

Режим импульсов Тричела и предшествующая ему стадия при инициировании коронного разряда

Е.Х. Бакуит^{}, В.Ф. Тарасенко*

Институт Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**beh@loi.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Работа посвящена исследованию отрицательного коронного разряда в воздухе атмосферного давления. Для его инициирования использовалась система электродов «острие (катод) – плоскость (анод)» с межэлектродным зазором величиной 10–20 мм и радиусом кривизны острия ≈ 20 мкм. Показано, что на стадии, предшествующей режиму импульсов Тричела, ток разряда не регистрируется в пределах ошибки измерений ± 0.2 нА. Впервые обнаружено, что в определенном диапазоне напряжений режим импульсов Тричела после его инициирования становится нестабильным и периодически сменяется безимпульсным режимом горения разряда с током ≈ 1 мкА.

Ключевые слова: отрицательный коронный разряд, темный таунсендовский разряд, импульсы Тричела.

1. Введение

Коронный разряд давно привлекает к себе внимание исследователей. Это связано не только с его практическим использованием, но и с чисто научным интересом к фундаментальным основам этого явления, так как до сих пор ряд вопросов, связанных с возникновением и функционированием коронного разряда, остаются дискуссионными. Одним из них является вопрос о величине и природе тока отрицательной короны в стадии, предшествующей первому импульсу Тричела (ИТ).

Первые измерения тока и его осциллографирование (с предварительным усилением сигнала) в этой стадии провел А. Кип [1]. В его экспериментах ток изменялся от субнаноамперного уровня до ~ 10 нА в зависимости от поданного на электроды напряжения. В работе [2] также исследовалась стадия коронного разряда перед ИТ в воздухе и азоте. Было высказано предположение о том, что причиной тока в этой стадии служит автоэлектронная эмиссия. В работах [3–5] сообщается о существенно больших токах отрицательной короны (~ 0.1 – 1 мкА) в воздухе, азоте, аргоне, а также других газах и газовых смесях перед началом первого импульса (в электроотрицательных газах это ИТ). Токи регистрировались с помощью микроамперметра. Наличие этих токов авторы объясняют возникновением темного таунсендовского разряда в определенном диапазоне напряжений, предшествующем напряжению зажигания «сильноточной» стадии отрицательной короны (с пиковыми значениями тока ~ 1 мА). Кроме того, несмотря на достаточно большое количество работ по моделированию коронного разряда, подробное моделирование этой фазы разряда не проводилось.

Наличие большого разброса в измеренных значениях тока на стадии, предшествующей первому ИТ требует дополнительных экспериментальных исследований этой стадии коронного разряда. Такому исследованию и посвящена данная работа. Помимо этого, в работе исследуется, насколько устойчив режим регулярных ИТ после его инициирования.

2. Экспериментальная аппаратура и методики измерений

Стадия, предшествующая ИТ, а также сам режим ИТ исследовались на экспериментальной установке, схематично изображенной на Рис. 1.

При зажигании отрицательного коронного разряда использовалась конфигурация электродов «острие (катод) – плоскость (анод)». Разряд зажигался в воздухе атмосферного давления. Межэлектродный зазор d составлял 10–20 мм. Величина ёмкостей составляла:

$C_1 = 3$ пФ, $C_2 = 9$ пФ (C_1 и C_2 – конструктивные ёмкости); величина C_p составляла 117 пФ (суммарная ёмкость регистрационного кабеля и мегаомного входа осциллографа), либо 3.5 нФ. Ёмкость C_p демпфировала большие пиковые токи ИТ и позволяла регистрировать квазистационарный ток в условиях, когда амплитуда исследуемого сигнала могла меняться на 5–7 порядков. Сопротивление шунта R_3 составляло 0.1 МОм, либо отсутствовало. Напряжение на электроды подавалось от источника питания через балластное сопротивление $R_b = 3$ МОм. Источник высокого напряжения мог подавать на промежуток напряжение в диапазоне (0–5) кВ с шагом 10 В. Источник также позволял автоматически поднимать напряжение до заданного уровня с постоянной скоростью ≈ 400 В/с.

Катодом служила стальная игла диаметром 0.32 мм с радиусом скругления острия $r \approx 20$ мкм. В ходе экспериментов радиус скругления острия существенно не изменялся.

Напряжение на разрядном промежутке измерялось с помощью высоковольтного пробника АСА-6039 (R_1 и R_2) с полосой пропускания 50 МГц. Электрические сигналы регистрировались осциллографом MDO 3104 (1 ГГц, 5 выборок/нс), либо TDS3034 (300 МГц, 2.5 выборок/нс). Сигнал с сопротивления R_3 поступал на осциллограф через 50-омный кабель длиной 1 м. В зависимости от характера исследований использовался либо 50-омный, либо мегаомный вход осциллографа. При использовании мегаомного входа и токах разряда ≈ 0.1 мА система регистрации тока представляла собой интегрирующую цепь с постоянной времени RC_p , где $R \approx R_3$, либо $R \approx R_{osc} = 1$ МОм, R_{osc} – входное сопротивление осциллографа (при токах, больших 0.1 мА, в выражении для R уже нельзя пренебрегать сопротивлением разряда, который в наших условиях возникал при напряжениях ≈ 2.3 кВ). Временное разрешение системы регистрации тока коронного разряда при этом существенно снижалось, однако это не влияло на точность регистрации квазистационарного тока, каким в данных условиях являлся ток темного таунсендовского разряда [3–5], предшествующий первому ИТ.

Для уменьшения высокочастотного шума полоса пропускания осциллографа была уменьшена до $\Delta f_{osc} = 20$ ГГц, что привело к уменьшению временного разрешения осциллографа до ~ 20 нс. Все изменения в системе регистрации тока коронного разряда были направлены на то, чтобы регистрировать токи меньше 1 мкА, и не оказывать влияния на их амплитуды при длительностях импульсов много больше $R_3 C_p = (11.7–350)$ мкс, либо $R_{osc} C_p = (0.12–3.5)$ мс, в том числе – на квазистационарный ток темного таунсендовского разряда. Импульсы с длительностью $\sim RC_p$ и менее искажались по форме и уменьшались по амплитуде, однако также могли регистрироваться.

Все измерения выполнялись с контролем температуры, относительной влажности и давления атмосферного воздуха в помещении, при этом изменения температуры и влажности были незначительными (22–24 °С и 18–24%, соответственно).

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Исследование стадии, предшествующей импульсам Тричела

Параметры ИТ в воздухе атмосферного давления зависят от целого ряда факторов – напряжения на разрядном промежутке, радиуса кривизны электрода и его материала, влажности воздуха и т.п. Пиковый ток ИТ может достигать величины $\sim (1–10)$ мА [6, 7], при этом первый импульс всегда имеет максимальную амплитуду, так как развивается в отсутствие фона отрицательных ионов [6]. На первом этапе исследовался первый ИТ и предшествующая ему стадия.

На Рис. 2 представлены типичные осциллограммы тока первого ИТ и напряжения на разрядном промежутке.

Видно, что амплитуда тока составляет ~ 1 мА, а длительность импульса на полувысоте ~ 10 нс. ИТ практически не изменяли напряжение на разрядном промежутке, так как

переносимый ими заряд составлял, по нашим оценкам, не более 0.04 нКл. В условиях эксперимента это соответствовало уменьшению напряжения ≤ 4 В. Из-за малой интенсивности зарегистрировать излучение первого ИТ не удалось даже с помощью ICCD-камеры.

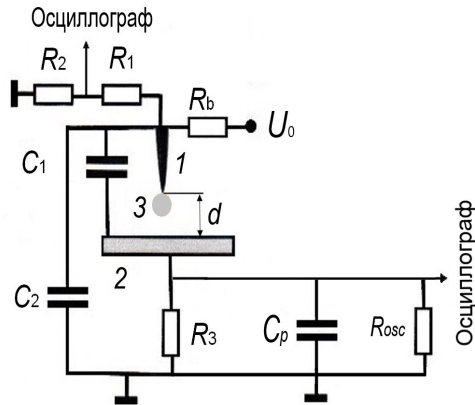


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – катод (остриё); 2 – анод (плоский электрод); 3 – область свечения коронного разряда.

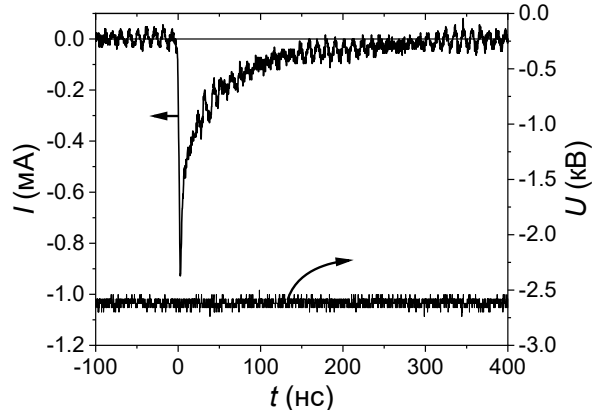


Рис. 2. Осциллограммы тока первого ИТ и напряжения на межэлектродном промежутке. $d = 10$ мм, $R_{osc} = 50$ Ом, $\Delta f_{osc} = 1$ ГГц.

Для определения величины тока, который может протекать в межэлектродном промежутке перед первым ИТ, использовалась максимальная чувствительность осциллографа (1 мВ/дел.), а в качестве токового шунта использовался вход осциллографа с сопротивлением $R_{osc} = 1$ МОм. Параллельно входу осциллографа подключался конденсатор, так что общая емкость системы регистрации составляла $C_p = 3.5$ нФ и $R_{osc}C_p = 3.5$ мс.

Работоспособность системы регистрации тока разряда подтверждается тем, что в ходе экспериментов были сняты осциллограммы тока зарядки конструктивной емкости системы электродов C_1 (Рис. 3), замыкающегося током смещения $I_{dis} = C_1 \cdot dU/dt$, где U – напряжение на межэлектродном промежутке. На Рис. 3 видно, что участку линейного роста напряжения соответствует прямоугольный импульс тока, амплитуда которого $I = (1.1 \pm 0.2)$ нА совпадает с величиной расчётного тока смещения $I_{dis} = 1.2$ нА в пределах точности измерений. Пики на осциллограмме тока после окончания роста напряжения соответствуют ИТ, однако их амплитуда на несколько порядков меньше реальной из-за того, что осциллограмма тока снималась в режиме усреднения по 128 импульсам, а также из-за большой величины емкости $C_p = 3.5$ нФ и ограничения полосы пропускания осциллографа величиной 20 МГц.

На Рис. 4 изображены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке и тока коронного разряда, фиксируемого описанной системой регистрации. Ошибка измерения квазистационарного тока составила ± 0.2 нА.

Форма ИТ на Рис. 4 искажена по сравнению с импульсом на Рис. 2 из-за большой величины постоянной времени цепи регистрации тока $R_{osc}C_p = 3.5$ мс, однако это обстоятельство практически не влияло на импульсы длительностью ≈ 35 мс, как отмечалось выше. Видно, что в наших условиях, в отличие от [3–5], ток перед первым ИТ не регистрируется в пределах точности измерений.

Подобные измерения были проведены также для системы регистрации тока с $C_p = 117$ пФ $R_3 = 0.1$ МОм и постоянной времени $RC_p \approx R_3C_p = 11.7$ мкс, как для межэлектродных зазоров $d = 20$ мм, так и для $d = 10$ мм. При этом ошибка измерения квазистационарного тока составила ± 2 нА. Такая схема регистрации тока позволяла определять наличие темного таунсендовского разряда в меньшем временном масштабе.

Однако результат измерения тока остался прежним – в пределах точности измерений ток перед первым ИТ не регистрировался.

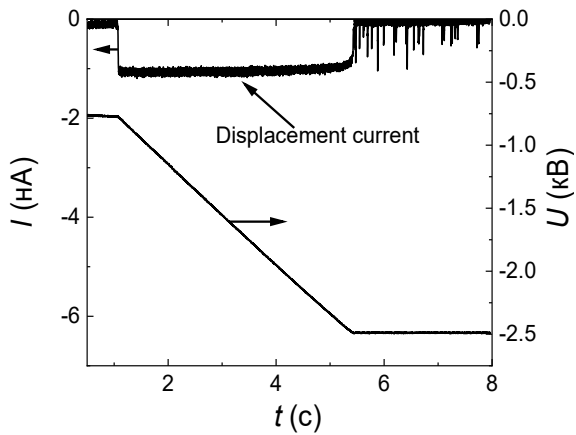


Рис. 3. Осциллограммы тока зарядки ёмкости системы электродов $C_1 = 3$ пФ, а также напряжения на межэлектродном промежутке. Усреднение по 128 импульсам. $d = 20$ мм, $C_p = 3.5$ нФ, $RC_p = R_{osc}C_p = 3.5$ мс, $R_{osc} = 1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

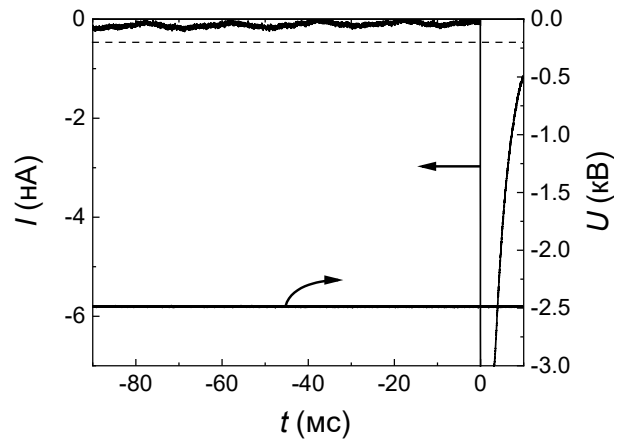


Рис. 4. Осциллограммы тока первого ИТ и предшествующей ему стадии, а также напряжения на межэлектродном промежутке. Усреднение по 32 импульсам. Пунктиром показана граница ошибки измерения квазистационарного тока. $d = 20$ мм, $C_p = 3.5$ нФ, $RC_p = R_{osc}C_p = 3.5$ мс, $R_{osc} = 1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

3.2. Исследование режима импульсов Тричела

В ходе экспериментов было установлено, что в наших условиях режим ИТ может быть неустойчивым в определенном диапазоне напряжений. Это иллюстрируют Рис. 5 и 6. Осциллограммы на Рис. 5 были сняты в процессе включения напряжения после длительного перерыва. После инициирования ИТ генерировались продолжительное время (> 1 мин). Затем источник высокого напряжения выключили и снова включили с малой задержкой.

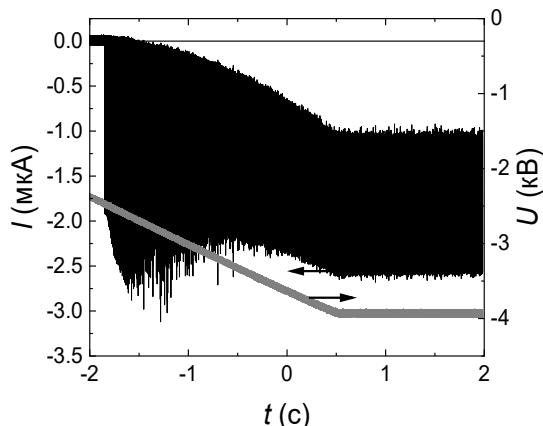


Рис. 5. Осциллограммы тока и напряжения разряда. $d = 20$ мм, $C_p = 117$ пФ, $RC_p = R_3C_p = 11.7$ мкс, $R_{osc} = 0.1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

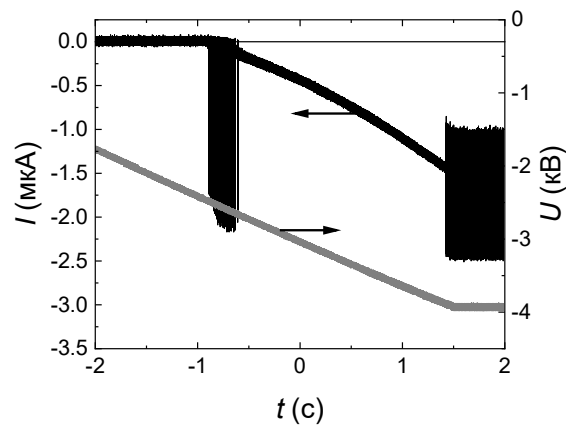


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения разряда. $d = 20$ мм, $C_p = 117$ пФ, $RC_p = R_3C_p = 11.7$ мкс, $R_{osc} = 0.1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

Осциллограммы на Рис. 6 сняты в процессе повторного включения напряжения. На Рис. 5 видно, что, начиная с напряжения ~ 2.5 кВ, загорается коронный разряд, который функционирует в режиме ИТ при подъеме напряжения вплоть до наибольшего в данном случае (4 кВ). Однако при повторном включении наблюдается изменение функционирования коронного разряда. В диапазоне низких напряжений от (2.6–2.7) кВ до ~ 4.5 кВ импульсный

режим становится неустойчивым, Рис. 6. Разряд может переходить из режима с ИТ в безимпульсный и обратно. При этом, продолжительности обоих режимов могут составлять единицы секунд. При напряжении ~ 4.5 кВ и выше коронный разряд наблюдается в устойчивом режиме ИТ вплоть до формирования тлеющего разряда с яркой точкой на катоде. При высоких напряжениях тлеющий разряд переходит в искровой [7].

На Рис. 7 и 8 показано, что возникновение неустойчивости импульсного режима связано с появлением и постепенным увеличением длительности безимпульсной фазы коронного разряда. Осциллограммы на этих рисунках сняты после первой 30-секундной подачи высокого напряжения на электроды, выключения и повторного включения напряжения (осциллограммы на Рис. 8 сняты на несколько секунд позже, чем осциллограммы на Рис. 7).

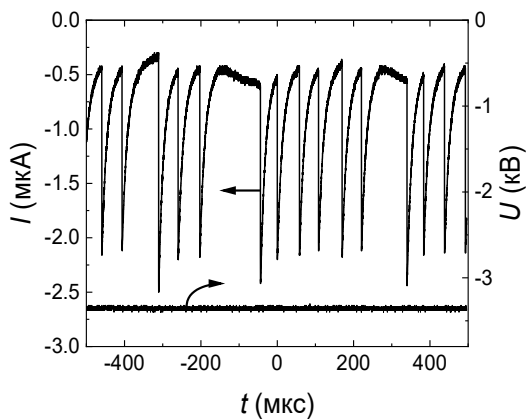


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения разряда.
 $d = 20$ мм, $C_p = 117$ пФ, $RC_p = R_3C_p = 11.7$ мкс,
 $R_{osc} = 0.1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

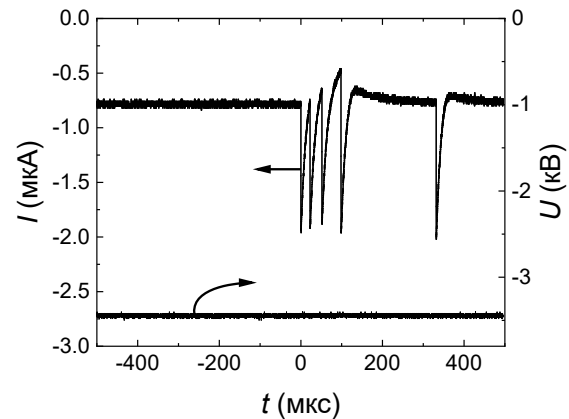


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения разряда.
 $d = 20$ мм, $C_p = 117$ пФ, $RC_p = R_3C_p = 11.7$ мкс,
 $R_{osc} = 0.1$ МОм, $\Delta f_{osc} = 20$ МГц.

В известной нам литературе нет описания подобного явления, и физические причины, объясняющие такое поведение коронного разряда, пока неясны. Возможно, оно связано с накоплением метастабильных частиц, увеличении их участия в ионизационных и γ -процессах с образованием неустойчивого преддугового пятна [8] и безимпульсной фазы горения коронного разряда, подобно описанному в [9, 10], с той разницей, что в [9, 10] безимпульсная фаза горения была устойчива и начиналась после достижения средним током коронного разряда определенного критического значения. Отметим, что большие задержки между первыми ИТ нами наблюдались ранее [11].

4. Заключение

В настоящей работе экспериментально была исследована стадия, предшествующая первому ИТ в воздухе атмосферного давления. Показано, что в условиях эксперимента ток на этой стадии в пределах точности измерений (± 0.2 нА) не регистрируется.

Установлено, что имеется диапазон сравнительно низких напряжений, в котором режим ИТ нестабилен и периодически сменяется квазистационарной безимпульсной фазой существования коронного разряда с токами ≈ 1 мкА. При этом безимпульсная фаза горения с течением времени увеличивается по длительности, достигая уровня в единицы секунд и более. Это явление обнаружено впервые, причины его пока неясны и требуют дополнительных исследований.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00166.

5. Список литературы

- [1] L. Loeb, A. Kip, G. Hudson, and W. Benett, Pulses in negative point-to-plane corona, *Phys. Rev.* vol. **60**, 714, 1941; doi: 10.1103/PhysRev.60.714
- [2] H. Korge, M. Laan, and P. Paris, On the formation of negative coronas, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **26**, 231236, 1993; doi: 10.1088/0022-3727/26/2/010
- [3] Y. Zhang, Y. Qin, G. Zhao, and J. Ouyang, Time-resolved analysis and optical diagnostics of Trichel corona in atmospheric air, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **49**, 245206, 2016; doi: 10.1088/0022-3727/49/24/245206
- [4] Y. Zhang, Q. Xia, Z. Jiang, and J. Ouyang, Trichel pulse in various gases and the key factor for its formation, *Scientific reports*, vol. **7**, 10135, 2017; doi: 10.1038/s41598-017-10118-2
- [5] Y. He, A. Sun, X. Zhang, J. Xue, and G. Zhang, Effect of trace SF₆ on negative corona characteristics in SF₆/N₂ gas mixtures under DC voltages, *AIP Advances*, vol. **10**, 085303, 2020; doi: 10.1063/5.0013024
- [6] M. Černák, T. Hosokawa, S. Kobayashi, and T. Kaneda, Streamer mechanism for negative corona current pulses, *J Appl. Phys.*, vol. **83**, 5678, 1998; doi: 10.1063/1.367422
- [7] Y. Raizer, *Gas discharge physics*, Berlin: Springer, 1997.
- [8] Ю. Акишев, А. Напартович, В. Понамаренко, Н. Трушкин, Исследование преддугового катодного пятна в стационарном тлеющем разряде, *ЖТФ*, т. **55**, 655, 1985.
- [9] Y. Akishev, M. Grushin, V. Karal'nik, and N. Trushkin, Pulsed mode of a negative corona in nitrogen: I. Experiment, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **27**, 520, 2001; doi: 10.1134/1.1378130
- [10] Y. Akishev, M. Grushin, V. Karal'nik, and N. Trushkin, Pulsed mode of a negative corona in nitrogen: II. Numerical calculations, *Plasma Phys. Rep.*, vol. **27**, 532, 2001; doi: 10.1134/1.1378131
- [11] V. Kozhevnikov, A. Kozyrev, V. Tarasenko, A. Kokovin, E. Baksht, and N. Vinogradov, Key Modes of Ignition and Maintenance of Corona Discharge in Air, *Energies*, vol. **16**, 4861, 2023; doi: 10.3390/en16134861