

УДК 533.9, 535.31

PACS: 52.70.Kz

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-19-22

EDN: RTHFSB



Определение температуры газа в разряде с жидким водяным катодом фоново-ориентированным шлирен методом

Ю. А. Баринов

Фоново-ориентированный шлирен метод в основном применяется для определения сравнительно невысоких, менее 1000 К, температур. Представляет интерес, проверить практическую применимость метода при более высоких температурах на примере разряда с жидкими не металлическими электродами (РЖНМЭ). Разряд горит в открытой атмосфере воздуха с жидким (водяным) катодом и металлическим анодом. Ранее был выполнен эксперимент в РЖНМЭ при фиксированном токе 60 мА, где температура газа достигала 1500 К. Предполагается, что с увеличением тока температура газа будет расти. В данной работе выполнено измерение температуры газа РЖНМЭ при фиксированном токе 100 мА. Действительно, температура газа оказалась выше и достигает значения более 2000 К. На практике показано, что фоново-ориентированный шлирен метод может быть применен для измерения и более высоких температур.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, разряд атмосферного давления, оптические свойства плазмы, BOS метод.

Введение

Для диагностики низкотемпературной плазмы особый интерес представляют бесконтактные методы. Среди бесконтактных методов определения температуры газа или тяжелой компоненты наибольшее распространение получили спектроскопические методы. К бесконтактным методам относится и шлирен метод и вместе с ним Фоново-ориентированный шлирен (Background Oriented Schlieren – BOS) [1, 2]. Спектроскопические методы имеют ряд недостатков, например дорогое диагности-

ческое оборудование и сложность интерпретации полученных результатов. Не смотря на то, что шлирен методы в основном используют для визуализации, они применимы не только для качественных, но и для количественных измерений. Сравнительно новый BOS метод гораздо проще в организации и не использует дорогостоящего оборудования. Тем не менее, метод имеет и свои ограничения. Так для исследуемой среды должен выполняться закон идеального газа. Кроме того, в случае исследования плазмы, ее степень ионизации должна быть достаточно низкой. Для исследуемого РЖНМЭ это выполняется. Можно еще отметить, что в зависимости от оптической схемы эксперимента, не всегда удается получить хорошее пространственное разрешение. Другая особенность связана с тем, что показатель преломления, в данном случае, воздуха зависит от температуры нелинейным способом [3, 4]. Для примера, на

Баринов Юрий Алексеевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: yury@mail.ioffe.ru

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе.

Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26.

Статья поступила в редакцию 3.08.2023

Принята к публикации 23.08.2023

© Баринов Ю. А., 2023

рис. 1 показана зависимость показателя преломления воздуха от температуры. Видно, что для температур, примерно начиная с температуры 1000 К и более, даже значительное изменение температуры приводит к небольшому изменению показателя преломления. В результате даже небольшая погрешность измерений показателя преломления может привести к большим ошибкам в измеряемой температуре. Таким образом, с увеличением измеряемой температуры требования к точности увеличиваются [5]. Поэтому представляет интерес проверить возможность метода для температур газа более 1000–1500 К.

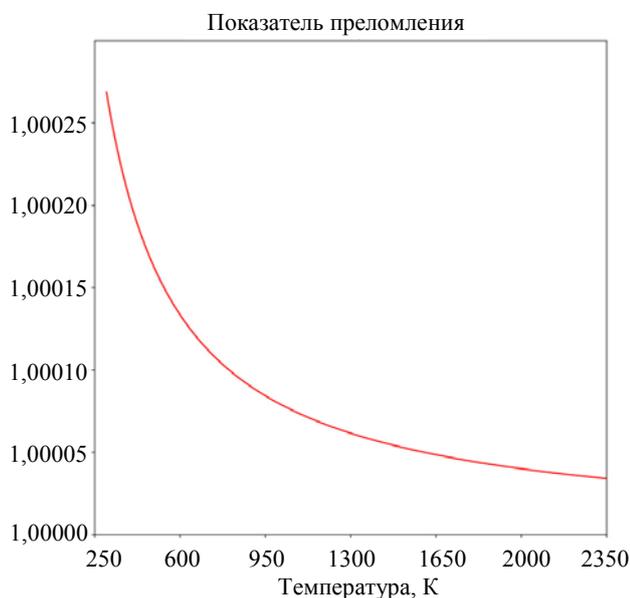


Рис. 1. Зависимость показателя преломления воздуха от температуры

Разряд с жидкими не металлическими электродами может быть организован различными способами. В этой работе исследуется разряд с жидким катодом и металлическим анодом. Разряд горит в открытой атмосфере воздуха и создает слабо ионизованную низкотемпературную плазму. Фотография разряда представлена на рис. 2. Ранее были выполнены измерения температуры газа РЖНМЭ с помощью BOS метода для фиксированного тока 60 мА [6]. Для получения результата применяется BOS метод с измененным способом обработки изображений [7]. Полученное ранее значение температуры ≈ 1500 К согласуется с измерениями спектроскопическим методом [8].

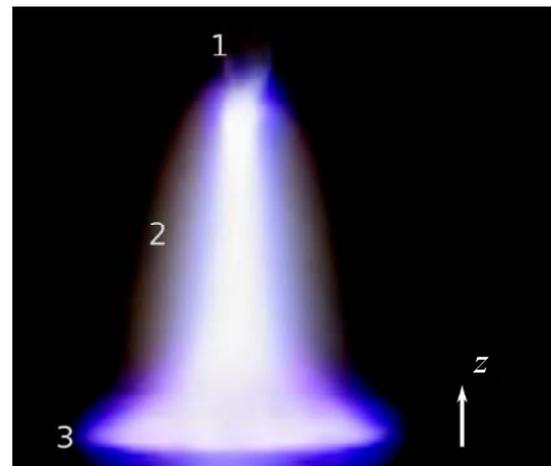


Рис. 2. Фотография разряда: 1 — металлический анод, 2 — канал разряда, 3 — водяной катод

В настоящей работе представлены результаты измерений температуры газа для тока 100 мА. Следует ожидать, что увеличение тока разряда приведет к увеличению температуры газа. Основные элементы оптической схемы измерений приведены на рис. 3. Методика измерений и расчета температуры была опубликована ранее [5, 7]. Чтобы не повторяться отметим только ключевые моменты измерений с помощью BOS метода. Производится фотографирование фонового экрана один раз без горящего разряда, второй раз с разрядом. В последнем случае изображение фонового экрана искажено воздействием горячего газа разряда. Это приводит к смещению точек фонового экрана. Сравнение двух этих изображений позволяет определить величину смещения точек фонового экрана. Таким образом получают кривые хода смещения точек фонового экрана. Из набора данных отбираются наиболее симметричные кривые. Эти кривые далее используются для расчета температуры. Так как смещение связано с показателем преломления. Далее, в соответствии с законом идеального газа, определяется температура. Следует отметить, что конструкция разрядного узла имеет осевую симметрию, предполагается, что и разряд имеет осевую симметрию. Это предположение позволяет применить обратное преобразование Абеля. Для набора статистики фотографирование повторяется многократно. Определение температуры производилось в нескольких точках вдоль оси z разряда. Точки измерения температуры отстоят примерно на расстоянии 0,8–

0,9 мм друг от друга. Из-за сильного влияния паров воды водяного катода, первая точка измерений смещена от катода на 1 мм. Таким образом, в положении $z \approx 0$ мм расположен водяной катод, $z \approx 6$ мм – металлический анод. Пространственное разрешение измерений оценивается как 0,7–0,8 мм. Результат определения температуры представлен на рис. 4. Максимальная температура достигает величины ≈ 2100 К. Для сравнения температура для тока 60 мА, не превышает 1600 К [6].

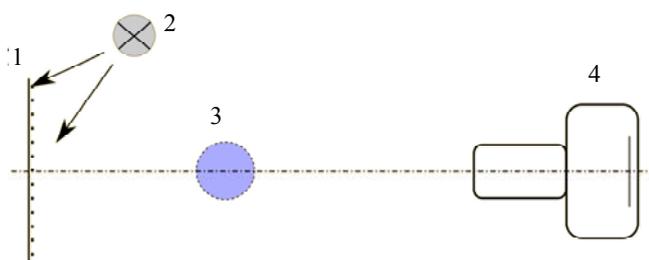


Рис. 3. Оптическая схема измерений: 1 – фоновый экран; 2 – фотодыод; 3 – разряд; 4 – фотоаппарат

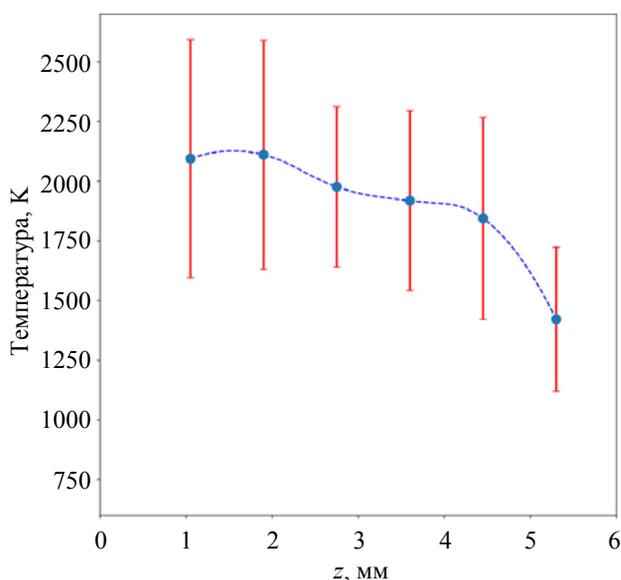


Рис. 4. Результат определения температуры газа, ток 100 мА

Заключение

Как и ожидалось температура газа разряда для тока 100 мА выше, чем для тока 60 мА. При изменении тока с 60 мА до 100 мА напряжение подводимое к разрядному промежутку меняется не значительно, с 1570 В до 1616 В. Выделяемая мощность меняется с 94 Вт до 162 Вт. Таким образом, мощность увеличивается в 1,7 раза, а температура в 1,4 раза. Вероятно это связано с тем, что кроме температуры увеличивается и диаметр канала разряда. Общий вид кривой вдоль оси разряда сохранился, температура падает по направлению к металлическому аноду. Так же можно отметить, что разброс точек увеличился. Это можно объяснить кривой показателя преломления рис. 1. Измерения более высоких температур с помощью BOS метода возможны, но и более трудоемки. Тем не менее этот метод представляет интерес прежде всего тем, что он бесконтактный. Кроме того метод прост в организации и не имеет дорогостоящего оборудования по сравнению, например, со спектроскопическими методами. Цена оборудования во многих случаях оказывается критической при планировании эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Richard H., Raffel M. / Measurement Science and Technology. 2001. Vol. 12. P. 1576–1585. doi: 10.1088/0957-0233/12/9/325
2. Raffel M. / Exp. Fluids. 2015. Vol. 56. doi: 10.1007/s00348-015-1927-5
3. Owens J. C. / Applied Optics. 1967. Vol. 6. P. 51–59. doi: 10.1364/AO.6.000051
4. Birch K. P., Downs M. J. / Metrologia. 1993. Vol. 30. P. 155–162. doi: 10.1088/0026-1394/30/3/004
5. Barinov Yu. A. / Journal of Visualization. 2021. Vol. 24. P. 1131–1139. doi: 10.1007/s12650-021-00763-1
6. Barinov Yu. A. / Journal Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. № 1.1. P. 433–437. doi: 10.18721/JPM.161.174
7. Barinov Yu. A. / Tech. Phys. Lett. 2019. Vol. 45. P. 632–634. doi: 10.1134/S106378501906021X
8. Andre P., Barinov Y., Faure G., Kaplan V., Lefort A., Shkol'nik S., Vacher D. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 3456–3465.

Determination of the gas temperature in a discharge with a liquid water cathode by the background-oriented Schlieren method

Yu. A. Barinov

Ioffe Institute
26 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 194021, Russian
E-mail: yury@mail.ioffe.ru

Received 3.08.2023; accepted 23.08.2023

The background-oriented schlieren method is mainly used to determine relatively low temperatures, less than 1000 K. It is of interest to test the practical applicability of the method at higher temperatures using the example of a discharge with liquid non-metallic electrodes (DLNME). The discharge burns in an open atmosphere of air with a liquid (tap water) cathode and a metal anode. Previously, an experiment was carried out in DLNME at a fixed current of 60 mA, where the temperature reached 1500 K. It is assumed that with an increase in the discharge current the gas temperature will increase. In this work, the gas temperature of the DLNME was measured at a fixed current of 100 mA. Indeed, the gas temperature turned out to be higher and reaches a value of more than 2000 K. In practice, it is shown that the Background-oriented Schlieren method can be used to measure higher temperatures.

Keywords: low-temperature plasma, atmospheric pressure discharge, optical properties of plasma, BOS method.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-19-22

REFERENCES

1. Richard H. and Raffel M., Measurement Science and Technology **12**, 1576–1585 (2001). doi: 10.1088/0957-0233/12/9/325
2. Raffel M., Exp. Fluids **56**, (2015). doi: 10.1007/s00348-015-1927-5
3. Owens J. C., Applied Optics **6**, 51 (1967). doi: 10.1364/AO.6.000051
4. Birch K. P. and Downs M. J., Metrologia **30**, 155 (1993). doi: 10.1088/0026-1394/30/3/004
5. Barinov Yu. A., Journal of Visualization **24**, 1131–1139 (2021). doi: 10.1007/s12650-021-00763-1
6. Barinov Yu. A., Journal Physics and Mathematics **16** (1.1), 433–437 (2023). doi: 10.18721/JPM.161.174
7. Barinov Yu. A., Tech. Phys. Lett. **45**, 632–634 (2019). doi: 10.1134/S106378501906021X
8. Andre P., Barinov Y., Faure G., Kaplan V., Lefort A., Shkol'nik S. and Vacher D., J. Phys. D: Appl. Phys. **34** 3456–3465 (2001).