

## Источник плазменной струи атмосферного давления, формируемой в воздухе или азоте при возбуждении барьерным разрядом

© Э.А. Соснин,<sup>1,2</sup> В.А. Панарин<sup>1</sup> В.С. Скакун,<sup>1</sup> В.Ф. Тарасенко,<sup>1,2</sup> Д.С. Печеницин,<sup>1</sup> В.С. Кузнецов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 13 июля 2015 г.)

Проведены исследования плазменной струи атмосферного давления, возбуждаемой в воздухе и азоте барьерным разрядом. Создан источник, формирующий в воздухе и азоте стабильные плазменные струи длиной до 4 см, и измерены его энергетические и спектральные характеристики.

### Введение

Плазменные струи атмосферного давления (ПСАД) (в англ. “atmosphere pressure plasma jets” (APPJ)) сегодня — объект множества исследований [1–3], что связано с перспективами его применения в медицине [3–5], для инактивации биосистем [3,6,7] и обеспечения полезного действия на материалы (очистка поверхности, травление, осаждение тонких пленок) [1,8–10] и т.д.

Плазменная струя образуется в разряде (тлеющем, дуговом, радиочастотном, барьерном и т.д.) и выбрасывается через узкое сопло (круглое или щелевое по сечению) за счет создания в зоне разряда избыточного давления, превышающего атмосферное. Возбуждение тлеющим, коронным или барьерным разрядом создает неравновесную плазму со средней температурой газа от 20 до 400°С и плотностью заряженных частиц, типичной для слабоионизованных газов (не выше  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>), и концентрацией активных частиц до 100 ppm. При температурах, близких к комнатным, такую плазму называют холодной и нетермической (в англ. „cold atmospheric plasma“ или „non-thermal plasmas“).

В настоящее время созданы и изучены источники ПСАД на основе барьерного разряда, в которых рабочим газом являются He, Ar, N<sub>2</sub>, воздух и смеси инертных газов с добавками азота или кислорода [3–15]. Для получения плазмы применяют импульсы напряжения положительной и отрицательной полярностей, длительностью порядка 0.1–1 μs, амплитудой до 30 kV, частотой следования десятки kHz и скоростями прокачки газов от единиц до десятков l/min. В ряде работ, например в [3,6], применяется радиочастотный способ возбуждения.

К настоящему времени имеется большое количество работ, в которых исследовано влияние параметров импульсов возбуждения и конструкции источника на геометрию плазменной струи и ее спектральные характеристики. Значительно меньше внимания уделено измерению энергетических характеристик ПСАД, ее температуры, в том числе профилю температуры по сечению струи. Это особенно актуально для режимов, в которых

температура газа превышает 100°С, что происходит при замене инертных газов их смесями, содержащими электроотрицательный молекулярный газ, воздух или азот. Тогда, с одной стороны, формируется больше химически активных частиц [3,16], но с другой — требуется повышенное напряжение (> 15 kV). Кроме того, при использовании молекулярных газов плазменный поток становится чувствительным к скорости прокачки газа и возрастает его температура. Соответственно источник плазмы уже нельзя назвать низкотемпературным.

Целью настоящей работы является получение стабильной плазменной струи атмосферного давления, возбуждаемой в воздухе и азоте барьерным разрядом, с минимальным расходом газа (до 1 l/min) и изучение его энергетических, температурных и спектральных характеристик.

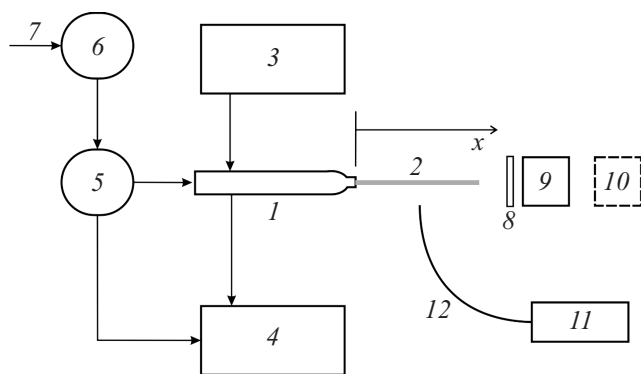
### Экспериментальное оборудование и методики

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Плазменную струю формировали, зажигая барьерный разряд в кварцевой трубке 1 с диаметром сопла 1.5 mm. Источник питания 3 позволял варьировать длительность импульса напряжения  $\tau = 1$ – $1.5$  μs, частоту следования импульсов  $f$  от 10 до 90 kHz и амплитуду напряжения до 13 kV.

Временной ход импульсов излучения и тока на экилампе регистрировали осциллографом TDS 224 (Tektronics, Inc.). Импульсы напряжения снимали с помощью резистивного делителя напряжения, а импульсы тока — токовым шунтом, собранным на линейке чип-резисторов.

В трубку 1 подавался поток азота или воздуха, а расход газа контролировали с помощью расходомера 6 U30/AP40 и датчика давления 5 PSE 511 (SMC Corp.), сигнал с которого также подавался на осциллограф 4.

Мощность излучения ПСАД измеряли фотоприемником 9 HAMAMATSU H8025-222 (с максимумом спектральной чувствительности на 222 nm), помещенным на



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 — источник ПСАД, 2 — плазменная струя, 3 — источник питания, 4 — осциллограф, 5 — датчик давления, 6 — регулятор расхода газа, 7 — подача газа, 8 — кварцевая пластинка, 9 — фотоприемник, 10 — термоэлектрический преобразователь, 11 — спектрометр, 12 — волоконный световод,  $x$  — расстояние от выхода из сопла до места проведения измерений.

оси плазменного потока на различных расстояниях  $x$ . Входное окно фотоприемника было изолировано от потока тепла с помощью кварцевой пластинки 8. Для измерения температуры вместо фотоприемника устанавливали термопару 10 ТПК 011-0.5/3 с терморегулятором ОВЕН ТРМ202.

Обзорный спектр излучения разряда регистрировался через оптоволоконно 12 с известным спектром пропускания, сигнал с которого подавался на спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной п.с.-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 nm, спектральная полуширина аппаратной функции составляет примерно 1.33 nm).

## Результаты и их обсуждение

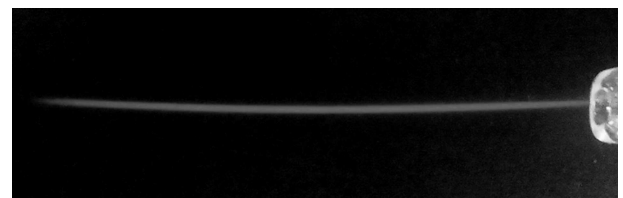
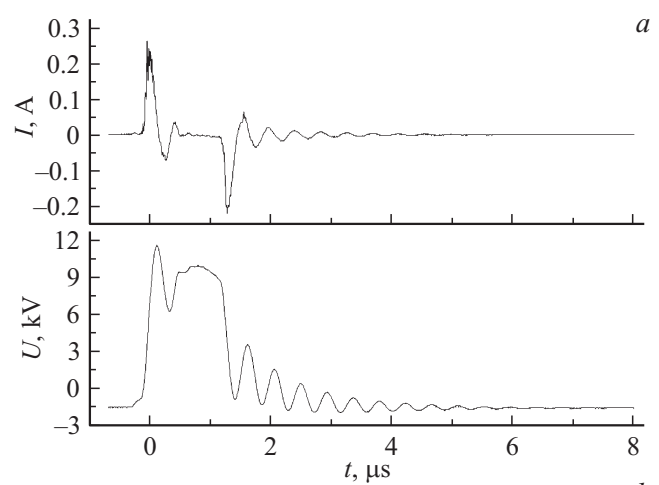
Типичные осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$ , формирующих плазменную струю в воздухе, и внешний вид ПСАД показаны на рис. 2, *a* и *b* соответственно. После зажигания разряда требуется от 30 до 60 с для выхода на устойчивый режим горения. Типичный диаметр струи не превышает 0.5–1 mm. При небольшом расходе газа  $g = 0.5$  l/min в условиях  $\tau = 1$ –1.5  $\mu$ s,  $f = 45$ –85 kHz и амплитудах напряжения до 13 kV удалось получить струи длиной  $l$  до 4 и 3 см в воздухе и азоте соответственно. В наших условиях ПСАД имела следующую особенность: при расходе газа  $g < 0.5$  l/min струя не формируется. При увеличении расхода до  $\sim 0.5$  l/min длина струи становится максимальной — 3 см в азоте и 4 см в воздухе. Дальнейший рост расхода газа до 5–10 l/min сокращал длину струи. То есть оптимальные величины  $g \sim 0.5$  l/min оказались заметно меньше тех, что указаны в предыдущих работах.

Спектр излучения ПСАД и в азоте, и в воздухе в области 280–450 nm был представлен полосами электронно-колебательных переходов второй положи-

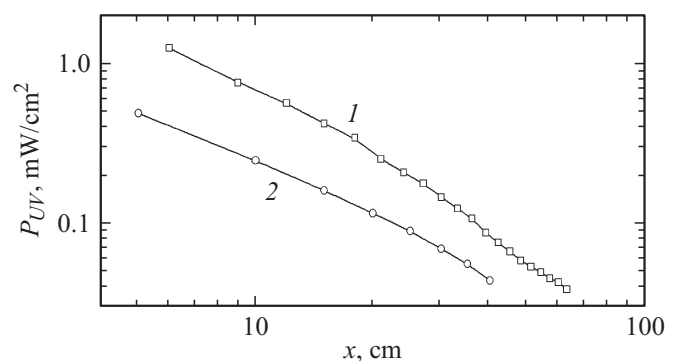
тельной системы молекулярного азота ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) с характерными пиками на длинах волн 296 (3, 1), 315 (1, 0), 337 (0, 0), 353 (1, 2), 357 (0, 1), 375 (1, 3), 380 (0, 2), 400 (1, 4), 406 (0, 3) nm (в скобках указаны соответствующие переходам колебательные числа  $v'$ ,  $v''$ ).

Кроме того, в спектре (200–280 nm) присутствовали перекрывающиеся полосы низкой интенсивности  $D^3\Sigma_u^+ \rightarrow B^3\Pi_g$  и  $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  молекулы  $N_2^*$  — в воздухе их интенсивность была в 3–4 раза ниже, чем в азоте.

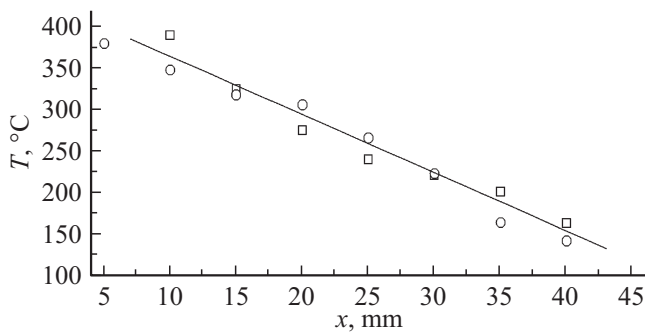
Результаты измерения энергетической светимости ультрафиолетового излучения плазменной струи в осевом направлении на различных расстояниях для азота и воздуха приведены на рис. 3. Видно, что в одинаковых



**Рис. 2.** Временной ход тока и напряжения (*a*) и форма плазменной струи воздуха (*b*) при  $f = 75$  kHz. Длина струи  $l \sim 3.5$  см.



**Рис. 3.** Энергетическая светимость плазменной струи в осевом направлении плазменной струи на различных расстояниях от сопла для воздуха (1) и азота (2) при  $f = 86$  kHz,  $\tau = 1$   $\mu$ s,  $g = 0.5$  l/min.



**Рис. 4.** Температура плазменной струи на различных расстояниях от сопла для воздуха (□) и азота (○) при  $f = 86$  kHz,  $\tau = 1$   $\mu$ s,  $g = 0.5$  l/min. Прямая линия — результат линейной аппроксимации.

условиях мощность излучения ПСАД на воздухе примерно в 2 раза выше, чем на азоте.

Оценим полную мощность ультрафиолетового излучения ПСАД. Согласно рис. 3, плазменная струя по всей своей длине выступает (по отношению к фотоприемнику с диаметром входного окна 6 мм) как точечный источник. В этом случае полная мощность УФ-излучения плазменной струи составляет

$$P \approx \frac{4\pi P_{UV}}{S_f} l\{l + L\}, \quad (1)$$

где  $P_{UV}$  — мощность излучения на фотоприемнике,  $S_f$  — площадь светочувствительного элемента фотоприемника,  $l$  — длина плазменной струи; расстояние между концом плазменной струи и фотоприемником. Соотношение (1) работает, поскольку радиус плазменной струи  $r_0 \ll L$  и  $r_0 \gg l$  [17]. Тогда, согласно (1), полная мощность излучения для потока азота и воздуха (в условиях рис. 3) составляет  $\sim 0.03$  и  $0.05$  W соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости температуры плазменной струи длиной 40 мм на ее оси на различных расстояниях от сопла для азота и воздуха. Их линейная аппроксимация дает соотношение  $T = a + bx$ , где  $a = 434 \pm 18$ ,  $b = 7 \pm 0.7$ , т.е. для обоих газов температура плазменной струи линейно зависит от расстояния от сопла.

Таким образом в исследованном источнике ПСАД сочетаются качества, характерные для плазменных струй, формируемых в условиях тлеющего, коронного или барьерного разряда (со средней температурой газа от 20 до 400 °C), но не требуются повышенные величины напряжения зажигания и горения и/или высокие скорости прокачки  $g \geq 10$  l/min. Полученные плазменные струи стабильны как в азоте, так и в воздухе при нормальных условиях, хотя расход газа является минимальным  $g \sim 0.5$  l/min.

В дальнейшем предполагается провести теоретическое моделирование процессов в ПСАД, а также выявить научные и практические задачи, в которых такой источник может быть использован.

## Заключение

Создан источник, формирующий в воздухе и азоте стабильные плазменные струи атмосферного давления. Показано, что при минимальном расходе газа ( $\sim 0.5$  l/min) в условиях барьерного разряда с параметрами возбуждающего импульса  $\tau = 1-1.5$   $\mu$ s,  $f = 65-85$  kHz, амплитудах напряжения до 13 kV формируются плазменные струи длиной  $l$  до 4 и 3 см в воздухе и азоте соответственно и типичными диаметрами не более 0.5–1 мм.

Спектр излучения ПСАД в области 280–450 nm практически не зависит от выбора газа и преимущественно излучает на полосах электронно-колебательных переходов второй положительной системы молекулярного азота ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ).

Измерены величины энергетической светимости  $P_{UV}$  и температуры  $T$  плазменной струи на ее оси. Определена средняя мощность излучения плазменной струи, которая в азоте и воздухе составляет  $\sim 0.03$  и  $0.05$  W соответственно.

Установлено, что в условиях наших экспериментов зависимость величины температуры плазменной струи на ее оси от расстояния до сопла является линейной.

Исследование было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

## Список литературы

- [1] Schutze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., Park J., Selwyn G.S., Hicks R.F. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 6. P. 1685–1694.
- [2] Rahman Z., Rahman H., Rahman Md.A. // Int. J. Math. Phys. Sci. Res. 2014. Vol. 2. N 2. P. 127–146.
- [3] Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security (NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology) / Ed. by Z. Machala, K. Hensel, Yu. Akishev. Springer, 2012. 496 p.
- [4] Kong M.G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J., Zimmermann J.L. // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. P. 115012.
- [5] Joh H.M., Kim S.J., Chung T.H., Leem S.H. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 053703.
- [6] Sosnin E.A., Stoffels E., Erofeev M.V., Kieft I.E., Kunts S.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32. N 4. P. 1544–1550.
- [7] Laroussi M. // Plasma Process. Polym. 2005. Vol. 2. P. 391–400.
- [8] Daun Y., Hung C., Yu Q.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. P. 328–329.
- [9] Benedict J., Forcke K., Yanguas-Gil A., Von Keudell A. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 99. P. 112–303.
- [10] Tioshifuji J., Katsumata T., Takikawa H., Sakakibara T., Shimizu I. // Surface and Coating Tech. 2003. Vol. 171. P. 302–306.
- [11] Shao X.-J., Jiang N., Zhang G.-J., Cao Z.-X. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 253509.
- [12] Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., Fang Z. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. N 3. P. 726–732.

- [13] *Shao T., Yang W., Zhang C., Fang Z., Zhou Y., Schamiloglu E.* // *Europhysics Lett.* 2014. Vol. 107. N 6. P. 65004.
- [14] *Hong Y.Ch., Uhm H.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 221504.
- [15] *Zhang C., Shao T., Wang R., Zhou Z., Zhou Y., Yan P.* // *Physics of Plasmas.* 2014. Vol. 21. N 10. P. 103505.
- [16] *Kim J.Y., Lee D.-H., Ballato J., Cao W., Kim S.-O.* // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. P. 224101
- [17] *Соснин Э.А., Пикулев А.А., Тарасенко В.Ф.* // *ЖТФ.* 2011. Т. 81. Вып. 4. С. 97–101.