

01

## Комплекс сверхвысокочастотной диагностики холодных атмосферных плазменных струй

© А.М. Астафьев, А.М. Альтмарк, Н.А. Лесив, А.С. Чирцов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.

В окончательной редакции 12.06.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Предложена система сверхвысокочастотной диагностики низкотемпературных нестационарных атмосферных плазменных струй, принцип действия которой основан на регистрации изменения добротности основной моды электрического типа цилиндрического резонатора. Измерены временные зависимости средней объемной проводимости плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия. Питание разряда осуществлялось от источника переменного напряжения частотой 9 кГц. Такая низкая частота питающего напряжения позволила различить отдельные импульсы пробоев барьерного разряда.

**Ключевые слова:** СВЧ резонатор, барьерный разряд, плазменная струя, проводимость, добротность.

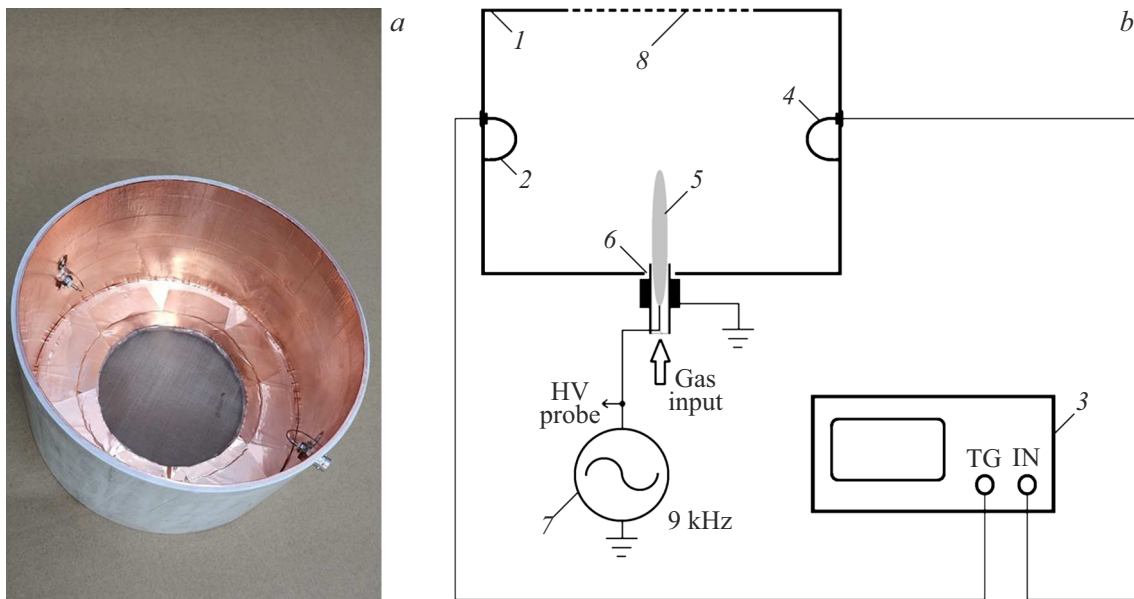
DOI: 10.61011/OS.2023.11.56997.5021-23

В настоящее время активно внедряются и развиваются различные технологии, связанные с использованием атмосферных плазменных струй с низкой (около 300 К) газовой температурой. Так, например, низкотемпературные плазменные струи могут быть использованы для обработки поверхности термочувствительных полимеров при нанесении на них клеев и лакокрасочных покрытий [1], а также в медицине для стерилизации и дезинфекции живых тканей [2]. Генерация таких атмосферных плазменных струй осуществляется путем зажигания разрядов различных типов (тлеющий, высокочастотный, барьерный разряд) в специальной разрядной ячейке, через которую продувается рабочий газ. Одной из важных проблем при разработке новых типов источников низкотемпературных плазменных струйных для различных приложений является необходимость измерения и контроля электронной концентрации плазмы. Однако большинство методов диагностики плазмы либо обладают недостаточной чувствительностью, либо не позволяют исследовать нестационарные разряды. Наиболее подходящими для диагностики холодных атмосферных плазменных струй являются различные сверхвысокочастотные (СВЧ) методы. Так, в работах [3,4] для измерения временной зависимости электронной концентрации в плазменной струе униполярного импульсного и барьерного разряда регистрировался рассеянный от исследуемой области плазмы СВЧ сигнал частотой около 10 GHz. В работе [5] для измерения электронной концентрации плазменной струи барьерного разряда в потоке аргона использовался волноводный СВЧ фильтр, что существенно увеличило чувствительность измерений, поскольку зондирование производилось в замкнутом объеме, а не в открытом пространстве.

В настоящей работе для диагностики плазменных струй используется система на основе цилиндрического СВЧ резонатора с рабочей ТМ010-модой. Ранее [6,7] подобная система на основе цилиндрического резонатора с рабочей ТЕ11-модой уже была нами апробирована для плазменных струй барьерного разряда в потоке гелия и аргона, которые зажигались от высоковольтного источника частотой 160 кГц. В отличие от [6,7] в настоящей работе для зажигания барьерного разряда использовался высоковольтный источник переменного напряжения частотой всего 9 кГц, что позволило различить отдельные импульсы пробоев барьерного разряда.

Использованная экспериментальная установка (рис. 1) во многом похожа на ранее описанную в [7]. Основным ее элементом (рис. 1, *b*) являлся цилиндрический СВЧ резонатор (1) диаметром 192 mm и длиной 105 mm. Внутри резонатора располагались две небольшие рамочные антенны. Одна из этих антенн (2) являлась возбуждающей и была подключена ко встроенному трекинг-генератору (TG) анализатора спектра (3), уровень мощности которого не превышал 1 mW. Другая антенна (4) была подключена ко входу (IN) анализатора спектра и являлась приемной. Анализатор спектра (Rigol 815-tg) работал в диапазоне частот до 1.5 GHz. В этой полосе частот в резонаторе может возбуждаться только одна ТМ010-мода на частоте около 1.19 GHz, которая имеет одну компоненту электрического поля  $E_z$  и одну компоненту магнитного поля  $H_\phi$ .

Исследуемая плазменная струя барьерного разряда (5) размещалась внутри резонатора через вводное отверстие (6), расположенное в центре одного из оснований цилиндрического резонатора (в окрестности максимума электрического поля). Для зажигания барьерного разряда использовался высоковольтный источник



**Рис. 1.** Изображение внутренней части резонатора (а); схема системы СВЧ диагностики низкотемпературных плазменных струй (b): 1 — СВЧ резонатор, 2 — возбуждающая антенна, 3 — анализатор спектра, 4 — приемная антенна, 5 — плазменная струя, 6 — вводное отверстие, 7 — источник питания, 8 — окно с тонкой металлической сеткой.

питания частотой 9 kHz (7). Другое основание резонатора имело окно (8) диаметром 50 mm с тонкой металлической сеткой, которое позволяло наблюдать и контролировать плазменную струю внутри резонатора, не изменяя при этом структуры поля возбуждаемой моды. Поскольку электронная концентрация исследуемой плазменной струи небольшая, то она достаточно мало изменяла добротность ТМ<sub>010</sub>-моды и совсем не изменяла ее частоту. Последнее обстоятельство связано с тем, что эффективная частота соударений электронов на несколько порядков выше частоты ТМ<sub>010</sub>-моды [8,9]. Максимальная выходная мощность трекинг-генератора примерно на три порядка ниже мощности разряда, что позволяет исключить влияние СВЧ сигнала на струю и рассматривать линейную задачу.

На рис. 2, а и b представлены изображение плазменной струи, а также зависимости тока разряда и напряжения на разрядной ячейке. На зависимости тока разряда от времени видны характерные пики отдельных пробоев барьерного разряда.

На рис. 3, а представлен спектр ТМ<sub>010</sub>-моды резонатора без плазменной струи, по которой значение добротности  $Q_{010}$  может быть определено с помощью отношения  $Q_{010} = f_{010}/\Delta f_{3db}$ , где  $f_{010}$  — частота ТМ<sub>010</sub>-моды,  $\Delta f_{3db}$  — ширина полосы частот резонансной кривой, на которой мощность равна половине максимального значения. По спектральной характеристике на рис. 3, а можно определить, что ширина полосы частот  $\Delta f_{3db}$  составляет почти 4 MHz, а добротность ТМ<sub>010</sub>-моды равна 300. При зажигании плазменной струи внутри резонатора добротность резонатора синхронно изменяется с возникающими отдельными пробоями барьерного

разряда. Для регистрации такой зависимости анализатор спектра был переведен в режим измерения нулевой полосы, в котором измеряется временная зависимость мощности сигнала на выбранной частоте (в максимуме). Такая временная зависимость напрямую связана с изменением обратного значения добротности  $Q_{010}$  моды ТМ<sub>010</sub> и средней проводимостью исследуемой плазменной струи  $\sigma$  известным соотношением [8]:

$$\Delta \frac{1}{Q_{010}} = - \frac{\int_v \sigma |E_{010}|^2 dV}{2\pi f_{010} \epsilon_0 \int |E_{010}|^2 dV},$$

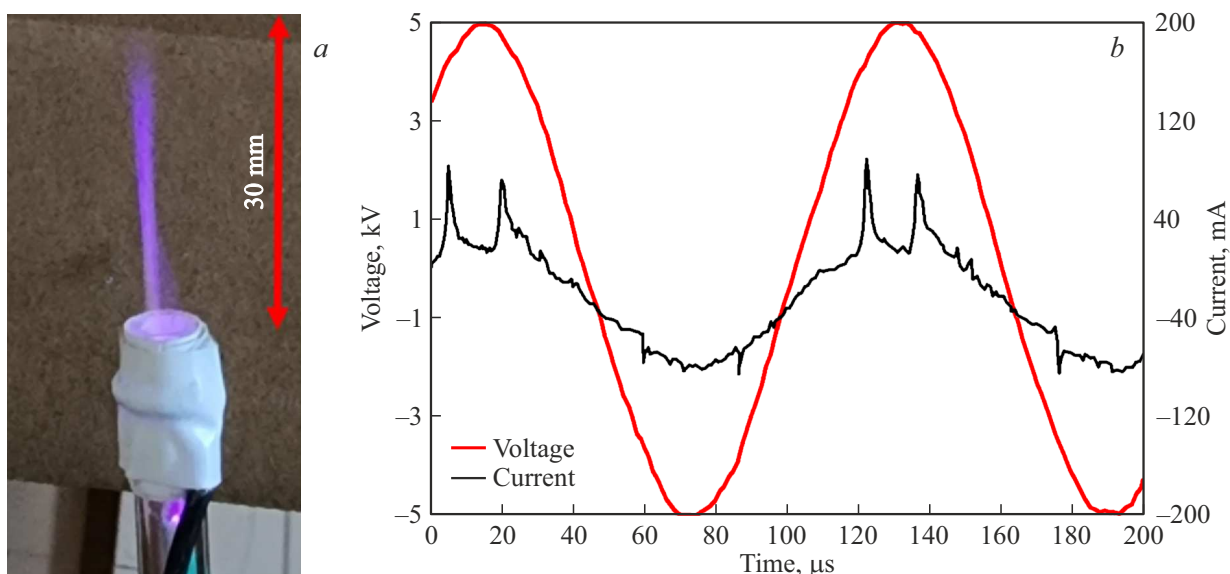
где  $v$  — объем исследуемой области плазмы,  $V$  — объем СВЧ резонатора,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $E_{010}$  — электрическое поле ТМ<sub>010</sub>-моды цилиндрического СВЧ резонатора [10].

На рис. 3, b представлена зависимость средней проводимости плазменной струи от времени (черная кривая). Из рис. 2, b и 3, b видно, что проводимость резко увеличивается в моменты возникновения пробоев барьерного разряда.

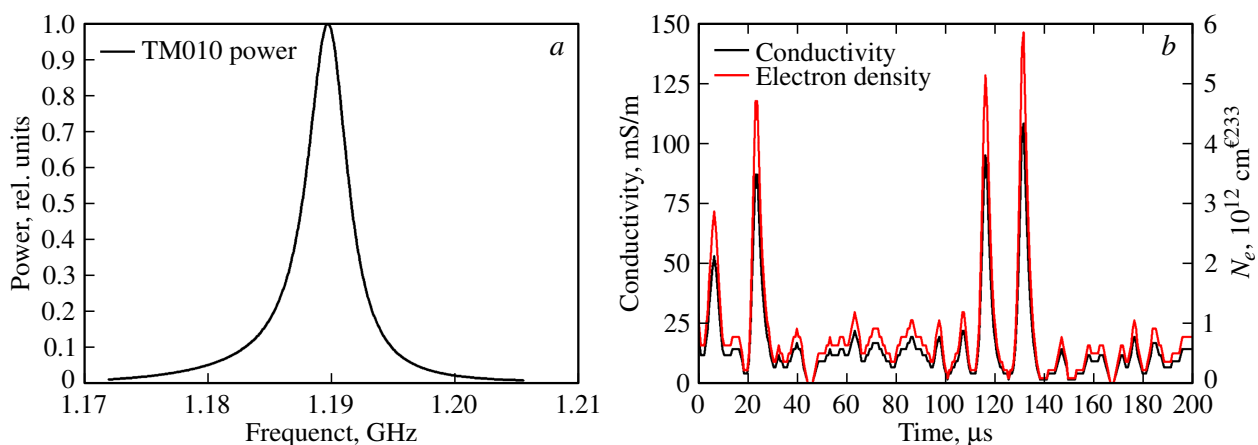
Из полученной кривой для проводимости плазменной струи можно также получить временные зависимости электронной концентрации плазмы  $N_e$  с использованием известного соотношения для проводимости плазмы [8,9]:

$$\sigma = \frac{v_{\text{eff}} N_e e^2}{m_e (v_{\text{eff}}^2 + \omega)},$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\omega$  — циклическая частота,  $m_e$  — масса электрона,  $v_{\text{eff}}$  — эффективная частота соударения электронов, которая зависит от типа газа и давления.



**Рис. 2.** Изображение плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия (a); временные зависимости тока разряда и напряжения на разрядной ячейке (b).



**Рис. 3.** Спектр TM010-моды цилиндрического резонатора без плазменной струи (a); временные зависимости средней проводимости и электронной концентрации плазменной струи (b).

Если положить эффективную частоту соударения электронов в газоразрядной плазме гелия атмосферного давления равной 1.5 THz [9], то по известной зависимости средней проводимости можно получить временную зависимость средней электронной концентрации исследуемой плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия (красная кривая на рис. 3, b). Однако полученные таким образом зависимости электронной концентрации от времени будут очень приближенными, поскольку в плазменной струе выдуваемый в атмосферу газ смешивается с воздухом с разной пропорцией в разных областях струи. Тем не менее полученные значения по порядку величины соответствуют известным результатам для плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия [3].

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-20065) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 17/2022).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Z. Fang, J. Yang, Y. Liu, T. Shao, C. Zhang. IEEE Transactions on Plasma Sci., **41** (6), 1627 (2013). DOI: 10.1109/TPS.2013.2259508
- [2] A. Fridman, G. Friedman. *Plasma Medicine* (John Wiley & Sons Ltd, UK, 2013), 526 p.

- [3] A. Shashurin, M. Keidar. *Phys. Plasmas*, **22** (12), 122002 (2015). DOI: 10.1063/1.4933365
- [4] X. Wang, A. Shashurin. *J. Appl. Phys.*, **122** (6), 063301 (2017). DOI: 10.1063/1.4986636
- [5] М.С. Усачёнок, Ю.С. Акишев, А.В. Казак, А.В. Петряков, Л.В. Симончик, В.В. Шкурко. *ЖТФ*, **93** (3), 350 (2023).
- [6] A. Astafiev, A. Chirtsov, A. Altmark, N. Lesiv. *2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, IEEE, 2022, p. 390–393. DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079628
- [7] A. Astafiev, A. Altmark, N. Lesiv, A. Chirtsov. *2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, IEEE, 2022, p. 203–206. DOI: 10.1109/EExPolytech56308.2022.9950891
- [8] В.Е. Голант. *Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы* (Наука, М., 1968), 110 с.
- [9] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, М., 1987; с изменениями 1992), 536 с.
- [10] David M. Pozar. *Microwave Engineering* (John Wiley & Sons Ltd, UK, 2005), 720 p.