

03;04;10

## **Оптическая электронно-пучковая диагностика свободной сверхзвуковой струи азота, активированной электронно-пучковой плазмой**

© Р.Г. Шарафутдинов, Е.А. Баранов, С.Я. Хмель

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
E-mail: baranov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2011 г.

С помощью оптической электронно-пучковой диагностики впервые измерены вращательная температура и численная плотность газа в нейтральной и активированной электронно-пучковой плазмой свободных сверхзвуковых струях азота. Для создания электронно-пучковой плазмы струя газа активировалась низкоэнергетичным электронным пучком на расстоянии 10 мм от среза сверхзвукового конического сопла. Для измерений в активированной струе спектр собственного свечения плазмы вычитался из излучения диагностирующего пучка в активированном потоке. Вращательная температура в активированной струе по сравнению с нейтральной увеличивается, а плотность на оси падает. Активация газа электронным пучком при выбранных параметрах увеличивала вращательную температуру на 35%.

Активированные плазмой сверхзвуковые свободные струи находят применение для осаждения тонких пленок и покрытий, травления и обработки поверхностей, переработки веществ и т. д. [1,2]. Для контроля за процессами в таких струях необходима информация о составе и распределении энергии между компонентами плазмы. Поэтому диагностика струй активированного газа и плазмы является актуальной задачей, которая требует развития самих методов диагностики. Для этой цели азот является весьма удобным модельным газом. Заметим, что плазменные струи азота находят применение для осаждения слоев нитридов различных элементов и модификации свойств поверхностей [3].

Для измерения вращательной температуры молекул азота и плотности газа в струях плазмы и в плазме электрических разрядов используют оптическую эмиссионную спектроскопию (ОЭС) [4], метод лазерной

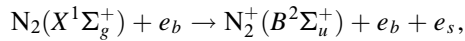
индуцированной флюоресценции (ЛИФ) [5] и электронно-пучковую диагностику (ЭПД) [6–9]. ОЭС является невозмущающим, наиболее простым и доступным по аппаратуре методом диагностики, однако отличается невысоким пространственным разрешением и сложностью интерпретации результатов измерений. Диагностика, основанная на ЛИФ при малой степени возмущения объекта исследования, обладает высокой локальностью, простотой интерпретации результатов измерений, позволяет получить различную информацию об объекте исследования, однако для ее реализации необходимо сложное и дорогостоящее оборудование. ЭПД занимает промежуточное положение между этими двумя методиками.

ЭПД по излучению в оптическом диапазоне спектра широко используется для исследований свободных сверхзвуковых струй нейтрального газа. В частности, она применяется для измерения локальной плотности, вращательной, колебательной и поступательной температур газа [6–9]. При повышении температуры газа применение этого метода становится затруднительным, поскольку при температурах в несколько тысяч градусов излучение, возбуждаемое пучком электронов в оптической области, будет „маскироваться“ собственным излучением плазмы. Для исследования плазменных струй более широкое применение нашло ЭПД по рентгеновскому излучению. Известны только отдельные работы, в которых ЭПД по оптическому излучению использовалась в свободных струях термической плазмы за плазмотроном [10]. На основе анализа оптических спектров Ar и N<sub>2</sub>–CO<sub>2</sub> в нейтральном газе и в плазменных струях показано, что при высоких температурах электронно-пучковый метод измерения плотности неприменим, так как наличие собственного излучения плазмы существенно искажает интенсивность линий в спектре.

Целью данной работы является использование оптической ЭПД для исследования свободных сверхзвуковых струй азота, активированных электронно-пучковой плазмой.

Методика измерения плотности и вращательной температуры в потоках нейтрального газа азота с помощью оптической ЭПД широко освещена в литературе [6–9]. Пучок высокоэнергетических электронов пересекает струю газа, сталкивается с молекулами азота, в результате чего происходят процессы диссоциации, ионизации и возбуждения с образованием молекул, атомов и ионов в различных состояниях. Определяющим процессом данной диагностики является ионизация

основного состояния азота первичным электроном с образованием иона азота в возбужденном состоянии:



$X^1\Sigma_g^+$  — основное состояние молекулы азота,  $B^2\Sigma_u^+$  — возбужденное состояние иона азота,  $e_s$  и  $e_b$  — первичный и вторичный электроны соответственно. Ион азота в возбужденном состоянии спонтанно переходит на основной уровень с испусканием фотона, т.е. реализуется переход  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ . Система полос, соответствующая этому переходу, называется первой отрицательной системой полос иона азота (1 О.С.  $\text{N}_2^+$ ). По спектру полосы (0–0) данной эмиссии можно определить вращательную температуру состояния  $B^2\Sigma_u^+$  иона азота, которая на 12.5 К отличается от вращательной температуры основного состояния молекулы азота [11].

В данной работе для определения значений вращательной температуры азота использовался метод сравнения расчетного и экспериментального спектров. Расчет спектра и учет аппаратной функции не представляют серьезных трудностей, а в литературе имеются работы по моделированию электронно-колебательно-вращательного спектра излучения полосы (0–0) перехода  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+ \text{N}_2^+$  [4].

Измерение плотности газа осуществлялось по методу, описанному в [6,9]. Для этого регистрировалась интегральная интенсивность излучения полосы (0–0) перехода  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$  иона азота, которая пропорциональна плотности газа  $n$ , току диагностического пучка и коэффициенту, который может быть определен из тарировки при известной плотности газа. С повышением плотности начинает проявляться влияние столкновений, приводящих к гашению флюоресценции, т.е. к безызлучательным переходам при столкновении возбужденных ионов с нейтральными молекулами. Поэтому измерения необходимо проводить с учетом гашения флюоресценции. В этом случае интенсивность полосы (0–0) запишем следующим образом [12]:

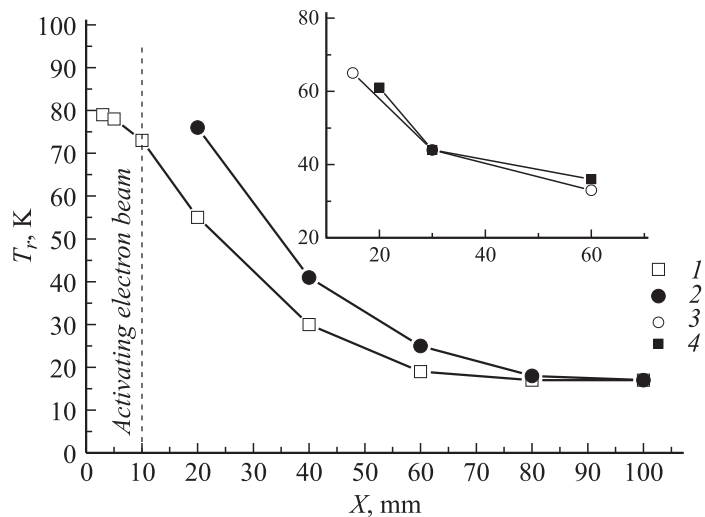
$$I(n) = \frac{I_0(n)}{1 + n\tau \langle vQ_{qu} \rangle}.$$

Здесь  $I_0(n)$  — интенсивность излучения, без учета гашения,  $\tau$  — время жизни уровня  $B^2\Sigma_u^+$ ,  $v = 0$  [13], произведение  $\langle vQ_{qu} \rangle$  — константа гашения флюоресценции, значения которой вычислялись согласно [12].

Эксперименты проводились на газодинамической установке низкой плотности ВС-4 Института теплофизики СО РАН [14]. В вакуумный объем через форкамеру и сверхзвуковое сопло подавался технически чистый азот. Сопло представляло собой конусообразные сужение и расширение с углами  $\alpha = 44.20$  и  $\beta = 6.53$  соответственно. Радиус критического сечения  $r_x = 2$  мм был постоянным на всей длине капиллярного сечения  $L_x = 1.2$  мм, при степени расширения  $S_a/S_x = 10.81$ . Давление в форкамере, или давление торможения  $P_0$ , составляло 54 Торг. При истечении газа из сопла формировалась свободная сверхзвуковая струя низкой плотности. Фоновое давление  $P_H$  в вакуумном объеме было  $5.5 \cdot 10^{-3}$  Торг. На расстоянии 10 мм от среза сопла струя активировалась низкоэнергетичным (2 keV) пучком электронов с током 100 мА, который формировался электронной пушкой с плазменным катодом. Ширина пучка составляла примерно 4 мм. Электронно-пучковая диагностика осуществлялась с помощью высокоэнергетичного (14 keV) электронного пучка с током порядка 10 мА. Пучок формировался электронной пушкой с термокатодом. Ширина пучка не превышала 1 мм. Оптическое излучение, возбужденное диагностическим пучком, собиралось линзой на входную щель монохроматора и после разложения в спектр регистрировалось фотоэлектронным умножителем, а затем передавалось на компьютер. Построение спектра и его обработка производились с помощью стандартного интерфейса.

Для измерения вращательной температуры использовался частично разрешенный вращательный спектр полосы (0–0) 1 O. C. N<sub>2</sub><sup>+</sup>. Щели монохроматора были 0.05–0.1 мм при дисперсии 0.65 nm/mm. Спектр, по которому вычислялась вращательная температура в активированной струе, был получен в результате вычитания собственного свечения плазмы (включена только активирующая пушка) из спектра излучения диагностического пучка в активированном газе (включены и активирующая, и диагностическая пушки). При этом условия записи спектра, такие как ширина щели монохроматора, коэффициент усилителя, напряжение ФЭУ, оставались неизменными.

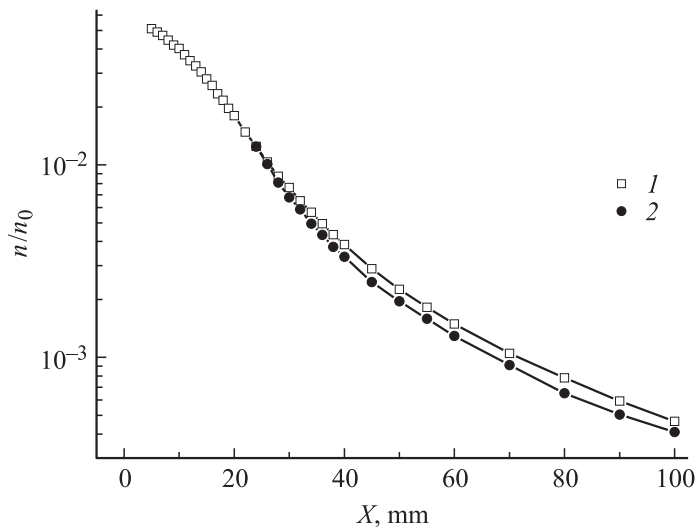
При измерении плотности газа регистрировалась интегральная интенсивность полосы (0–0) перехода  $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+ N_2^+$ . Щель монохроматора размещали перпендикулярно диагностирующему электронному пучку. Локальность измерений составляла 2 мм перпендикулярно и 0.03 мм параллельно пучку. Входная и выходная щели монохроматора были 0.1 и 2.2 мм соответственно, что при дисперсии 1.3 nm/mm



**Рис. 1.** Распределение вращательной температуры молекулы азота вдоль оси струи: 1 — нейтральная струя для  $P_0 = 54$  Torr, 2 — активированная струя  $P_0 = 54$  Torr; 3 — нейтральная струя для  $P_0 = 6.5$  Torr, 4 — активированная струя  $P_0 = 6.5$  Torr.

позволяло захватывать излучение всей полосы. Для обработки экспериментальных данных проводилась тарировка в статических условиях. При определении плотности газа в активированном потоке из сигнала диагностического пучка в активированной струе вычитался сигнал, соответствующий собственному свечению плазмы.

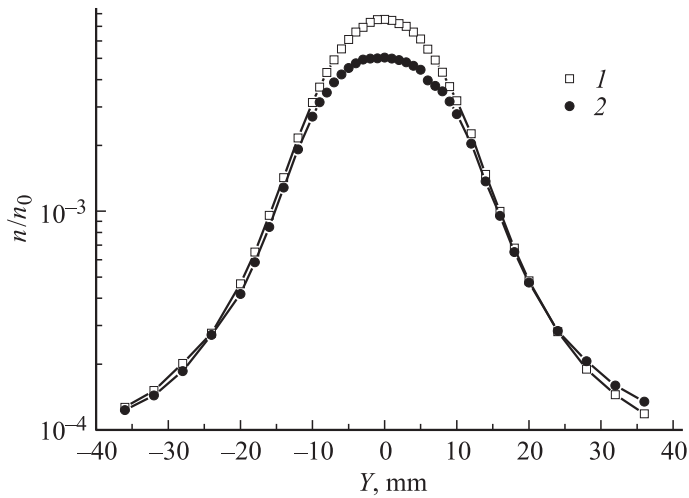
На рис. 1 представлены осевые профили вращательной температуры в нейтральной и активированной струе. Для наглядности на графике нанесена пунктирная прямая, обозначающая положение активирующего пучка. Измерения в активированной струе проводились для расстояний, больших 20 mm от среза сопла, поскольку на меньших расстояниях фон собственного излучения плазмы существенно возрастал и методика простого вычитания фона из суммарного сигнала не позволяла производить измерения. На малых расстояниях от среза сопла вращательная температура азота в активированной струе примерно на 20 градусов выше, чем в нейтральной. Расчетная погрешность для вращательной



**Рис. 2.** Распределение плотности газа вдоль оси струи при  $P_0 = 54 \text{ Torr}$ : 1 — нейтральная струя, 2 — активированная струя.

температуры составила  $\pm 3 \text{ K}$ . При увеличении расстояния температура активированного потока падает быстрее, чем нейтрального, что отражает локальный характер нагрева газа активирующим пучком. Это легко представить, так как диаметр электронного пучка порядка  $4 \text{ mm}$ , а поперечные размеры струи на  $10 \text{ mm}$  от среза сопла порядка  $30 \text{ mm}$ . Кроме того, на графике приведена кривая для  $P_0 = 6.5 \text{ Torr}$ . Видно, что в результате уменьшения плотности газа в струе влияние электронного пучка на нагрев газа нивелируется.

Осевой профиль плотности газа для нейтральной и активированной струи показан на рис. 2. Измерения в активированной струе также проводились для расстояний, больших  $20 \text{ mm}$ . В активированной струе наблюдается дополнительное падение плотности, что является следствием нагрева струи газа электронно-пучковой плазмой. Более полную картину можно увидеть из рис. 3, где приведен поперечный профиль плотности газа нейтральной и активированной струи. Расход газа был одинаковым, поэтому при уменьшении плотности газа на оси струи должно наблюдаться возрастание на периферии. Но данный



**Рис. 3.** Поперечный профиль плотности газа для  $P_0 = 54$  Торр: 1 — нейтральная струя, 2 — активированная струя.

эффект слишком мал, поскольку значения обусловлены соотношением площадей сечений центра струи и периферии и в данных экспериментах не зафиксирован.

Таким образом, впервые были измерены вращательная температура и плотность газа в свободной сверхзвуковой струе азота, активированной электронно-пучковой плазмой с помощью оптической электронно-пучковой диагностики. Для учета влияния собственного свечения плазмы был выбран способ простого вычитания этого фона из излучения диагностирующего пучка в активированном потоке. Этот способ накладывает некоторые ограничения на область параметров эксперимента, поскольку для измерений с достаточной точностью необходимо, чтобы собственное излучение было как минимум в два раза меньше, чем суммарное излучение. Проведенные измерения позволили зарегистрировать влияние активации электронно-пучковой плазмы на параметры струи газа. Как и ожидалось, вращательная температура азота в активированной струе по сравнению с нейтральной увеличивается, а плотность газа на оси струи падает.

## Список литературы

- [1] Halpern B.L., Schmitt J.J., Golz J.W., Di Y., Johnson D.L. // Applied Surface Science. 1991. V. 48/49. P. 19–26.
- [2] Sharafutdinov R.G., Khmel S.Ya., Shchukin V.G., Ponomarev M.V., Baranov E.A., Volkov A.V., Semenova O.I., Fedina L.I., Dobrovolsky P.P., Kolesov B.A. // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2005. V. 89. P. 99–111.
- [3] Jordan D.C., Burns C.T., Doak R.B. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. N 2. P. 883–892.
- [4] Nassar H., Pellerin S., Musiol K., Martinie O., Pellerin N., Cormier J.-M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. V. 37. N 14. P. 1904–1916.
- [5] Broc A., De Benedictis S., Dilecce G., Vigliotti M. et al. // J. Fluid Mech. 2004. V. 500. P. 211–237.
- [6] Gochberg L.A. // Prog. Aerospace Sci. 1997. V. 33. P. 431–480.
- [7] Беликов А.Е., Зарвин А.Е., Карелов Н.В. и др. // ЖПМТФ. 1984. № 3. С. 5–13.
- [8] Ребров А.К., Сухинин Г.И., Ленгран Ж.-К., Шарафутдинов Р.Г. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 9. С. 1832–1840.
- [9] Бочкарев А.А., Косинов В.А., Ребров А.К. и др. // Экспериментальные методы в динамике разреженных газов. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1974. 218 с.
- [10] Gorchakova N.G., Kuznetsov L.I., Yarigin V.N. // Electron beam diagnostics of high temperature rarefied gas flows. Rarefied Gas Dynamics: Proc. 13th Intern. Symp. N.-J.: Plenum Press, 1985. V. 2. P. 825–832.
- [11] Sukhinin G.I., Sharafutdinov R.G., Belikov A.E., Sedelnikov A.I. // Chemical Physics. 1994. V. 189. N 3. P. 603–614.
- [12] Сухинин Г.И., Храмов Г.А., Шарафутдинов Р.Г. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 8. С. 1762–1763.
- [13] Belikov A.E., Kuznetsov O.V., Sharafutdinov R.G. // Plasma Chem. and Plasma Processing. 1995. V. 15. N 3. P. 481–499.
- [14] Бочкарев А.А., Великанов Е.Г., Ребров А.К. и др. // Экспериментальные методы в динамике разреженных газов. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1974. 218 с.