

04.1

Влияние полярности напряжения питания на режим горения тлеющего разряда атмосферного давления в потоках атомарных и молекулярных газов

© А.М. Астафьев¹, О.М. Степанова², М.Э. Пинчук¹¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 марта 2019 г.

В окончательной редакции 6 марта 2019 г.

Принято к публикации 24 сентября 2019 г.

Выполнены измерения электрических характеристик тлеющего разряда атмосферного давления с постоянным током до 40 мА в потоках атомарных и молекулярных газов с объемным расходом от 0.5 до 5 л/мин. Обнаружено, что в потоках молекулярных газов падение напряжения на разряде существенно зависит не только от скорости продува газа, но и от полярности напряжения питания. С увеличением объемного расхода газа горение разряда в кислороде и азоте становится нестабильным, а напряжение на разрядном промежутке возрастает на несколько сотен вольт. При положительной полярности напряжения питания оба эффекта проявляются гораздо сильнее, чем при отрицательной. В потоках гелия и аргона с заданными расходами полярность напряжения на электродах не влияет на режим горения разряда.

Ключевые слова: тлеющий разряд атмосферного давления, разряд в потоке газа, вольт-амперная характеристика, атомарные газы, молекулярные газы.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48805.17769

Повышенное внимание к исследованию плазмы атмосферного давления с газовой температурой около 300 К обусловлено широкими перспективами ее использования в биомедицине [1–4]. Одним из возможных источников такой плазмы является разряд постоянного тока [3–5], в частности тлеющий разряд атмосферного давления (ТРАД), который зажигают между цилиндрическим электродом-стержнем и плоским электродом с отверстием, выполняющим роль сопла для вывода плазменной струи в окружающее пространство [4,5]. Однако газ при прохождении через область разряда сильно нагревается. Его максимальные температуры в потоке плазмы на выходе из разрядной ячейки могут достигать сотни градусов Цельсия [5]. Поэтому, чтобы исключить тепловое воздействие плазменной струи ТРАД на объект, его обработку проводят на расстоянии нескольких сантиметров от сопла [4]. Это накладывает жесткие ограничения при работе с температурно-чувствительными материалами. Продув газа через разрядный промежуток способствует некоторому уменьшению степени разогрева газа и стенок разрядной ячейки [6], однако турбулизация потока существенно усложняет кинетику процессов в плазме. Высокой остается вероятность появления неустойчивостей, и разряд легко может перейти из стационарного режима горения в нестабильный [7–9]. Поэтому вопросы о генерации потоков плазмы ТРАД в стабильном режиме при разрядных токах на уровне десятков миллиампер являются по-прежнему актуальными.

В настоящей работе рассмотрены режимы горения ТРАД в молекулярных (кислороде, азоте) и атомарных (гелии, аргоны) газах при варьировании полярности напряжения на электродах. Разряд зажигали в кварцевой трубке между медным стержнем диаметром 6 мм с закругленным концом (радиус кривизны 3 мм) и расположенным на расстоянии 0.7 мм медным плоским электродом толщиной 1.5 мм с отверстием диаметром 1.5 мм (рис. 1). Объемный расход рабочего газа задавался в диапазоне 0.5–5 л/мин с помощью регулятора расхода газа Bronkhorst EL-Flow F-201AC. Для питания разряда использовался регулируемый источник постоянного напряжения, который был собран из ЛАТР, высоковольтного трансформатора и однополупериодного выпрямителя. Последовательно с разрядной ячейкой было включено балластное сопротивление 50 кΩ.

Для изучения режима горения ТРАД в потоках газов разной природы использовались вольт-амперные характеристики (ВАХ). Измерения ВАХ проводились в квазистационарном режиме путем плавного изменения величины питающего напряжения в течение 0.5–1 мин при разряде емкости 300 мкФ, установленной в цепи за выпрямителем. Ток и напряжение разряда регистрировались с помощью осциллографа Agilent DSOX2024A с использованием делителя напряжения 1:1000 Tektronix P6015A и токового резистивного шунта 1 кΩ.

Выявлено, что горение ТРАД в потоках молекулярных (азота, кислорода) и атомарных (гелия, аргона) газов происходит в разных режимах и зависит от объемного расхода газа и полярности питающего напряжения.

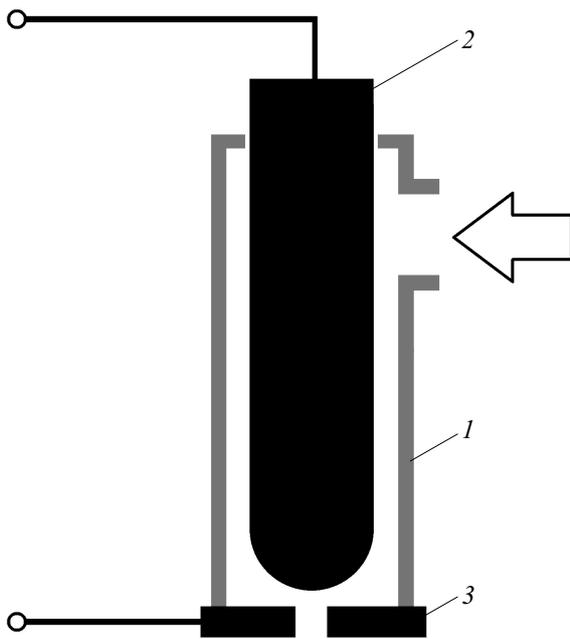


Рис. 1. Эскиз разрядной ячейки. 1 — кварцевая трубка с внутренним диаметром 7,5 мм; 2 — внутренний цилиндрический электрод диаметром 6 мм с закругленным концом (радиус кривизны 3 мм); 3 — внешний плоский электрод с отверстием диаметром 1,5 мм.

В потоках молекулярных газов, соответствующих объемному расходу 0,5 л/мин (рис. 2, кривые 1 и 2), ВАХ не зависит от полярности напряжения питания, а величина напряжения на разряде примерно соответствует нормальному катодному падению напряжения для тлеющего разряда [6,10,11]. С увеличением объемного расхода газа до 1 л/мин ход вольт-амперных характеристик разряда становится зависящим от полярности напряжения питания (кривые 3, 4). В случае азота (рис. 2, *b*) кривые 3 и 4 расходятся на десятки вольт в области малых токов (менее 20 мА). В кислороде (рис. 2, *a*) ввиду его электроотрицательности смена полярности электродов приводит к более значительному изменению мощности разряда во всей рабочей области токов. Более энергозатратным является разряд в условиях, когда внешний электрод служит катодом (рис. 2, штриховые линии). Для поддержания горения напряжение на разрядном промежутке растет приблизительно на 150 В.

Дальнейшее увеличение объемного расхода газа до 5 л/мин приводит к более значительному росту напряжения на разряде как для кислорода, так и для азота. Это связано с уносом зарядов из токового канала на стенки разрядной ячейки и через сопло за ее пределы. Благодаря несимметричной геометрии электродной системы при ее продуве формируется неоднородный поток газа с максимальными скоростями вблизи сопла. Для компенсации потерь зарядов разряду требуется электрическое поле большей напряженности, причем, когда наружный плоский электрод является катодом, рост

падения напряжения выше в 2 раза и более, а горение разряда становится нестабильным. Привязка разряда к наружному электроду осуществляется у края отверстия, т.е. в месте, где скорость потока газа наибольшая. Поэтому смена полярности электродов приводит к изменению газодинамических условий в катодном слое. И в случае, когда плоский электрод является катодом, вблизи которого электроны имеют максимальные энергии, разряд становится нестационарным из-за слишком больших потерь энергии.

В атомарных гелии и аргоне продув газа и смена полярности электродов слабо влияют на величину падения напряжения на разряде (рис. 3), поскольку электроны теряют энергию менее интенсивно, чем в кислороде или азоте. В гелии увеличение скорости его продува в 5 раз уменьшает напряжение разряда на 10–20 В. Такое изменение падения напряжения на порядок меньше тех, которые имели место для азота и кислорода, в то время как в аргоне ВАХ, измеренные в заданном диапазоне токов 5–40 мА, практически совпадают и соответствуют напряжениям 190–220 В, т.е. влияние продува газа отсутствует. Полученные значения напряжения на

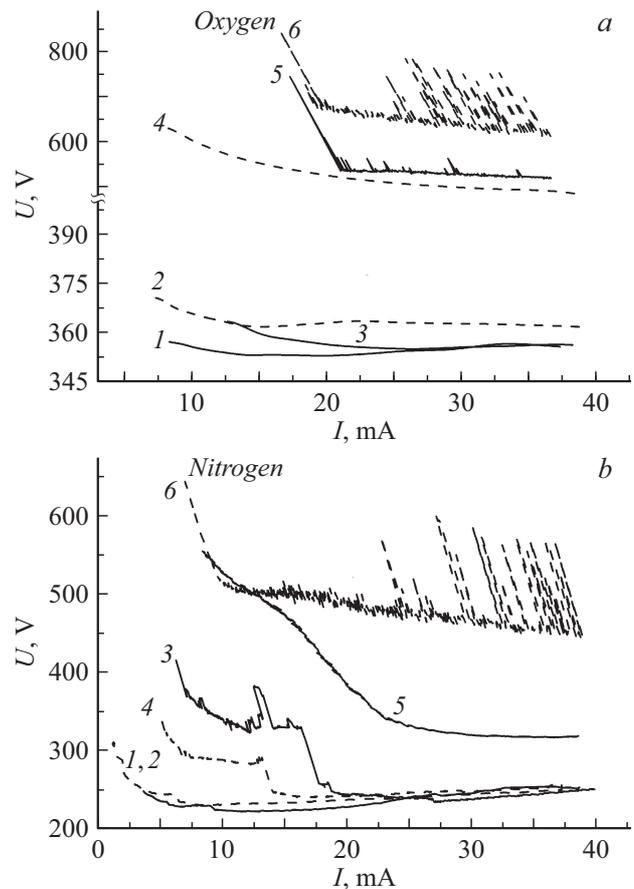


Рис. 2. ВАХ разряда в потоке кислорода (*a*) и азота (*b*) при объемном расходе газа 0,5 (1, 2), 1 (3, 4) и 5 л/мин (5, 6). Сплошные кривые соответствуют отрицательной полярности питающего напряжения, штриховые — положительной.

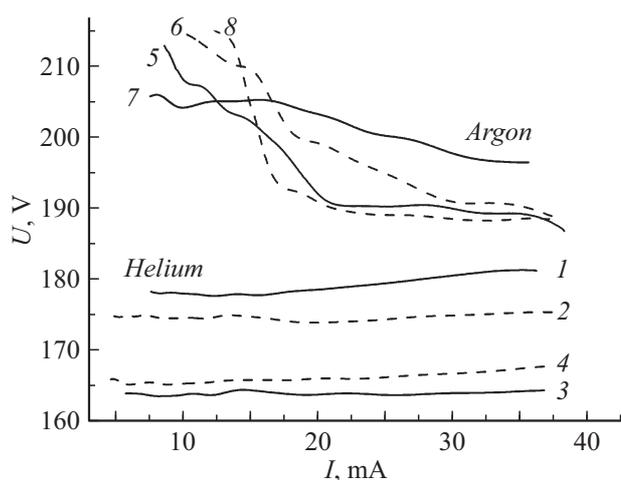


Рис. 3. ВАХ разряда в потоках гелия (1–4) и аргона (5–8) при объемном расходе газа 1 (1, 2, 5, 6) и 5 л/мин (3, 4, 7, 8). Сплошные кривые соответствуют отрицательной полярности питающего напряжения, штриховые — положительной.

разряде в обоих газах хорошо согласуются с данными работ [10,12].

Таким образом, выполненные измерения показали, что ТРАД в потоках молекулярных газов с ростом скорости продува начинает гореть нестабильно. Визуально это выглядит как перемещение зоны локализации разряда по межэлектродному промежутку, которое проявляется в виде резкого изменения хода кривой ВАХ при увеличении объемного расхода газа до 5 л/мин. Такие „всплески“ особенно заметны при положительной полярности напряжения питания, т.е. в том случае, когда внешний плоский электрод является катодом. При отрицательной полярности напряжения питания разряд имеет более стабильный характер горения. Падение напряжения на нем уменьшается на несколько сотен вольт, а вкладываемая мощность — более чем в 2 раза. В потоках атомарных газов в рассмотренном диапазоне скоростей полярность напряжения питания не оказывает существенного влияния на поведение ВАХ, разряд горит стабильно.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 17-58-04052).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Graves D.B. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 080901. DOI: 10.1063/1.4892534
- [2] Fridman A., Friedman G. Plasma medicine. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 526 p.

- [3] Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Норбоев Ч.Н., Намсараев Б.Б., Дамбаев В.Б., Гомбоева С.В., Абидуева Л.Р. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 229–233.
- [4] Kazak A., Kirillov A., Simonchik L., Nezhvinskaya O., Dudchik N. // Plasma Med. 2017. V. 7. N 2. P. 109–115. DOI: 10.1615/PlasmaMed.2017019263
- [5] Степанова О.М., Казак А.В., Астафьев А.М., Пинчук М.Э., Симончик Л.В. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 18. С. 77–83.
- [6] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [7] Голубев В.С., Пашкин С.В. Тлеющий разряд повышенного давления. М.: Наука, 1990. 330 с.
- [8] Asadullin T.Ya., Galeev I.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/927/1/012003
- [9] Савкин К.П., Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю., Шандриков М.В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 549–559.
- [10] Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Y.A., Simonchik L.V. // Eur. Phys. J. D. 2010. V. 60. P. 455–463. DOI: 10.1140/epjd/e2010-00266-5
- [11] Астафьев А.М., Кудрявцев А.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 18. С. 84–89.
- [12] Jiang W., Tang J., Wang Y., Zhao W., Duan Y. // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 6323. DOI: 10.1038/srep06323