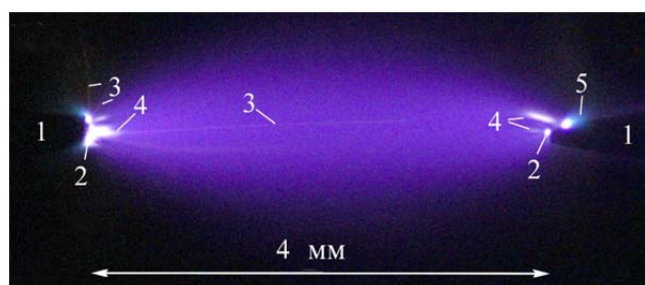
Рис. 3. Фотографии свечения разряда при атмосферном давлении воздуха и амплитуде импульса напряжения в падающей волне $U_0 = -33$ кВ. (а) – Исходное изображение свечения разрядного промежутка. (б) – То же изображение после коррекции уровней яркости и контраста. 1 – электроды, 2 – яркие пятна на электродах у их острий, 3 – тонкие светящиеся треки, 4 – искровой лидер с изгибами, 5 – область свечения голубого цвета, 6 – яркое пятно на боковой поверхности электрода. Заземлённый электрод слева

Данные фотографии показывают, что в свечении разряда можно выделить по яркости, цвету и форме различные области. На рис. 3а хорошо видны яркие пятна на электродах белого (2) и голубого цветов (5), а также прорастающий искровой лидер (4).

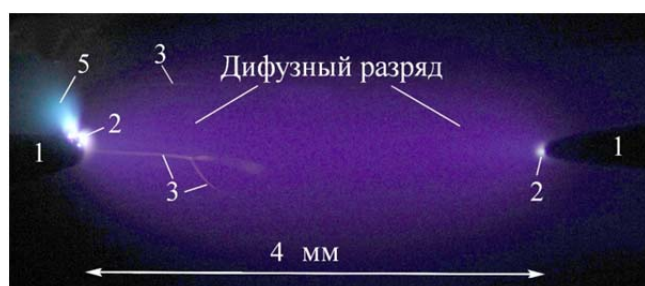
Используя программу коррекции уровней яркости изображений можно увидеть свечение диффузного разряда, который занимает всю область между электродами (1) и излучение (3) тонких светящихся треков (ТСТ), рис. 2б. Спектральные измерения показали, что при всех исследованных давлениях (760, 300, 100 и 30 Торр) основной вклад в свечение промежутка дают полосы второй положительной системы азота (+2), с максимумом интенсив-

ности на переходе 0-0, длина волны 337,1 нм. На рис. 2а излучение диффузного разряда из-за поглощения объектива микроскопа в ультрафиолетовой области спектра не заметно. Цвет ТСТ (3), как видно из рис. 3б, отличается от цвета искрового лидера (4) и катодных пятен (2) и (5). Минимальный размер трека в поперечном сечении не превышал 2 мкм, что соответствует пространственному разрешению микроскопа. Отметим, что на ширину наблюдаемых треков влияет их положение относительно фокуса объектива. При удалении от фокуса изображение размывается и становится шире. Было установлено, что форма треков и их длина весьма разнообразны и изменяется от импульса к импульсу. Интересно, что ТСТ могут изменять направление распространения на противоположное (рис. 3б, область выше левого электрода). При этом к одному яркому пятну может примыкать несколько треков. Следует также отметить, что ТСТ могут соприкасаться с периферией ярких пятен на электродах.

На рис. 4 показаны фотографии свечения разряда при давлении воздуха 300 и 100 Торр.



а)



б)

Рис. 4. Фотографии свечения разряда после коррекции уровней свечения. (а) – Изображение при $p = 300$ Торр и $U_0 = -18$ кВ. (б) – Изображение при $p = 100$ Торр и $U_0 = -33$ кВ. 1 – электроды, 2 – яркие пятна на электродах, 3 – тонкие светящиеся треки, 4 – область свечения голубого цвета. Заземлённый электрод слева

Изменение давления повлияло на форму ТСТ, которая также изменялась от импульса к импульсу. На рис. 4а видны два прямых трека, которые расположены у центральной оси разряда и имеют длину, превышающую половину разрядного промежутка. Также видны искровые лидеры (4), длина которых уменьшилась, см. рис. 3б.

Изображение ТСТ, который изменил направление и разделился на два различной формы показано на рис. 4б. Яркие пятна белого цвета стали появляются как на концах иглолок, так и на их боковой поверхности. Также, видна область голубого цвета (5), свечение которой связано с появлением паром железа [13].

Из анализа полученных фотографий, число которых было более 200, можно сделать следующие выводы:

1. ТСТ формируются с ярких пятен на электродах. Их форма и число изменяется от импульса к импульсу, а также от давления и амплитуды падающей волны напряжения U_0 . Уменьшение U_0 сокращает длину ТСТ, а также их число. Однако при давлении 30 Торр ТСТ наблюдались только при $U_0 = -18$ кВ. С уменьшением давления число ТСТ также становится меньше и сокращается их длина.

2. ТСТ могут изменять направление движения и раздваиваться.

3. Хотя импульсы высокого напряжения отрицательной полярности подавался на правый электрод, вершина которого имела меньший радиус кривизны, большее число ТСТ примыкало к левому заземлённому электроду.

4. При давлениях 100, 300 и 760 Торр яркие пятна присутствовали на обоих электродах. При давлении 30 Торр яркие пятна возникли только на левом электроде.

Следует также отметить, что ТСТ отсутствовали на изображениях стримеров и диффузного разряда, полученных с помощью ICCD камеры во время первых двух микросекунд после пробоя промежутка. Треки также отсутствовали на фоне диффузного разряда после появления ярких пятен на электродах с малым радиусом кривизны. Этот вывод согласуется с нашими результатами, полученными ранее [13, 15], и с результатами работ, которые были получены в четырёх научных группах [16–18], [19–21], [22] и [23]. В этих работах при фотографировании разряда, в том

числе, с помощью ICCD камеры, ТСТ не наблюдались. Хотя в работах [16–21] писалось о образовании микроканалов на начальной стадии разряда, которые можно связать с развитием искровых лидеров [7].

Обсуждение полученных результатов

Для объяснения причин формирования ТСТ можно выдвинуть следующую гипотезу. Наблюдаемые треки – это следы горячих частиц металла, которые вылетают из поверхности электродов в области её контакта с плотной плазмой. Поэтому их цвет отличается от цвета искровых лидеров. Первоначально плазма создаётся при разогреве и тепловом взрыве микронеоднородностей за счет большой плотности тока в этих местах. Созданная плазма усиливает электрическое поле на поверхности электродов, в том числе на её периферии.

Как показали исследования вакуумного разряда [2–5], уменьшение пробивного напряжения в вакууме нельзя связывать только с взрывной электронной эмиссией. Для понимания ограничений электрической прочности вакуумной изоляции надо учитывать влияние сильного электрического поля на механические свойства поверхности электродов. Из расчетов, проведённых в работе [5], следует, что в непрогретой области, размер которой значительно превышает размер центра взрывной эмиссии электронов, материал катода также подвергается воздействию разрушающих механических напряжений. В результате первичное появление катодного пятна при разряде в вакууме и образование плазмы у поверхности электрода приводит к множественным локальным разрушениям его ровной поверхности на периферии. В данных экспериментах наблюдалось образование ярких пятен, к которым примыкало несколько ТСТ, см. на рис. 3б область выше левого электрода. Также ТСТ примыкали к периферии свечения яркого пятна, рис. 4б, область ниже левого электрода.

Резкие изгибы треков и направления их движения можно объяснить наличием в промежутке после его пробоя заряженных областей плазмы, а также изменением величины и

знака заряда частиц в ТСТ во время их движения. Отметим, что в воздухе треки наблюдались с поверхности электродов, имеющих не только отрицательную, но и положительную полярность. Влияние различных факторов на появление и распространение тонких плазменных треков требует дополнительных исследований, которые мы планируем провести.

Заключение

Фотографирование с помощью длиннофокусного микроскопа, имеющего высокое пространственное разрешение, плазмы наносекундных разрядов, формируемых в неоднородном электрическом поле, позволило обнаружить в воздухе на фоне диффузного разряда тонкие светящиеся треки. Установлено, что ТСТ стартуют с обоих электродов, могут двигаться в различных направлениях, раздваиваться и иметь резкие изгибы. Они отличаются по цвету от искровых лидеров, которые приводят в газах к замыканию промежутка искровым каналом. Считаем, что образование большого числа ТСТ связано с вылетом частиц металла из поверхности электродов под воздействием высокого электрического поля из-за механических явлений при образовании первичной плотной плазмы в результате теплового взрыва микронеоднородностей. Кроме того, можно предположить, что частицы металла, в области их появления, усиливают электрическое поле и в ряде случаев инициируют стримеры, а затем распространяться по их следу. В этом случае траектории частиц и стримеров должны совпадать на отдельных участках и быть прямыми, что было зафиксировано в ряде импульсов, см. рис. 4а.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beilis I. Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. – Switzerland: Springer Nature, 2020.
2. Nefedtsev E. V., Onischenko S. A. / Proc. of 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Italy: Padova, 2021. P. 23–26.

3. Yakovlev E. V., Petrov V. I., Onischenko S. A., Nefedtsev E. V. / Proc. of 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Italy: Padova, 2021. P. 81–84.
4. Korsbäck A., Djurabekova F., Wuensch W. / AIP Advances. 2022. Vol. 12. P. 115317.
5. Nefedtsev E. V., Onischenko S. A. / Tech. Phys. Lett. 2022. Vol. 48. P. 69.
6. Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., Burachenko A., Lomaev M., Sorokin D. / Nanomaterials. Vol. 12. P. 652.
7. Lomaev M., Tarasenko V., Shulepov M., Beloplotov D., Sorokin D. / Surfaces. 2023. Vol. 6. № 1. P. 40.
8. Syrovatka R. A., Lipaev A. M., Naumkin V. N., Klumov B. A. / JETP Letters. 2022. Vol. 116. P. 869.
9. Panchenko A. N., Beloplotov D. V., Kozevnikov V. V., Sorokin D. A., Tarasenko V. F. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. Vol. 49. P. 1614.
10. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M., Zazoulin S. V. / Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9. – New York: Springer-Verlag, 2010.
11. Chsherbakov I., Chsherbakov P., Lozinskaya A., Mihaylov T., Novikov V., Shemeryankina A., Tolbanov O., Tyazhev A., Zarubin A., Beloplotov D., Tarasenko V. / J. of Instrumentation. 2019. Vol. 14. P. C12016.
12. Korolev Yu. D., Kuzmin V. A., Mesyats G. A. / Sov. Phys. Tech. Phys. 1980. Vol. 25. P. 418.
13. Tarasenko V., Beloplotov D., Lomaev M., Sorokin D. / Plasma Sci. and Technol. 2019. Vol. 21. P. 044007.
14. Huang B., Zhang C., Ren C., Shao T. / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. P. 114002.
15. Tarasenko V. / Plasma Sources Sci. and Technology. 2020. Vol. 29. P. 034001.
16. Rep'ev A. G., Repin P. B., Pokrovskii V. S. / Tech. Phys. 2007. Vol. 52. P. 52.
17. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Kurbanismailov V. S., Khalikova Z. R., Omarova P. K., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Trenkin A. A. / Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27. P. 123507.
18. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V., Trenkin A. A. / Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. P. 095020.
19. Parkevich E. V., Ivanenkov G. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A. / Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 11LT01.
20. Parkevich E. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Ivanenkov G. V., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Shpakov K. V., Oginov A. V. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. P. 25007.
21. Smaznova K., Khirianova A., Parkevich E., Medvedev M., Varaksina E., Khirianov T., Oginov A., Selyukov A. / Opt. Express. 2021. Vol. 29. P. 35806.
22. Van der Horst R. M., Verreycken T., Van Veldhuizen E. M., Bruggeman P. J. / J. Phys. D Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 345201.
23. Patel K., Saha A., Zhou T., Meyer T. R., Bane S., Satija A. / Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 1200. P. 014101.

PACS: 52.80.Tn

Thin luminous tracks during a nanosecond discharge in a nonuniform electric field

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

Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Academicheskoy Ave., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru

Received 27.04.2023; accepted 2.06.2023

The glow of a nanosecond diffuse discharge between two tips has been studied with a high spatial resolution. At atmospheric air pressure, as well as at pressures of 300, 100 and 30 Torr, a large number of thin luminous tracks were found, starting from the region of bright spots on the electrodes. It is shown that the shape of the tracks changes from straight lines to winding ones, and the direction of their movement in some cases changes to the opposite. It has been established that under the conditions of the formation of thin luminous tracks, the bands of the second positive nitrogen system dominate in the emission spectrum of a diffuse plasma with a sharply inhomogeneous electric field and a nanosecond duration of the voltage pulse. Using an ICCD camera, it was shown that the emission of tracks in the

first tens of nanoseconds against the background of wide streamers and a diffuse discharge is not recorded. A hypothesis has been put forward to explain the appearance of numerous tracks during the breakdown of air in a nonuniform electric field.

Keywords: luminous tracks, nanosecond discharge, air, inhomogeneous electric field.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-4-312-319

REFERENCES

1. Beilis I., Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs, Switzerland, Springer Nature, 2020.
2. Nefedtsev E. V. and Onischenko S. A., In Proc. of 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Italy, Padova, 2021, pp. 23–26.
3. Yakovlev E. V., Petrov V. I., Onischenko S. A. and Nefedtsev E. V., In Proc. of 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Italy, Padova, 2021, pp. 81–84.
4. Korsbäck A., Djurabekova F. and Wuensch W., AIP Advances **12**, 115317 (2022).
5. Nefedtsev E. V. and Onischenko S. A., Tech. Phys. Lett. **48**, 69 (2022).
6. Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., Burachenko A., Lomaev M. and Sorokin D., Nanomaterials **12**, 652 (2022).
7. Lomaev M., Tarasenko V., Shulepov M., Beloplotov D. and Sorokin D., Surfaces **6** (1), 40 (2023).
8. Syrovatka R. A., Lipaev A. M., Naumkin V. N. and Klumov B. A., JETP Letters **116**, 869 (2022).
9. Panchenko A. N., Beloplotov D. V., Kozevnikov V. V., Sorokin D. A. and Tarasenko V. F., IEEE Transactions on Plasma Science **49**, 1614 (2021).
10. Efanov V. M., Efanov M. V., Komashko A. V., Kriklenko A. V., Yarin P. M. and Zazoulin S. V., Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9, New York, Springer-Verlag, 2010.
11. Chsherbakov I., Chsherbakov P., Lozinskaya A., Mihaylov T., Novikov V., Shemeryankina A., Tolbanov O., Tyazhev A., Zarubin A., Beloplotov D. and Tarasenko V., J. of Instrumentation **14**, C12016 (2019).
12. Korolev Yu. D., Kuzmin V. A. and Mesyats G. A., Sov. Phys. Tech. Phys. **25**, 418 (1980).
13. Tarasenko V., Beloplotov D., Lomaev M. and Sorokin D., Plasma Sci. and Technol. **21**, 044007 (2019).
14. Huang B., Zhang C., Ren C. and Shao T., Plasma Sources Sci. Technol. **31**, 114002 (2022).
15. Tarasenko V., Plasma Sources Sci. and Technology **29**, 034001 (2020).
16. Rep'ev A. G., Repin P. B. and Pokrovskii V. S., Tech. Phys. **52**, 52 (2007).
17. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Kurbanismailov V. S., Khalikova Z. R., Omarova P. K., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V. and Trenkin A. A., Phys. Plasmas **27**, 123507 (2020).
18. Almazova K. I., Belonogov A. N., Borovkov V. V., Khalikova Z. R., Ragimkhanov G. B., Tereshonok D. V. and Trenkin A. A., Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 095020 (2021).
19. Parkevich E. V., Ivanenkov G. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A. and Pikuz S. A., Plasma Sources Sci. Technol. **27**, 11LT01 (2018).
20. Parkevich E. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Ivanenkov G. V., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Shpakov K. V. and Oginov A. V., Plasma Sources Sci. Technol. **28**, 125007 (2019).
21. Smaznova K., Khirianova A., Parkevich E., Medvedev M., Varaksina E., Khirianov T., Oginov A. and Selyukov A., Opt. Express **29**, 35806 (2021).
22. Van der Horst R. M., Verreycken T., Van Veldhuizen E. M. and Bruggeman P. J., J. Phys. D Appl. Phys. **45**, 345201 (2012).
23. Patel K., Saha A., Zhou T., Meyer T. R., Bane S. and Satija A., Appl. Phys. Lett. **1200**, 014101 (2022).