

04.1;12.3

Определение приэлектродных падений напряжения и среднего поля в канале разряда с амплитудой тока 1.3 МА в водороде при начальном давлении 5 МПа

© М.Э. Пинчук¹, А.В. Будин¹, С.И. Кривошеев², В.А. Коликов¹, А.А. Богомаз¹¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2023 г.

В окончательной редакции 23 марта 2024 г.

Принято к публикации 24 марта 2024 г.

Представлены результаты исследования разряда, инициируемого взрывом проволоочки, в водороде при начальном давлении ~ 5 МПа и амплитуде тока ~ 1.3 МА. Средняя величина электрического поля в разрядном канале и среднее падение напряжения вблизи электродов определены в серии экспериментов со стальными электродами в диапазоне межэлектродных промежутков от 1 до 2 см в момент максимума тока. Суммарные падения напряжения вблизи электродов составили ~ 2.45 кВ, а напряженность электрического поля в разрядном канале ~ 0.6 кВ/см.

Ключевые слова: сильнооточный газовый разряд высокого давления, напряженность электрического поля, приэлектродные падения напряжения.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.13.58166.19754

Импульсный разряд с током мегаамперного диапазона является одним из эффективных и традиционных способов получения плазмы с экстремальными параметрами [1–3]. Разряд может быть использован в качестве лабораторной модели астрофизических объектов [4] для физического моделирования астрофизических струй [5] и переноса излучения в фотосфере звезд [4], уравнений состояния вещества [6] и т. д. Сильноточные разряды в газе высокой плотности дают определенные преимущества при получении экстремальных состояний вещества [1] и в свою очередь обладают рядом специфических характеристик [1,7–9].

Величины приэлектродных падений напряжения и напряженность поля в канале разряда являются одними из важнейших параметров разряда, определяющих его характеристики. Усредненное значение этих величин обычно определяют по зависимости падения напряжения на разрядном промежутке от его длины. Для импульсных разрядов величины приэлектродных падений напряжения устанавливаются путем экстраполяции зависимости величины напряжения на разрядном промежутке в максимуме тока от длины на ее нулевое значение, а величина электрического поля характеризуется наклоном этой зависимости [8]. Возможны и другие способы определения этих величин, например с помощью магнитных [10] или электрических [11] зондов.

Для дуг с током в десятки килоампер для различных газовых сред и материалов электродов [12–14] значения приэлектродных падений напряжения не превышают нескольких десятков вольт и плавно растут с увеличением давления [8], в основном за счет анодного падения [11]. Электрическое поле в разрядном канале

также возрастает с ростом давления [8,9]. В то же время суммарные приэлектродные падения превышают сотни и тысячи вольт при скорости нарастания тока более 10^8 А/с и амплитуде тока более 50 кА в плотном газе, особенно для разряда в легких газах [7–9,15].

В настоящей работе приведены данные о средней напряженности электрического поля и суммарных приэлектродных падениях напряжения для разряда в водороде с током ~ 1.3 МА при начальном давлении газа 5 МПа. Эти измерения дополняют измерения для других токов и начальных давлений, ранее опубликованные в [15–17].

Разряд в осесимметричной цилиндрической разрядной камере инициировался взрывом медной проволоочки диаметром 0.5 мм, натянутой между полусферическими стальными электродами диаметром 2 см. Электроды располагались вдоль оси камеры диаметром 6 см. Зазор L между ними фиксировался от 1 до 2 см с точностью 0.5 мм. Внутренний свободный объем камеры с электродными узлами составлял ~ 250 см³. Перед экспериментом разрядный объем откачивался до давления 2.5 кПа и продувался водородом для обеспечения необходимой чистоты рабочего газа. Напряжение на разрядной нагрузке измерялось с помощью высокоомного резистивного делителя с трансформаторной развязкой, который подключался к контактам нагрузки. Ток измеряли с помощью пояса Роговского. Погрешность измерения не превышала 5%. Подробное описание экспериментальной установки с фотографией и конструкции разрядной камеры приведено в [18] (фотография электрода представлена в [19]). В каждом эксперименте использовалось шесть модулей емкостного накопителя

Параметры экспериментов (L — межэлектродный зазор, P_0 — начальное давление водорода, J_{\max} — максимальный ток, $V_{J_{\max}}$ — напряжение на разрядном промежутке в момент максимума тока)

Номер опыта	L , cm	P_0 , MPa	J_{\max} , MA	$V_{J_{\max}}$, kV
1	1.0	5.0	1.25	2.8
2	1.0	5.0	1.3	2.95
3	1.0	5.0	1.2	3.2
4	1.0	5.0	1.35	2.85
5	1.0	5.4	1.35	2.9
6	1.0	5.2	1.4	3.2
7	1.5	6.0	1.2	2.75
8	1.6	7.0	1.15	3.2
9	2.0	6.0	1.2	3.7
10	2.0	7.0	1.2	3.45

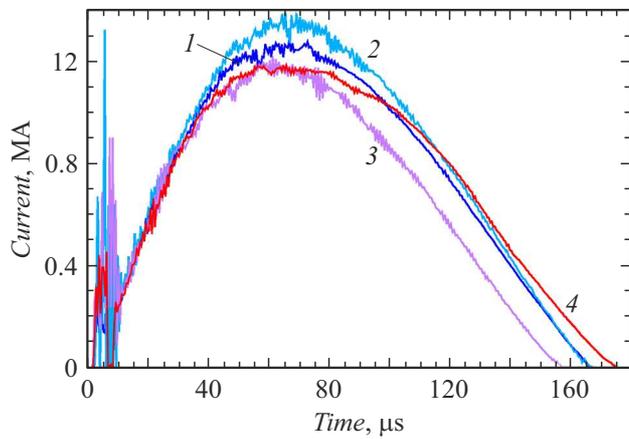


Рис. 1. Разрядный ток при разряде в водороде при начальном давлении ~ 5 МПа. Сигналы 1 и 2 соответствуют межэлектродному зазору 1 см, сигнал 3 — 1.5 см, сигнал 4 — 2 см.

энергии [20], заряжаемых до напряжения 10 kV при суммарной запасенной энергии ~ 0.6 МДж. Эксперименты проводились в рамках одной серии опытов. Параметры экспериментов приведены в таблице.

Несколько кривых тока представлено на рис. 1. Соответствующие этим экспериментам сигналы напряжения на разрядном промежутке показаны на рис. 2. Графики сигналов 1 и 2 соответствуют опытам № 1 и 6 в таблице с межэлектродным промежутком 1 см, сигналов 3 — опыту № 7 с зазором 1.5 см, сигналов 4 — опыту № 9 с зазором 2 см. Вариации амплитуды разрядного тока и напряжения при одинаковых начальных условиях обусловлены особенностью формирования канала мегаамперного разряда.

Величина напряжения на разрядном промежутке $V_{J_{\max}}$ в момент максимума тока определялась путем линейной аппроксимации сигнала напряжения методом наименьших квадратов во временном окне $30 \mu s$ с центром вблизи максимума тока ($t = 60 \mu s$), как показано на

вставке к рис. 2. Процедура линейной аппроксимации была необходима для усреднения пульсаций напряжения.

Зависимость напряжения $V_{J_{\max}}$ от длины разрядного промежутка показана на рис. 3. Если считать, что в максимуме тока напряжение на разрядном промежутке соответствует чисто активному сопротивлению и формируется однородный разрядный канал с не зависящими от длины межэлектродного промежутка размерами областей, на которые приходится приэлектродные падения, то значение отсечки на оси напряжения 2.45 kV при аппроксимации длины разрядного промежутка на нуль дает величину суммарных приэлектродных падений. Наклон зависимости 0.6 kV/cm отражает среднюю величину поля в канале разряда.

Итак, среднее электрическое поле в канале разряда и среднее суммарное приэлектродное падение напряжения определялись в момент максимума тока в серии экспериментов с разрядом в водороде при начальном давлении ~ 5 МПа и амплитуде тока ~ 1.3 МА в момент

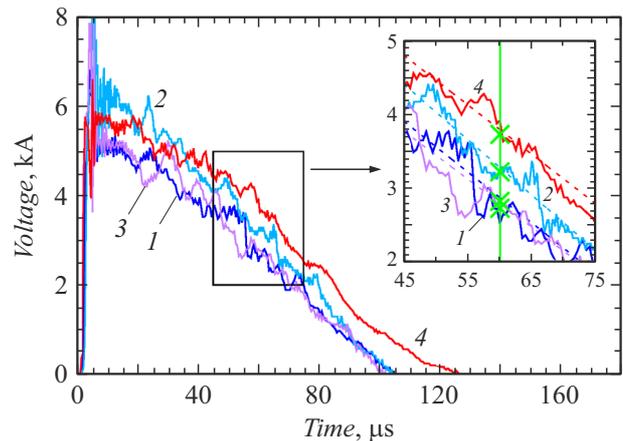


Рис. 2. Напряжение на разрядном промежутке при разряде в водороде при начальном давлении ~ 5 МПа. Обозначение кривых то же, что на рис. 1.

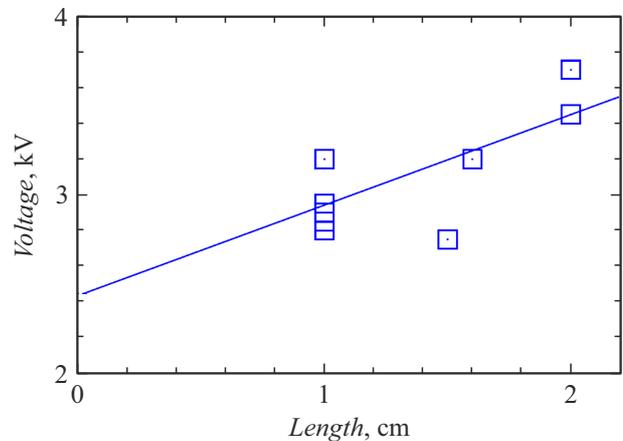


Рис. 3. Напряжение на разрядном промежутке в максимуме тока в зависимости от длины разрядного промежутка для разряда в водороде при начальном давлении ~ 5 МПа.

максимума тока при использовании стальных электродов с диапазоном межэлектродных расстояний от 1 до 2 см. Суммарные падения напряжения вблизи электродов составили ~ 2.45 kV, а напряженность электрического поля в разрядном канале ~ 0.6 kV/cm. Указанные величины согласуются с ранее полученными значениями поля и приэлектродных падений для других значений силы тока, скорости нарастания тока и давления газа [15–17].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Э.И. Асиновский, В.А. Зейгарник, ТВТ, **12** (6), 1178 (1974). [E.I. Asinovskii, V.A. Zeigarnik, High Temp., **12**, 1120 (1974).].
- [2] K.N. Koshelev, N.R. Pereira, J. Appl. Phys., **69**, R21 (1991). DOI: 10.1063/1.347551
- [3] M.G. Haines, Plasma Phys. Control. Fusion, **53**, 093001 (2011). DOI: 10.1088/0741-3335/53/9/093001
- [4] G.A. Rochau, J.E. Bailey, R.E. Falcon, G.P. Loisel, T. Nagayama, R.C. Mancini, I. Hall, D.E. Winget, M.H. Montgomery, D.A. Liedahl, Phys. Plasmas, **21**, 056308 (2014). DOI: 10.1063/1.4875330
- [5] V.I. Krauz, K.N. Mitrofanov, A.M. Kharrasov, I.V. Ilichev, V.V. Myalton, S.S. Ananev, V.S. Beskin, Astron. Rep., **65**, 26 (2021). DOI: 10.1134/S1063772921010029
- [6] V.E. Fortov, *Extreme states of matter: on Earth and in the cosmos* (Springer, 2016).
- [7] И.А. Глебов, Ф.Г. Рутберг, *Мощные генераторы плазмы* (Энергоатомиздат, М., 1985).
- [8] Р.В. Митин, в сб. *Свойства низкотемпературной плазмы и методы их диагностики* (Наука, Новосибирск, 1977), с. 105–138.
- [9] В.П. Игнатко, Г.М. Чернявский, в сб. *Материалы I Все-союз. семинара по динамике сильнотокового дугового разряда*, под ред. М.Ф. Жукова (ИТФ, Новосибирск, 1990), с. 88–110.
- [10] A.A. Bogomaz, M.E. Pinchuk, A.V. Budin, A.G. Leks, V.V. Leontev, A.A. Pozubenkov, J. Phys.: Conf. Ser., **946**, 012186 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012186
- [11] Ф.Г. Бакшт, В.С. Бородин, А.М. Воронов, В.Н. Журавлев, Ф.Г. Рутберг, ЖТФ, **60** (11), 190 (1990).
- [12] И.Н. Романенко, *Импульсные дуги в газах* (Чуваш. кн. изд-во, Чебоксары, 1976).
- [13] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, М., 1987). [Yu.P. Raizer, *Gas discharge physics* (Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 1991).
- [14] Y. Yokomizu, T. Matsumura, R. Henmi, Y. Kito, J. Phys. D: Appl. Phys., **29**, 1260 (1996). DOI: 10.1088/0022-3727/29/5/020
- [15] A.A. Bogomaz, A.V. Budin, M.E. Pinchuk, P.G. Rutberg, A.F. Savvateev, High Temp. Mater. Process., **8**, 617 (2004). DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v8.i4.110
- [16] A.A. Bogomaz, M.E. Pinchuk, A.V. Budin, A.G. Leks, J. Phys.: Conf. Ser., **1787**, 12058 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1787/1/012058
- [17] В.А. Коликов, А.А. Богомаз, А.В. Будин, *Мощные импульсные генераторы плазмы. Исследование и применение* (Наука, М., 2022).
- [18] А.В. Будин, С.Ю. Лосев, М.Э. Пинчук, Ф.Г. Рутберг, А.Ф. Савватеев, ПТЭ, № 4, 106 (2006). [A.V. Budin, S.Yu. Losev, M.E. Pinchuk, F.G. Rutberg, A.F. Savvateev, Instrum. Exp. Tech., **49**, 549 (2006). DOI: 10.1134/S0020441206040178].
- [19] P.G. Rutberg, A.A. Bogomaz, M.E. Pinchuk, A.V. Budin, A.G. Leks, A.A. Pozubenkov, Phys. Plasmas, **18**, 122702 (2011). DOI: 10.1063/1.3662053
- [20] П.Ю. Емелин, Б.Э. Фридман, Ф.Г. Рутберг, ПТЭ, № 5, 109 (1993). [P.Yu. Emelin, B.E. Fridman, P.G. Rutberg, Instrum. Exp. Tech., **36**, 730 (1993).].