

## Динамика свечения плазмы высоковольтного наносекундного разряда в воздухе, азоте и гелии при наличии слоя сажи на поверхности заземленного анода

М.И. Ломаев<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

\*[lomaev@loi.hcei.tsc.ru](mailto:lomaev@loi.hcei.tsc.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию динамики свечения плазмы высоковольтного наносекундного разряда в резко неоднородном электрическом поле в воздухе, азоте и гелии при наличии слоя сажи на поверхности заземленного плоского анода. Регистрация свечения плазмы осуществлялась четырехканальной высокоскоростной ICCD-камерой. Внешний вид разряда фиксировался полнокадровой (36×24 мм) камерой с разрешением 30.3 Мп, оснащенной длиннофокусным микроскопом. Установлено, что образование анодных пятен при наличии слоя сажи на поверхности заземленного электрода происходит в течение не более 10 нс после прихода импульса напряжения. Скорость распространения фронта свечения плазмы, образующейся из анодных пятен при разряде во всех исследованных газах, достигает нескольких сотен м/с в первую микросекунду после подачи импульса напряжения на разрядный промежуток. При разряде в воздухе в межэлектродном промежутке зарегистрировано плазменно-стимулированное зажигание и плазменно-стимулированное горение смеси воздуха и паров сажи.

**Ключевые слова:** высоковольтный наносекундный разряд, свечение плазмы, плазменно-стимулированное зажигание, плазменно-стимулированное горение.

### 1. Введение

В настоящее время низкотемпературная плазма (НТП) является очень важным объектом исследования в науке и применения на практике. Результаты изучения и практического применения НТП описаны во многих монографиях и обзорах [1–6]. Области применения НТП разнообразны и включают микроэлектронику, синтез наноматериалов, биотехнологию и плазменную медицину, плазменное зажигание и горение, химическую конверсию, плазменную резку, сварку, экологию, сельское хозяйство, плазменную аэродинамику и другие, в том числе, модификацию поверхности материала с помощью НТП, генерируемой газовым разрядом. Так называемые быстрые импульсные разряды [4] позволяют создавать плазму с высокой плотностью реактивных частиц, что обеспечивает высокую эффективность технологий на основе плазмы. С этой точки зрения весьма перспективны высоковольтные наносекундные разряды, инициируемые убегающими электронами. Для анализа результатов воздействия плазмы на поверхность заземленного анода был использован метод автографов. Для повышения чувствительности этого метода было предложено использовать слой сажи, наносимый на поверхность заземленного анода [7]. Воспламенение углеродных частиц наблюдалось при нанесении слоя сажи на заземленный медный анод и реализации высоковольтного наносекундного разряда на воздухе при уменьшенной ширине зазора [8]. Целью данного исследования является выявление динамики свечения плазмы разряда в воздухе, азоте и гелии при нанесении слоя сажи на поверхность анода.

### 2. Экспериментальная установка

Схема установки, использованной в экспериментах, представлена на рис. 1. Высоковольтные импульсы, формируемые твердотельными генераторами NGP-18/3500N (Megaimpulse Ltd., Burbach, St. Petersburg, Russia) и GIN-100-1 (FID GmbH, Burbach, Germany) [9], подавались на высоковольтный катод малого радиуса кривизны и плоский заземленный анод (характеристики генераторов представлены в Табл. 1).

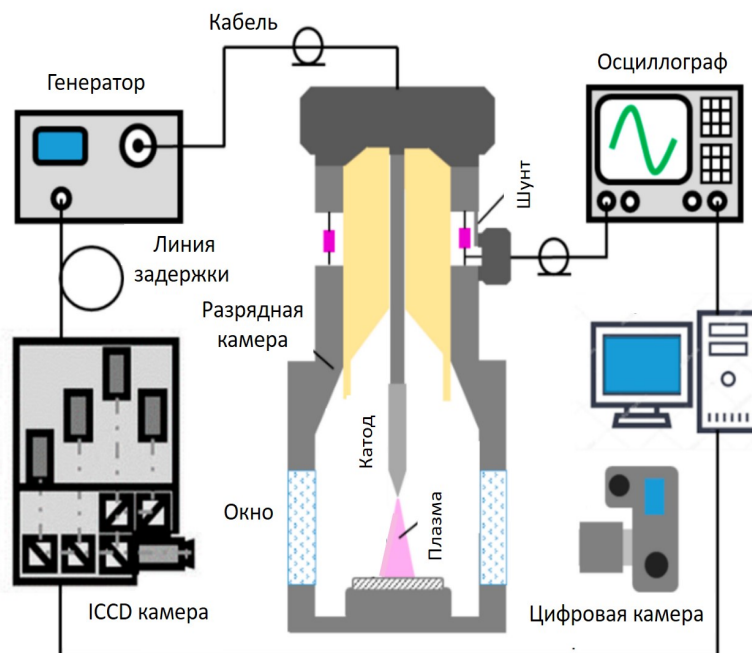


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Поверхность анода покрывалась слоем сажи толщиной 10–40 мкм. Ширина межэлектродного зазора варьировалась в пределах 4–10 мм. Разрядная камера заполнялась воздухом, азотом или гелием при атмосферном давлении. Интегральные по времени изображения свечения плазмы были получены полнокадровой (36×24 мм) цифровой камерой Canon EOS R2 с разрешением 30.3 Мп (Canon Ltd., Токио, Япония). Изображения с временным разрешением были получены с помощью высокоскоростной четырехканальной камеры HSFC-PRO ICCD (PCO Computer Optics GmbH, Кельхайм, Германия). Минимальная экспозиция всех каналов ICCD камеры составляет 3 нс. Импульсы возбуждения измерялись с помощью шунта обратного тока сопротивлением 0.014 Ом, изготовленного из малоиндуктивных SMD-резисторов. Для регистрации электрических сигналов использовался цифровой осциллограф TDS MDO3102 (Tektronix Inc., Beaverton, OR, USA) с полосой пропускания 1 ГГц и частотой дискретизации 5 Гвыб/с.

Таблица 1. Характеристики генераторов NGP-18/3500N и GIN-100-1.

Модель	Амплитуда, кВ	Длительность (FWHM), нс	Время нарастания, нс
NGP-18/3500N	18	8.0	4.0
GIN-100-1	20	4.5	2.5

### 3. Экспериментальные результаты

Регистрация внешнего вида и исследование динамики свечения плазмы проводились в воздухе, азоте и гелии при атмосферном давлении с наличием и без слоя сажи на поверхности заземленного плоского анода. Изображения свечения плазмы во всех исследованных газах со слоем сажи на аноде представлены на рис. 2. Видно, что горение сажи наблюдается только на воздухе и основная зона горения находится на расстоянии примерно 1 мм от анода (рис. 2а). Исследование динамики свечения плазмы на воздухе с помощью четырехканальной ICCD-камеры HSFC-PRO показало, что пламя возникает спустя ~0.75 мс после пробоя газового промежутка из плазменного столба, образовавшегося над поверхностью анода, и сохраняется на протяжении не менее 50 мс, увеличиваясь в объеме

(рис. 3б, 3в). Важно отметить, что ярко светящийся слой на поверхности анода появляется не позднее 10 нс после пробоя газового промежутка только при наличии слоя сажи на аноде (рис. 3а). Регистрация положения фронта свечения плазмы в последующие моменты времени позволяет оценить скорость распространения плазмы в направлении от анода катоду.

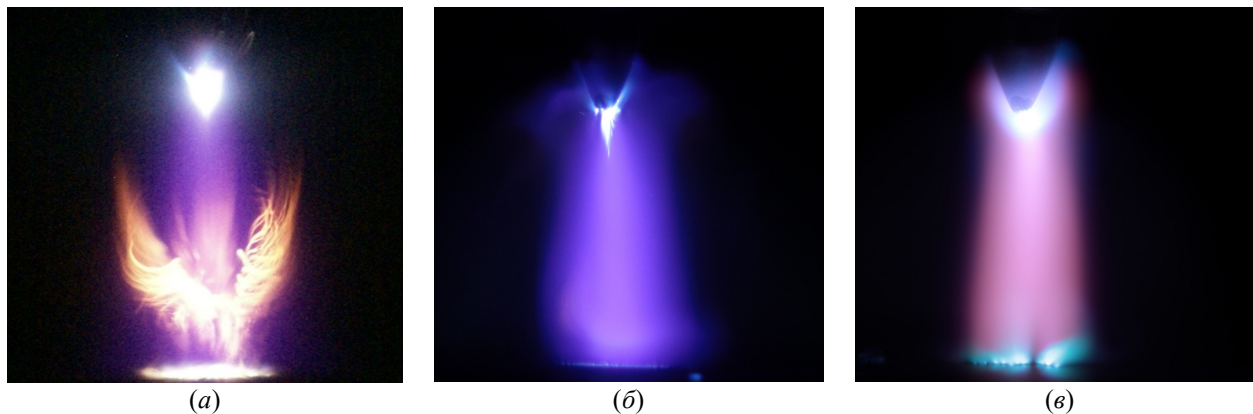


Рис. 2. Внешний вид разряда в воздухе (а), азоте (б), гелии (в), катод – вверху.

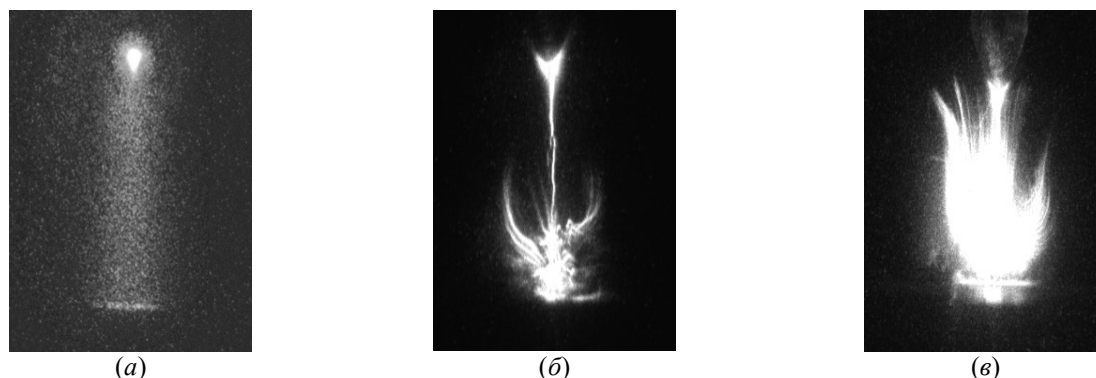


Рис. 3. Свечение плазмы разряда в воздухе при экспозиции ICCD камеры 10 нс (а), 0,75 мс (б), 50 мс (в), межэлектродный зазор 4 мм, катод – вверху.

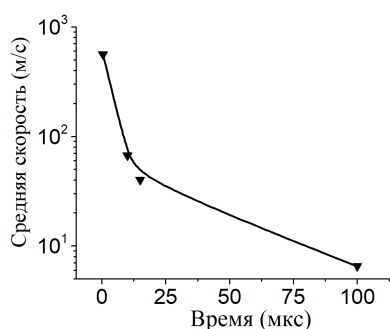


Рис. 4. Средняя скорость распространения плазмы. Разряд в воздухе, межэлектродный зазор 4 мм.

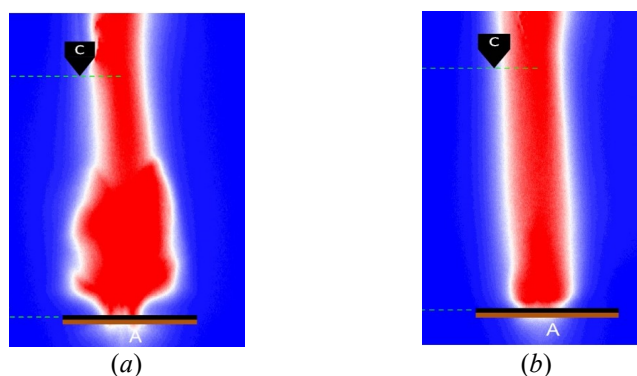


Рис. 5. Свечение плазмы разряда в гелии при наличии (а) и отсутствии (б) слоя сажи на аноде. Экспозиция 100 мкс, межэлектродный зазор 6 мм, А – анод, С – катод.

На рис. 4 представлены данные о средней скорости распространения плазмы в направлении от анода к катоду при разряде на воздухе. Близкие к приведенным на рис. 4 по значению скорости распространения плазмы в направлении от анода к катоду в течение первых 100 мкс регистрируются также при разрядах в азоте и гелии. Влияние наличия слоя

сажи на поверхности анода на форму плазменного образования продемонстрировано на рис. 5. Наличие слоя сажи на поверхности анода приводит после пробоя разрядного промежутка к появлению на аноде ярко светящегося слоя плазмы, распространяющегося преимущественно в направлении от анода к катоду. В течение первых 100 мкс плазменное образование, связанное с наличием слоя сажи на поверхности анода, достигает размеров  $\sim 3.8$  и  $\sim 2.6$  мм в продольном и радиальном направлениях, соответственно (Рис. 5а). В ряде случаев катодный факел при разряде в гелии инициируется на боковой поверхности катода (Рис. 5). При разряде в воздухе появление ярко светящегося слоя плазмы на аноде, вероятно, вызвано инициированием горения паров сажи в воздухе, а при разряде в азоте и гелии – горением в воздухе, адсорбированном в саже. Достижение порога воспламенения и усиление горения паров сажи в плазме разряда может быть вызвано не только повышением температуры среды за счет омического нагрева, но и возбуждением и ионизацией газа, что приводит к увеличению реактивности среды и способствует воспламенению и распространению пламени [10].

#### 4. Выводы

С помощью четырехканальной ICCD камеры исследована динамика свечения плазмы высоковольтного импульсного разряда в воздухе, азоте и гелии в резко неоднородном электрическом поле при наличии слоя сажи на поверхности заземленного плоского анода. Установлено, что образование анодных пятен при наличии слоя сажи на поверхности заземленного электрода происходит в течение не более 10 нс после пробоя разрядного промежутка. Во всех исследованных газах в течение первой микросекунды средняя скорость распространения плазмы, образующейся из анодных пятен, достигает нескольких сотен м/с. При разряде на воздухе через 0.75 мкс после пробоя разрядного промежутка зафиксировано зажигание и горение паров сажи на фронте распространяющейся плазмы. Установлено, что продолжительность фазы горения составляет не менее 50 мс. Полученные результаты указывают на возможность использования наносекундного разряда при атмосферном давлении для очистки металлических поверхностей от сажевых загрязнений, а также для увеличения реактивности среды, образующейся при возгонке вещества плазмой разряда в газе.

#### Благодарность

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

#### 5. Литература

- [1] P. Chu and X. Lu (Edited), *Low Temperature Plasma Technology*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2014.
- [2] S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, et al., The 2012 Plasma Roadmap, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45**, 253001, 2012, doi: 10.1088/0022-3727/45/25/253001
- [3] I. Adamovich, S. Baalrud, A. Bogaerts, et al., The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50**, 323001, 2017; doi:10.1088/1361-6463/aa76f5
- [4] R. Brandenburg, P. Bruggeman and S. Starikovskaia, Fast pulsed discharges, *Plasma Sources Science and Technology*, **26**, 020201, 2017, doi:10.1088/1361-6595/aa5205
- [5] M. Keidar, K. D. Weltman, S. Macheret, Fundamentals and Applications of Atmospheric Pressure Plasmas, *J. Appl. Phys.*, **130**, 080401, 2021, doi: 10.1063/5.0065750

- [6] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, et al., The 2022 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 373001, 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac5e1c
- [7] A. Rep'ev, P. Repin, V. Pokrovskii, Microstructure of the current channel of an atmospheric-pressure diffuse discharge in a rod-plane air gap, *Tech. Phys.*, **52**, 52–58, 2007, doi: 10.1134/S1063784207010094
- [8] M. Lomaev, V. Tarasenko, D. Sorokin, D. Beloplotov, Ignition of Carbon Black during Nanosecond Diffuse and Spark Discharges in Air at Atmospheric Pressure, *Surfaces*, **7**, 44–53, 2024, doi: 10.3390/surfaces7010004
- [9] V. Efanov, M. Efanov, A. Komashko A. Kriklenko, P. Yarin, S. Zazoulin, *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics*. New York: Springer, 301–305, 2010.
- [10] S. Starikovskaia, D. Lacoste, and G. Colonna, Non-equilibrium plasma for ignition and combustion enhancement, *Eur. Phys. J. D.*, **75**, 231, 2021, doi: 10.1140/epjd/s10053-021-00240-2