

## Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия в цилиндрическом СВЧ-резонаторе

А. М. Астафьев<sup>✉</sup>, А. М. Альтмарк, Н. А. Лесив, А. С. Чирцов

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

<sup>✉</sup> [astafev-aleksandr@yandex.ru](mailto:astafev-aleksandr@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время активно развиваются технологии, связанные с использованием атмосферной плазмы с низкой газовой температурой. При создании новых источников низкотемпературной плазмы для конкретных приложений возникает необходимость в измерении динамических процессов в нестационарных разрядах с высоким временным разрешением. Одной из наиболее важных характеристик плазмы является концентрация электронов, которая для плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа может быть очень небольшой. Однако доступные в настоящее время методы диагностики газоразрядной плазмы либо обладают недостаточной чувствительностью, либо не позволяют отслеживать динамические процессы в нестационарных разрядах. В этой связи представляет интерес разработка новых средств, позволяющих проводить диагностику атмосферной низкотемпературной плазмы.

**Цель работы.** Разработка метода диагностики атмосферной плазмы с низкой температурой газа и низкой электронной концентрацией в цилиндрическом СВЧ-резонаторе.

**Материалы и методы.** Предлагаемый метод диагностики основан на известном способе измерения сдвига частоты и добротности собственных мод СВЧ-резонатора, внутри которого находится исследуемая плазма.

**Результаты.** Выполнена диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке гелия и аргона в цилиндрическом СВЧ-резонаторе. Предложенная геометрия позволила существенно увеличить чувствительность измерений. Удалось исключить влияние эффекта поляризационного вырождения мод в круглом цилиндрическом резонаторе. Разработанная система была также апробирована на тестовых объектах с известным значением диэлектрической проницаемости.

**Заключение.** Разработан метод СВЧ-диагностики стационарных и нестационарных холодных атмосферных плазменных струй в цилиндрическом резонаторе, внутри которого установлены передающая и приемная антенны, а также ортогональный тонкий проводник, обеспечивающий подавление нежелательных мод.

**Ключевые слова:** СВЧ-резонатор, плазменная струя, барьерный разряд, частота соударения электронов, добротность, поперечно-электрические (ТЕ) моды

**Для цитирования:** Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия в цилиндрическом СВЧ-резонаторе / А. М. Астафьев, А. М. Альтмарк, Н. А. Лесив, А. С. Чирцов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 122–135. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-122-135

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 21.10.2022; принята к публикации после рецензирования 24.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

## Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator

Aleksandr M. Astafiev✉, Aleksandr M. Altmark, Nikita A. Lesiv, Alexander S. Chirtsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ astafev-aleksandr@yandex.ru

### Abstract

**Introduction.** Technologies related to the use of low-temperature atmospheric plasmas are developing at a rapid pace. Creation of new low-temperature plasma sources for specific applications requires monitoring of dynamic processes in such discharges with a high time resolution. Electron concentration is one of the most important plasma characteristics, which can be very low for a low-temperature atmospheric pressure plasma. However, the methods currently available for diagnostics of gas-discharge plasmas are either characterized by insufficient sensitivity or unable to monitor dynamic processes in non-stationary discharges. In this regard, the development of new diagnostic approaches to low-temperature atmospheric plasma seems to be a relevant research direction.

**Aim.** To develop a diagnostic method for an atmospheric plasma with a low gas temperature and a low electron concentration in a cylindrical microwave resonator.

**Materials and methods.** The proposed diagnostic method is based on the well-known principle of measuring the frequency shift and the  $Q$ -factor of the eigenmodes of the microwave resonator, inside which the plasma under study is located.

**Results.** Measurements of the atmospheric barrier discharge plasma jets in a helium and argon stream in a cylindrical microwave resonator were performed. The proposed geometry made it possible to significantly increase the sensitivity of measurements. It became possible to exclude the effect of polarization degeneracy in a round cylindrical resonator. The developed system was also tested on test objects with a known value of permittivity.

**Conclusion.** A method for microwave diagnostics of stationary and non-stationary cold atmospheric plasma jets in a cylindrical resonator, inside which transmitting and receiving antennas are installed, as well as an orthogonal thin conductor preventing the excitation of undesirable modes, was developed.

**Keywords:** microwave cavity resonator, plasma jet, barrier discharge, electron collision frequency,  $Q$ -factor, transverse electric (TE) modes

**For citation:** Astafiev A. M., Altmark A. M., Lesiv N. A., Chirtsov A. S. Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 122–135. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-122-135

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-20065) and St Petersburg Science Foundation (project No. 17/2022).

Submitted 21.10.2022; accepted 24.05.2023; published online 29.06.2023

**Введение.** В настоящее время активно развиваются технологии, основанные на использовании плазмы атмосферного давления с низкой (около 300 K) температурой газа для обработки поверхности полимеров, нанесения покрытий, а также улучшения адгезии лаков, красок, чернил и клеев [1–3]. Еще одна причина повышенного внимания к изучению неравновесной низкотемпературной плазмы атмосферного давления вызвана большими перспективами ее использования в медицине для стерили-

зации и дезинфекции живых тканей [4, 5]. Такие исследования в области плазменной медицины широко проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. Кроме того, в настоящее время выходят специальные тематические журналы, посвященные плазменной медицине (Plasma Medicine, Clinical Plasma Medicine).

В основе применяемых на практике устройств обычно используется газоразрядная ячейка, через которую продувается рабочий газ [4–6]. На выходе из разрядной ячейки форми-

руется плазменная струя с характерной длиной несколько сантиметров и диаметром несколько миллиметров. Для генерации плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа используются различные типы разрядов, которые обычно не являются стационарными. При создании новых источников низкотемпературной плазмы для конкретных приложений возникает необходимость в измерении динамических процессов в таких разрядах с высоким временным разрешением. Одной из наиболее важных характеристик плазмы является плотность электронов, которая для плазмы атмосферного давления с низкой температурой газа может быть очень небольшой ( $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и ниже [7, 21]). Электронная плотность может измеряться различными способами. Однако доступные в настоящее время методы либо обладают недостаточной чувствительностью, либо не позволяют отслеживать динамические процессы в нестационарных разрядах.

Измерение электронной концентрации плазмы атмосферного давления с использованием зондовых методов является очень сложной задачей. Внесение зонда в плазменную струю приводит к сильному ее возмущению, что связано с большой вносимой емкостью и малым сопротивлением зондовой цепи по сравнению с сопротивлением плазменной струи. Это, в свою очередь, приводит к замыканию разряда или плазменной струи на зонд. Эта задача еще больше усложняется при диагностике атмосферной холодной плазмы с низкой электронной концентрацией.

В некоторых работах для оценки электронной концентрации плазмы разряда [8–10] вычислялось его сопротивление по закону Ома. Далее по известным значениям скорости дрейфа электронов и наблюдаемым геометрическим характеристикам разряда выполнялась оценка электронной концентрации. Однако такой подход к оценке электронной плотности имеет некоторые существенные ограничения. Падение напряжения на разрядном промежутке и падение напряжения в плазменном столбе могут сильно отличаться из-за наличия приэлектродного падения напряжения (как, например, катодный слой). Другое важное ограничение этого метода оценки плотности электронов в

плазме связано с тем, что ток в разряде может иметь сильно неоднородное распределение, которое измерить очень сложно (например, струя барьерного разряда в потоке инертных газов [7]). Кроме того, для нестационарных разрядов можно оценить только среднюю концентрацию электронов (за период приложенного напряжения) без возможности измерения ее зависимости от времени [10].

Одним из наиболее эффективных методов диагностики газоразрядной плазмы является метод томсоновского рассеяния лазерного излучения на свободных электронах [11, 12]. Такой подход характеризуется очень хорошим пространственным разрешением (до нескольких десятков микрометров), что позволяет использовать его для диагностики микроразрядов [12] и плазменных струй атмосферного давления с характерными размерами в несколько миллиметров [13]. Однако этот метод имеет ограниченную чувствительность и его трудно использовать при измерении атмосферной плазмы с концентрацией электронов менее  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, такой подход из-за низкого уровня регистрируемого сигнала требует длительного его накопления (десятки миллисекунд), что не позволяет использовать его при исследовании нестационарных разрядов.

Другой известный метод измерения электронной концентрации плазмы основан на том, что штарковское уширение разных линий поразному зависит от электронной плотности и температуры. Сравнение двух или более линий позволяет получить одновременно данные об электронной концентрации и температуре с очень высоким временным разрешением (вплоть до пикосекунд). Этот метод успешно использовался при исследовании плазмы атмосферного давления в разрядах различного типа [14–16]. Однако использование этого метода для измерения электронной концентрации в холодных атмосферных плазменных струях является непростой задачей, так как при малых значениях электронной концентрации сильно усложняется анализ уширения спектральных линий [16].

Широко известны методы измерения электронной концентрации плазмы, которые основаны на взаимодействии электромагнитных волн с плазмой. В настоящее время имеется

большое количество работ, посвященных исследованию путем зондирования радиоволнами в широком диапазоне частот как ионосферной, так и газоразрядной плазмы. Однако среди них очень мало работ по исследованию атмосферной низкотемпературной плазмы, которая может быть использована в медицине, а также для обработки термочувствительных материалов. Один из описанных в литературе методов исследования атмосферной плазмы, который также успешно использовался для исследования плазмы низкого давления, основан на регистрации рассеянного от исследуемой области плазмы СВЧ-сигнала частотой 10...11 ГГц [7, 17–21]. В этих работах исследуемая область плазмы с размерами меньше длины волны зондирующего сигнала размещалась между двух рупорных антенн на некотором удалении от них. При определении электронной плотности плазмы разряда измерялся уровень рассеянного сигнала с использованием специальной процедуры калибровки: измерение уровня сигнала, рассеянного от объекта с аналогичной геометрией и известной диэлектрической проницаемостью. Этот метод, обладающий очень высоким временным разрешением, успешно применялся для диагностики импульсного разряда между двумя электродами в воздухе [19], а также струи барьерного [7] и униполярного импульсного [21] разряда в потоке гелия. Недостатком данного метода является зондирование плазмы в свободном пространстве, поскольку в этом случае сильное влияние могут оказывать различные внешние факторы (подводящие провода питания разряда, элементы конструкции разрядной ячейки и прочие предметы), воздействие которых еще более существенно при измерении плазмы с очень низкой электронной концентрацией. Кроме того, этот метод позволяет измерять только среднюю плотность электронов без возможности проведения какой-либо оценки распределения электронной плотности вдоль неоднородных разрядов и плазменных струй.

Предлагаемый метод диагностики атмосферных плазменных струй с низкими температурой газа и электронной концентрацией основан на известном способе измерения сдвига частоты и добротности собственных мод СВЧ-

резонатора [22–30]. Этот метод СВЧ-диагностики еще с середины прошлого века широко используется для измерения характеристик диэлектрических материалов [22, 23, 29] и газоразрядной плазмы низкого давления [25, 26, 30], но ранее не применялся для таких специфических объектов, как холодные атмосферные плазменные струи. Данный метод позволит получать более точные результаты, чем метод, основанный на рассеянии СВЧ-сигнала в свободном пространстве [7, 18, 19 и 21], а также даст возможность измерять распределение электронной плотности вдоль протяженных неоднородных разрядов и плазменных струй. Данная работа является продолжением исследований, начатых в [28].

**Описание метода диагностики.** Идея использованного метода диагностики состоит в следующем. В СВЧ-резонатор, который имеет набор собственных мод с определенными частотами  $f_k$  и добротностями  $Q_k$ , помещается исследуемый объект (газоразрядная плазма). Электрические характеристики исследуемой среды определяются путем измерения смещения собственных частот  $\tilde{f}_k$  и изменения добротностей  $\tilde{Q}_k$  собственных мод СВЧ-резонатора. Если наблюдаемые изменения собственных частот и добротностей невелики, то для определения электрических характеристик свойств среды можно использовать известную теорию возмущения, согласно которой проводимость  $\sigma$  и относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_m$  исследуемой среды определяются выражениями [29, 30, 33]

$$\frac{f_k - \tilde{f}_k}{f_k} = \frac{\int_V (\epsilon_m - 1) |E_k|^2 dV}{2 \int_V |E_k|^2 dV}; \quad (1)$$

$$\left( \frac{1}{Q_k} - \frac{1}{\tilde{Q}_k} \right) = - \frac{\int_V \sigma |E_k|^2 dV}{2\pi f_k \epsilon_0 \int_V |E_k|^2 dV}, \quad (2)$$

где  $v$  – объем исследуемой области плазмы;  $V$  – объем СВЧ-резонатора;  $E_k$  – электрическое поле  $k$ -й моды СВЧ-резонатора;  $\epsilon_0$  – электри-

ческая постоянная. Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_m$ , проводимость  $\sigma$  и относительная комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon'_m$  связаны известным соотношением  $\varepsilon'_m = \varepsilon_m + \frac{i\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$  (для временной зависимости  $e^{-i2\pi f t}$ ). Частоты  $f_k$  и  $\tilde{f}_k$  соответствуют максимумам измеренных спектральных характеристик. Значения добротностей  $Q_k$  и  $\tilde{Q}_k$  также могут быть оценены из спектральных данных с помощью соотношения  $Q_k = f_k / \Delta f_{3\text{ dB}}$ , где  $\Delta f_{3\text{ dB}}$  – ширина полосы частот резонансной кривой по уровню половинной мощности. Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_m$  и проводимость  $\sigma$  холодной плазмы могут быть выражены через электронную концентрацию  $n_e$ , частоту соударений электронов  $\nu_{ef}$  и частоту электромагнитного поля  $f = \omega / (2\pi)$  [31, 32]:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e (\nu_{ef}^2 + \omega^2)};$$

$$\sigma = \frac{\nu_{ef} n_e e^2}{m_e (\nu_{ef}^2 + \omega^2)}, \quad (3)$$

где  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона;  $\omega$  – циклическая частота электромагнитного поля.

Данный метод диагностики позволяет измерять зависимости электрических характеристик от времени. Временное разрешение этого метода можно связать со временем убывания энергии  $k$ -й моды от некоторого начального значения  $W_0$  по закону  $W(t) = W_0 e^{-t/\tau}$  или ее нарастания до конечного значения  $W_0$  по закону  $W(t) = W_0 (1 - e^{-t/\tau})$ , где  $t$  – момент времени;  $\tau = \frac{Q_k}{\pi f_k}$ . Величина  $\tau$  пропорциональна добротности используемой моды, но в проведенных экспериментах она не превышала 130 нс.

Низкотемпературные атмосферные плазменные струи характеризуются очень низким значением электронной концентрации, которое не пре-

вышает  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При атмосферном давлении частота соударения электронов составляет более 1 ТГц. Согласно (3) плазма с такими низкими значениями электронной концентрации и высокими значениями частоты соударения электронов имеет проводимость десятки–сотни миллисименс на метр [мСм/м]. Кроме того, если объем плазменных струй много меньше объема используемого СВЧ-резонатора, то они будут не очень сильно изменять собственные частоты и добротности резонатора. В этом случае использование теории возмущения вполне оправданно.

#### Описание экспериментальной установки.

Описанный подход может быть использован для диагностики разрядов атмосферного давления с очень низкой плотностью электронов и размерами, много меньше размеров СВЧ-резонатора. Для максимальной чувствительности необходимо выбрать оптимальную геометрию СВЧ-резонатора, моду, а также расположение исследуемого объекта и зондирующих антенн внутри СВЧ-резонатора. Для этой цели была изготовлена специальная экспериментальная установка (рис. 1).

Основным элементом системы является цилиндрический СВЧ-резонатор 1 диаметром  $2a = 150$  мм ( $a$  – радиус резонатора) и изменяемой длиной  $L$  от 280 до 480 мм. Для изменения длины резонатора осуществляется продольное перемещение его оснований. Внутри резонатора размещены две одинаковые зондирующие

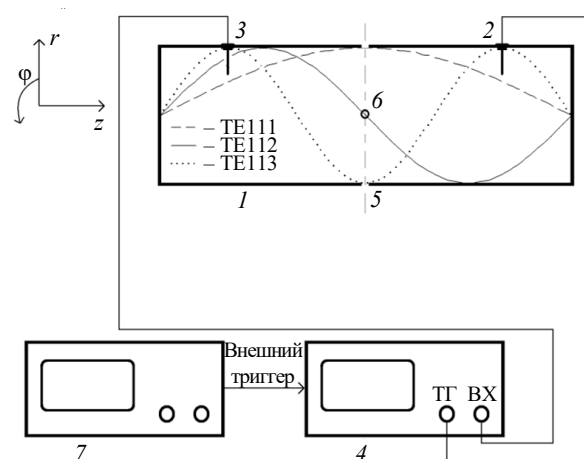


Рис. 1. Экспериментальная установка. Кривые соответствуют распределению радиальной компоненты электрического поля первых трех собственных ТЕ-мод

Fig. 1. Experimental setup. The curves correspond to the distribution of the radial component of the electric field of the first three proper TE modes

антенны 2, 3 длиной 30 мм, подключенные к анализатору спектра 4. Анализатор спектра содержит два разъема: один для входа (ВХ), а другой – для выхода отслеживающего генератора (трекинг-генератора – ТГ). Таким образом, одна из антенн является излучающей и возбуждает собственные моды в заданной полосе частот, в то время как другая является приемной и регистрирует спектр возбужденных в резонаторе собственных мод. Используемый в работе анализатор спектра (Rigol DSA815-TG) способен работать на частотах до 1.5 ГГц. В этом диапазоне частот в резонаторе могут возбуждаться только первые три поперечно-электрические моды (TE<sub>111</sub>, TE<sub>112</sub> и TE<sub>113</sub>) с частотами [33]

$$f_k = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\left(\frac{\chi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $n=1, 2, 3$ ;  $\chi=1.841$ . Электрическое поле этих первых трех мод имеет две компоненты:

$$E_r = -\frac{1}{r} \omega E_0 J_1\left(\chi \frac{r}{a}\right) \sin \varphi \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right); \quad (5)$$

$$E_\varphi = \omega E_0 J_1'\left(\chi \frac{r}{a}\right) \cos \varphi \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right), \quad (6)$$

где  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$  – цилиндрические координаты (рис. 1);  $E_0$  – амплитуда;  $J_1\left(\chi \frac{r}{a}\right)$  и  $J_1'\left(\chi \frac{r}{a}\right)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка и ее производная. Зависимости радиальных компонент электрического поля  $E_r(z)$  для первых трех мод (вдоль СВЧ-резонатора) представлены на рис. 1. Для обеспечения максимальной чувствительности исследуемый объект должен быть расположен вблизи одного из максимумов радиальной компоненты электрического поля этих мод. Для проведения диагностики можно использовать моды TE<sub>111</sub>, TE<sub>112</sub> и TE<sub>113</sub>. Предполагается, что поперечные размеры исследуемого объекта существенно меньше его длины, и он размещается внутри резонатора параллельно антеннам (в направлении радиальной компоненты электрического поля) через два отверстия диаметром 10 мм в стенке резонатора 5. Малость поперечных раз-

меров исследуемого объекта по сравнению с размерами резонатора позволяет не учитывать угловую составляющую электрического поля  $E_\varphi$  при вычислении интегралов в числителе в выражениях (1) и (2). Для исключения возбуждения моды другой поляризации в резонаторе имеется специальное отверстие 6, через которое вставляется тонкий металлический проводник длиной 30 мм, препятствующий появлению нежелательной моды, но в то же время почти не влияющий на основные (рабочие) моды. Проводник и исследуемая область плазмы находились в одной плоскости и были ортогональны друг другу. Еще одной особенностью используемой экспериментальной установки является то, что момент запуска анализатора спектра синхронизирован с моментом запуска развертки осциллографа, что позволяет осуществлять синхронную регистрацию спектра с сигналами разрядного тока и напряжения.

Генерация исследуемой плазменной струи осуществлялась с помощью ячейки барьерного разряда (рис. 2). Основным элементом этой ячейки является кварцевая трубка 1 с внешним диаметром 7 мм и толщиной стенки 1 мм, через которую продувается гелий или аргон. Один из

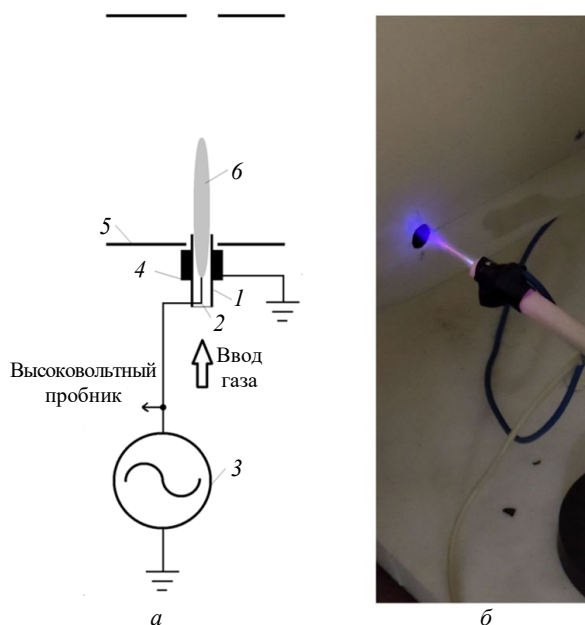


Рис. 2. Конфигурация разрядной ячейки (а); изображение плазменной струи барьерного разряда в потоке гелия (б)

Fig. 2. Configuration of the discharge cell (a); image of the helium dielectric barrier discharge plasma jet (b)



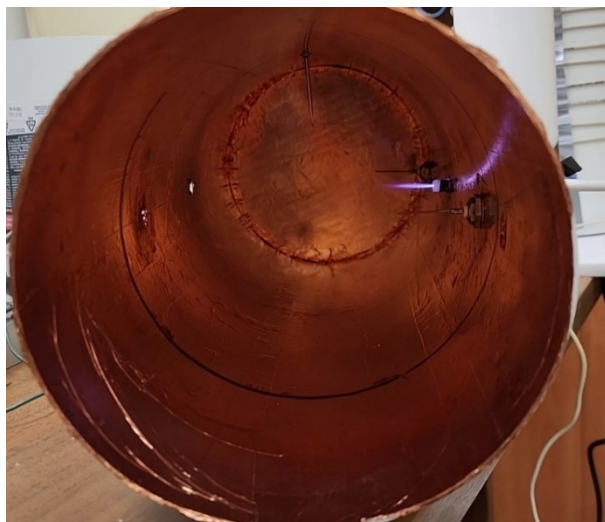


Рис. 3. Изображение плазменной струи барьерного разряда в потоке аргона внутри цилиндрического СВЧ-резонатора

Fig. 3. Image of the helium dielectric barrier discharge plasma jet inside the microwave cavity resonator

электродов диаметром 1.2 мм расположен вдоль оси трубки 2. Питание подается от импульсно-модулированного источника 3 с частотой 160 кГц. Второй заземленный кольцевой электрод 4 установлен на внешней стороне кварцевой трубки и находится у отверстия в стенке резонатора 5. За областью разрядной ячейки (внутри СВЧ-резонатора) формируется плазменная струя 6. Для иллюстрации на рис. 3 представлено изображение внутреннего пространства СВЧ-резонатора, где видно расположение зондирующих линейных антенн, плазменной струи и тонкого линейного проводника, который расположен ортогонально зондирующим антеннам и исследуемой плазменной струе.

**Настройка резонатора и пробные измерения.** Перед проведением измерений параметров атмосферных плазменных струй был измерен спектр для пустого резонатора, а также выполнены тестовые измерения характеристик объектов с известными значениями диэлектрической проницаемости.

На рис. 4 представлена спектральная характеристика пустого резонатора длиной  $L = 480$  мм для случая с тонким поперечным проводником длиной 30 мм (красная кривая) и без него (синяя кривая). Из рис. 4 видно, что помимо основных максимумов трех ТЕ-мод в спектре для цилиндрического резонатора также наблюдаются характерные пики, которые

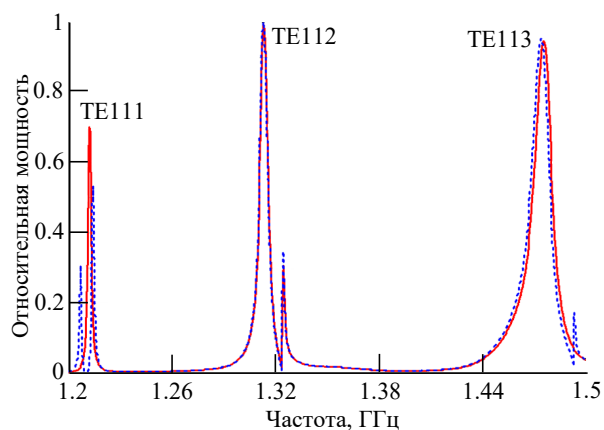


Рис. 4. Спектры мод TE111, TE112 и TE113 для СВЧ-резонатора без дополнительного поперечного проводника (синяя кривая) и для СВЧ-резонатора с тонким металлическим проводником (красная кривая)

Fig. 4. The spectra of the TE111, TE112 and TE113 modes for the microwave cavity without an additional transverse conductor (blue curve) and for the microwave cavity with a thin metal conductor (red curve)

меньше основных максимумов. Наличие этих дополнительных пиков связано с небольшой (около 1 %) овальностью формы резонатора. В цилиндрическом СВЧ-резонаторе наблюдается поляризационное вырождение собственных значений. Небольшая овальность резонатора приводит к устранению этого вырождения и появлению дополнительных пиков. На рис. 4 хорошо видно, что при введении в резонатор тонкого проводника дополнительные пики для мод TE111 и TE113 полностью исчезают, тогда как основные максимумы почти не изменяются. Этот проводник не влияет на моду TE112, так как в этой точке электрическое поле моды TE112 для двух поляризаций равно нулю. Таким образом, использование дополнительных проводников достаточно эффективно для устранения возбуждения нежелательных мод.

Другой особенностью спектра на рис. 4 является то, что мода TE111 обладает наибольшей добротностью, которая равна  $550 \pm 10$ . Добротность мод TE112 и TE113 не превышает 150 [28]. При длине резонатора 280 мм в диапазоне частот до 1.5 ГГц возбуждается только TE111-мода. Уменьшение длины резонатора также увеличивает отношение объема исследуемого объекта к объему резонатора, что согласно (1) и (2) повышает чувствительность измерений. Дальнейшие измерения проводились при минимальной длине резонатора 280 мм

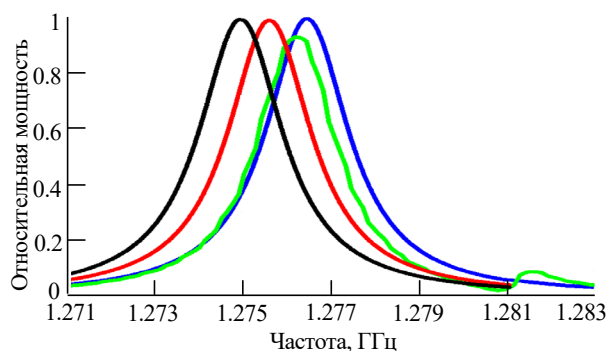


Рис. 5. Спектр моды TE111 для пустого резонатора с дополнительным поперечным проводником (синяя кривая), для пустого резонатора без дополнительного поперечного проводника (зеленая кривая), для резонатора с фторопластовым брусом (красная кривая) и для резонатора с кварцевой трубкой (черная кривая)

Fig. 5. Spectra of the TE111 mode for the empty microwave cavity resonator with an additional transverse conductor (blue curve), for the cavity without an additional transverse conductor (green curve), for the cavity with a PTFE bar (red curve) and for the cavity with a quartz tube (black curve)

(при дальнейшем уменьшении длины возникает опасность замыкания плазменной струи на возбуждающую или приемную антенну). Простота настройки рабочих мод в нужной полосе частот путем перемещения его оснований объясняет использование TE-мод.

В качестве тестовых объектов были использованы фторопластовый брусок шириной 8 мм и толщиной 3 мм, а также кварцевая трубка с внешним диаметром 7 мм и толщиной стенки 1 мм. На рис. 5 представлены спектры TE111-моды для цилиндрического резонатора длиной 280 мм. Синяя кривая соответствует пустому резонатору с дополнительным поперечным проводником. Пустому резонатору без дополнительного поперечного проводника соответствует зеленая кривая, которая иллюстрирует эффект выравнивания спектра TE111-моды. Остальные две кривые соответствуют резонаторам с вставленными внутрь на одинаковую длину 75 мм фторопластовым брусом (красная кривая) и кварцевой трубкой (черная кривая). По сдвигу собственной частоты согласно (1) можно определить диэлектрическую проницаемость фторопластового бруска и кварцевой трубки, которая получается равной 2.2 и 3.6 соответственно. Полученные значения вполне удовлетворительно согласуются с известными данными для этих материалов.

#### Анализ плазменных струй барьерного

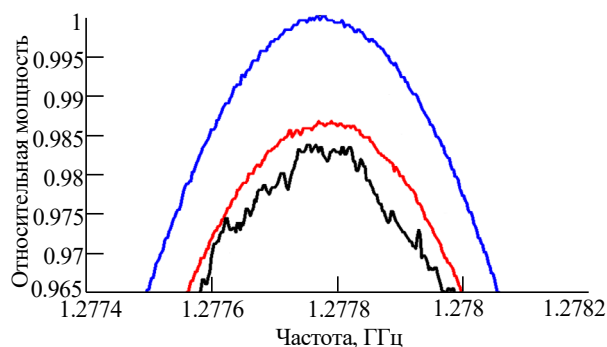


Рис. 6. Спектр моды TE111 для резонатора без плазменной струи (синяя кривая), с плазменной струей в потоке гелия (красная кривая) и с плазменной струей в потоке аргона (черная кривая)

Fig. 6. Spectra of the TE111 mode for the microwave cavity without a plasma jet (blue curve), with a helium dielectric barrier discharge plasma jet (red curve) and with an argon dielectric barrier discharge plasma jet (black curve)

разряда в потоке гелия и аргона. Измерения плазменных струй осуществлялись в цилиндрическом резонаторе длиной 280 мм, в котором возбуждалась TE111-мода.

На рис. 6 представлены спектры TE111-моды для резонатора без плазменной струи (синяя кривая), а также с плазменной струей барьерного разряда в потоках гелия (красная кривая) и аргона (черная кривая) при питании разряда от источника частотой 160 кГц и амплитудой 3 кВ без модуляции. На выходе разрядной ячейки формировались плазменные струи, видимая область которых была длиной около 30 мм и диаметром около 3 мм. Как можно видеть из рис. 6, при зажигании плазменных струй (красная и черная кривая) добротность уменьшается существенно, тогда как заметного сдвига частоты для обоих случаев не наблюдается. Это не позволяет одновременно определить электронную концентрацию плазмы и частоту соударений электронов. Очень малое значение частотного сдвига является следствием того, что частота соударения электронов для атмосферной плазмы на три порядка выше частоты зондирующего сигнала. В этом случае можно определить только среднее по объему значение проводимости анализируемой области плазмы, а концентрацию электронов можно вычислить с использованием дополнительных данных из литературы для значения частоты соударения электронов, которая зависит от давления и типа газа, но почти не зависит от электронной концентра-



ции газоразрядной плазмы [31]. В представленных на рис. 6 случаях значение средней проводимости для плазменной струи в потоке гелия составляло примерно 15 мСм/м, а для плазменной струи в потоке аргона около 25 мСм/м.

Когда изменение частоты в эксперименте не регистрируется, анализатор спектра можно перевести в режим измерения одной частоты (zero span mode). В этом режиме анализатор спектра будет регистрировать временную зависимость сигнала на выбранной частоте (в максимуме), а минимальное время сканирования уменьшится с 10 мс до 20 мкс. Такая временная зависимость напрямую связана с изменением добротности соответствующей моды и средней проводимостью исследуемой плазмы. Время сканирования зависимостей на рис. 6 составляло 10 мс.

Поскольку частота источника питания была довольно высокой (160 кГц), плазма отдельных пробоев барьерного разряда не успевала релаксировать до возникновения следующих. Этот факт хорошо иллюстрируется на рис. 6. Если бы частота источника питания была значительно меньше, то время между отдельными пробоями было бы больше. Это привело бы к тому, что красная и черная кривые в окрестности максимумов имели бы большое количество отдельных импульсов, синхронных с импульсами тока в моменты возникновения отдельных пробоев барьерного разряда (как это ранее наблюдалось в [28] при питании от высоковольтного источника частотой 50 кГц). Также из рис. 6 можно сделать вывод о том, что плазменная струя в потоке гелия имела более стабильный характер горения, чем плазменная струя в потоке аргона.

Для изучения динамических процессов в плазменных струях анализатор спектра был настроен на режим измерения одной частоты, а питание разрядной ячейки осуществлялось от импульсно-модулированного источника с частотой 160 кГц. Использование такого источника позволило определить зависимость средней проводимости плазменной струй от времени в моменты включения и выключения питающего напряжения.

На рис. 7 и 8 представлены временные зависимости мощности TE<sub>111</sub>-моды в моменты выключения напряжения питания для плазменной струи барьерного разряда в потоках гелия

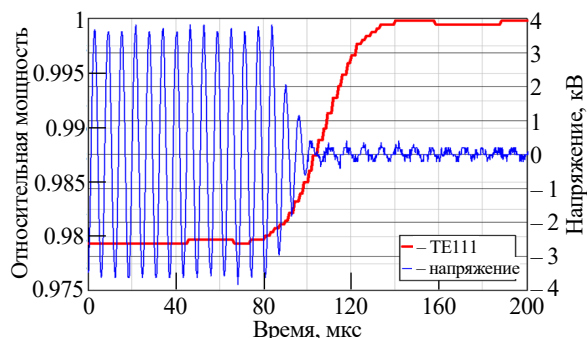


Рис. 7. Временная зависимость мощности TE<sub>111</sub>-моды (красная кривая) при выключении питающего напряжения (синяя кривая) для плазменной струи в потоке гелия

Fig. 7. Time dependence of the TE<sub>111</sub> mode power (red curve) for a helium barrier discharge plasma jet powered by the pulse modulated voltage (blue curve)

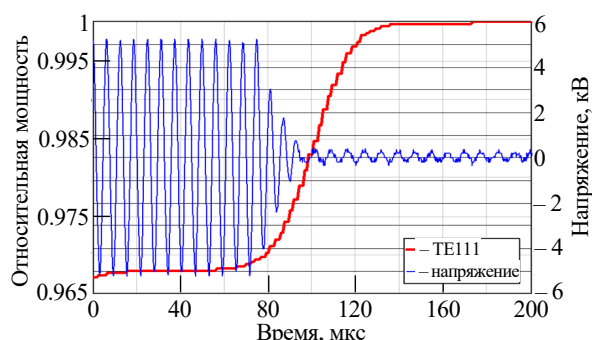


Рис. 8. Временная зависимость мощности TE<sub>111</sub>-моды (красная кривая) при выключении питающего напряжения (синяя кривая) для плазменной струи в потоке аргона

Fig. 8. Time dependence of the TE<sub>111</sub> mode power (red curve) for an argon barrier discharge plasma jet powered by the pulse modulated voltage (blue curve)

(рис. 7) и аргона (рис. 8) с соответствующими синхронно снятыми зависимостями напряжения на разрядной ячейке. Причина довольно медленного (за несколько циклов) убывания напряжения питания объясняется использованием в высоковольтном источнике резонансного трансформатора. Из представленных на рис. 7 и 8 зависимостей мощности TE<sub>111</sub>-моды видно, что до момента выключения высоковольтного источника наблюдаются лишь небольшие случайные их изменения в течение одного периода напряжения питания. Этот факт указывает на то, что добротность также не меняется в течение одного периода напряжения питания. Путем использования выражений (2), (4)–(6) можно определить среднюю проводимость плазменных струй, длина которых составляет 30 мм и диаметр 3 мм. Для случаев на рис. 7 и 8 значения средней проводимости для плазменных струй в потоке гелия и аргона составляют, соответ-

ственно, 27 и 45 мСм/м. После начала убывания питающего напряжения средняя проводимость также уменьшается (соответствует возрастанию красных зависимостей на рис. 7 и 8), однако для обоих случаев плазменных струй ее убывание существенно медленнее уменьшения осцилляций напряжения питания. После исчезновения разряда наблюдаются лишь случайные изменения временных зависимостей TE111-моды, но эти случайные изменения не превышают нескольких процентов от полной их вариации от момента начала убывания напряжения на разрядной ячейке до полного прекращения разряда. Такая высокая чувствительность может позволить выполнить оценку зависимости проводимости плазменной струи от ее длины путем постепенного продвижения в резонатор.

**Заключение.** Описанная система СВЧ-диагностики в цилиндрическом резонаторе позволяет измерять среднюю проводимость холодных стационарных и нестационарных плазменных струй. Благодаря использованию TE111-моды и дополнительного проводника, препятствующего возбуждению нежелательных мод, удалось добиться низкого уровня шумов измеряемого сигнала (несколько процентов). Для многих приложений знание одной только

проводимости может быть вполне достаточным. Так, например, при нетермической обработке различных термочувствительных поверхностей контроль проводимости может быть необходим для предотвращения неконтролируемого увеличения тока разряда и последующего резкого повышения температуры. При необходимости определения электронной концентрации и ее распределения вдоль плазменной струи можно воспользоваться известными из литературы данными для эффективной частоты соударения электронов, которая зависит от давления и типа газа, но почти не зависит от электронной концентрации плазмы. Однако такой подход является очень приближенным, поскольку в атмосферной плазменной струе выдуваемый газ смешивается с атмосферным воздухом с разной пропорцией в разных областях струи. Для одновременного определения электронной концентрации и частоты соударения электронов необходимо еще больше повышать чувствительность измерительной системы. Предварительные оценки показывают, что для используемой TE111-моды ожидаемый сдвиг частоты при зажигании описанных плазменных струй барьерного разряда в потоке гелия и аргона будет менее 1 кГц.

#### Авторский вклад

**Александр Михайлович Астафьев** – общая постановка задачи, построение аналитической модели.

**Александр Моисеевич Альтмарк** – обработка экспериментальных данных.

**Никита Андреевич Лесив** – проведение экспериментов.

**Александр Сергеевич Чирцов** – формирование общей структуры статьи и ее редакция.

#### Author's contribution

**Aleksandr M. Astafiev**, general formulation of the problem, construction of an analytical model.

**Aleksandr M. Altmark**, processing of experimental data.

**Nikita A. Lesiv**, conducting experiments.

**Alexander S. Chirtsov**, formation of the general structure of the article and its editing.

#### Список литературы

1. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate to Improving Hydrophilicity Using Atmospheric Pressure Plasma Jet / Z. Fang, J. Yang, Y. Liu, T. Shao, C. Zhang // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41, № 6. P. 1627–1634. doi: 10.1109/TPS.2013.2259508

2. Ohkubo Y., Endo K., Yamamura K. Adhesive-free adhesion between heat-assisted plasma-treated fluoropolymers (PTFE, PFA) and plasma-jet-treated polydimethylsiloxane (PDMS) and its application // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, № 18058. P. 1–11. doi: 10.1038/s41598-018-36469-y

3. Fang Z., Yang H., Qiu Y. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate Films Using a Microsecond Pulse Homogeneous Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, № 7. P. 1615–1623. doi: 10.1109/TPS.2010.2048342

4. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications / G. Y. Park, S. J. Park, M. Y. Choi, I. G. Koo, J. H. Byun, J. W. Hong, J. Y. Sim, G. J. Collins, J. K. Lee // Plasma Sources Science and Technology. 2012. Vol. 21, № 4. P. 043001. doi: 10.1088/0963-0252/21/4/043001

5. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Chichester: John Wiley & Sons Limited, 2013. 526 p.
6. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions // Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24, № 6. P. 064001. doi: 10.1088/0963-0252/24/6/064001
7. Shashurin A., Keidar M. Experimental approaches for studying non-equilibrium atmospheric plasma jets // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, № 12. P. 122002. doi: 10.1063/1.4933365
8. Balcon N., Aanesland A., Boswell R. Pulsed RF Discharges, Glow and Filamentary Mode at Atmospheric Pressure in Argon // Plasma Sources Sci. Technol. 2007. Vol. 16, № 2. P. 217–225. doi: 10.1088/0963-0252/16/2/002
9. Pai D., Lacoste D., Laux C. Nanosecond repetitively pulsed discharge in air at atmospheric pressure – spark regime // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19, № 6. P. 065015. doi: 10.1088/0963-0252/19/6/065015
10. Rajendra Shrestha Dr., Reeta Shilpakar Er., Deepak Prasad Subedi Dr. Measurement of Electron Density in Atmospheric Pressure Cold Argon Plasma Jet // Intern. J. of Recent Research and Review. 2019. Vol. XII, iss. 2. P. 27–33.
11. Marshall K. A., Hieftje G. M. Measurement of true gas kinetic temperatures in an inductively coupled plasma by laser-light scattering // Plenary lecture J. of Analytical Atomic Spectrometry. 1987. Iss. 6. P. 567–571. doi: 10.1039/JA9870200567
12. Measurement of electron temperature and density in an argon microdischarge by laser Thomson scattering / S. G. Belostotskiy, R. Khandelwal, Q. Wang, V. M. Donnelly, D. J. Economou, N. Sadeghi // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92, iss. 22. P. 221507. doi: 10.1063/1.2939437
13. Laser scattering on an atmospheric pressure plasma jet: disentangling Rayleigh, Raman and Thomson scattering / A. F. H. van Gessel, E. A. D. Carbone, P. J. Bruggeman, J. J. A. M. van der Mullen // Plasma Sources Science and Technology. 2012. Vol. 21, № 1. P. 015003. doi: 10.1088/0963-0252/21/1/015003
14. Atmospheric pressure cold argon/oxygen plasma jet assisted by preionization by syringe needle electrode / M. Qian, C. Ren, D. Wang, Y. Feng and J. Zhang // 2012 Abstracts IEEE Intern. Conf. on Plasma Science. Edinburgh, UK, 08–13 July 2012. IEEE, 2012. P. 5B-9–5B-9. doi: 10.1109/PLASMA.2012.6383989
15. Qiuping Zhou, Cheng Cheng, Yuedong Meng. Electron Density and Temperature Measurement by Stark Broadening in a Cold Argon Arc-Plasma Jet at Atmospheric Pressure // Plasma Science and Technology. 2009. Vol. 11, № 5. P. 560. doi: 10.1088/1009-0630/11/5/09
16. Electron density measurement in atmospheric pressure plasma jets: Stark broadening of hydrogenated and non-hydrogenated lines / A. Yu. Nikiforov, Ch. Leys, M. A. Gonzalez, J. L. Walsh // Plasma Sources Science and Technology. 2015. Vol. 24, № 3. P. 034001. doi: 10.1088/0963-0252/24/3/034001
17. Shneider M. N., Miles R. B. Microwave diagnostics of small plasma objects // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98, iss. 3. Art. № 033301. doi: 10.1063/1.1996835
18. Counting the electrons in a multiphoton ionization by elastic scattering of microwaves / A. Sharma, M. N. Slipchenko, M. N. Shneider, X. Wang, K. A. Rahman, A. Shashurin // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Art. № 2874. doi: 10.1038/s41598-018-21234-y
19. Time-Resolved Measurements of Electron Density in Nanosecond Pulsed Plasmas Using Microwave Scattering / X. Wang, P. Stockett, R. Jagannath, S. Bane and A. Shashurin // Plasma Source Sci. Technol. 2018. Vol. 27, № 7. Art. № 07LT02. doi: 10.1088/1361-6595/aacc06
20. Thomson microwave scattering for electron number density diagnostics of miniature plasmas at low pressure / Xingxing Wang, Apoorv Ranjan, M. N. Shneider, A. Shashurin; American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Dallas, Texas, 17–21 June 2019. doi: 10.2514/6.2019-3250
21. Wang X., Shashurin A. Study of atmospheric pressure plasma jet parameters generated by DC voltage driven cold plasma source // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122, iss. 6. Art. № 063301. doi: 10.1063/1.4986636
22. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York: Dover Publication, 1975.
23. Gordy W., Smith W. V., Trambarulo R. F. Microwave spectroscopy. New York: John Wiley & Sons, 1953. 446 p.
24. Dielectric microwave resonators in TE<sub>011</sub> cavities for electron paramagnetic resonance spectroscopy / R. R. Mett, J. W. Sidabras, I. S. Golovina, J. S. Hyde // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79, iss. 9. Art. № 094702. doi: 10.1063/1.2976033
25. EUV-Induced Plasma: A Peculiar Phenomenon of a Modern Lithographic Technology / J. Beckers, T. van de Ven, R. van der Horst, D. Astakhov, V. Bannine // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, iss. 14. Art. № 2827. doi: 10.3390/app9142827
26. Agdur B., Enander B. Resonances of a Microwave Cavity Partially Filled with a Plasma // J. of Applied Physics. 1962. Vol. 33, iss. 2. P. 575–581. doi: 10.1063/1.1702469
27. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York: Dover Publication, 1975. 720 p.
28. The Possibility of Measuring Electron Density of Plasma at Atmospheric Pressure by a Microwave Cavity Resonance Spectroscopy / J. Li, A. M. Astafiev, A. A. Kudryavtsev, C. Yuan, Z. Zhou, X. Wang // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. Vol. 49, iss. 3. P. 1001–1008. doi: 10.1109/TPS.2021.3050110
29. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.
30. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 110 с.
31. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics. New York: Springer-Verlag, 1991. 449 p.

32. Ginzburg V. L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas. Oxford: Pergamon Press, 1970. 615 p.

33. Pozar D. M. Microwave Engineering. 3rd ed. Danvers: John Wiley & Sons Inc., 2005. 700 p.

### Информация об авторах

**Астафьев Александр Михайлович** – кандидат физико-математических наук (2017), доцент (2020) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 80 научных работ. Сфера научных интересов – физика газового разряда; радиофизика; физика волновых процессов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [astafev-aleksandr@yandex.ru](mailto:astafev-aleksandr@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-7387-097X>

**Альтмарк Александр Моисеевич** – кандидат физико-математических наук (2005), доцент (2005) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – акустика; физика волновых процессов; физика газового разряда.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [alexaltmark@gmail.com](mailto:alexaltmark@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-1912-7573>

**Лесив Никита Андреевич** – магистр (2018), ассистент (2021) кафедры физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – физика волновых процессов; физика газового разряда.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [nick.lesiv@yandex.ru](mailto:nick.lesiv@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

**Чирцов Александр Сергеевич** – доктор физико-математических наук (2014), заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 120 научных работ. Сфера научных интересов – фотоника; физика газового разряда.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: [alex\\_chirtsov@mail.ru](mailto:alex_chirtsov@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-7703-5469>

### References

1. Fang Z., Yang J., Liu Y., Shao T., Zhang C. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate to Improving Hydrophilicity Using Atmospheric Pressure Plasma Jet. IEEE Transactions on Plasma Science. 2013, vol. 41, no. 6, pp. 1627–1634. doi: 10.1109/TPS.2013.2259508

2. Ohkubo Y., Endo K., Yamamura K. Adhesive-free Adhesion between Heat-Assisted Plasma-Treated Fluoropolymers (PTFE, PFA) and Plasma-Jet-Treated Polydimethylsiloxane (PDMS) and Its Application. Scientific Reports. 2018, vol. 8, art. num. 18058, pp. 1–11. doi: 10.1038/s41598-018-36469-y

3. Fang Z., Yang H., Qiu Y. Surface Treatment of Polyethylene Terephthalate Films Using a Microsecond Pulse Homogeneous Dielectric Barrier Discharges in Atmospheric Air. IEEE Transactions on Plasma Science. 2010, vol. 38, no. 7, pp. 1615–1623. doi: 10.1109/TPS.2010.2048342

4. Park G. Y., Park S. J., Choi M. Y., Koo I. G., Byun J. H., Hong J. W., Sim J. Y., Collins G. J., Lee J. K. Atmospheric-Pressure Plasma Sources for Biomedical Applications. Plasma Sources Science and Technology. 2012, vol. 21, no. 4, p. 043001. doi: 10.1088/0963-0252/21/4/043001

5. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Chichester, John Wiley & Sons Limited, 2013, 526 p.

6. Winter J., Brandenburg R., Weltmann K.-D. Atmospheric Pressure Plasma Jets: an Overview of Devices and New Directions. Plasma Sources Science and Technology. 2015, vol. 24, no. 6, p. 064001. doi: 10.1088/0963-0252/24/6/064001

7. Shashurin A., Keidar M. Experimental Approaches for Studying Non-Equilibrium Atmospheric Plasma Jets. Phys. Plasmas. 2015, vol. 22, no. 12, p. 122002. doi: 10.1063/1.4933365

8. Balcon N., Aanesland A., Boswell R. Pulsed RF Discharges, Glow and Filamentary Mode at Atmospheric Pressure in Argon. Plasma Sources Sci. Technol. 2007, vol. 16, no. 2, pp. 217–225. doi: 10.1088/0963-0252/16/2/002

9. Pai D., Lacoste D., Laux C. Nanosecond Repetively Pulsed Discharge in Air at Atmospheric Pressure – Spark Regime. Plasma Sources Sci. Technol. 2010, vol. 19, no. 6, art. num. 065015. doi: 10.1088/0963-0252/19/6/065015

10. Rajendra Shrestha Dr., Reeta Shilpakar Er., Deepak Prasad Subedi Dr. Measurement of Electron

Диагностика атмосферных плазменных струй барьерного разряда в потоке аргона и гелия ж

в цилиндрическом СВЧ-резонаторе

Diagnostics of Atmospheric Plasma Jets of Helium and Argon Barrier Discharge  
in a Cylindrical Microwave Cavity Resonator

Density in Atmospheric Pressure Cold Argon Plasma Jet. Intern. J. of Recent Research and Review. 2019, vol. XII, iss. 2, pp. 27–33.

11. Marshall K. A., Hieftje G. M. Measurement of True Gas Kinetic Temperatures in an Inductively Coupled Plasma by Laser-Light Scattering. Plenary Lecture J. of Analytical Atomic Spectrometry. 1987, iss. 6, pp. 567–571. doi: 10.1039/JA9870200567

12. Belostotskiy S. G., Khandelwal R., Wang Q., Donnelly V. M., Economou D. J., Sadeghi N. Measurement of Electron Temperature and Density in an Argon Microdischarge by Laser Thomson Scattering. Applied Physics Letters. 2008, vol. 92, iss. 22, p. 221507. doi: 10.1063/1.2939437

13. Gessel A. F. H., Carbone E. A. D., Bruggeman P. J., van der Mullen J. J. A. M. Laser Scattering on an Atmospheric Pressure Plasma Jet: Disentangling Rayleigh, Raman and Thomson Scattering. Plasma Sources Science and Technology. 2012, vol. 21, no. 1, p. 015003. doi: 10.1088/0963-0252/21/1/015003

14. Qian M., Ren C., Wang D., Feng Y., Zhang J. Atmospheric Pressure Cold Argon/Oxygen Plasma Jet Assisted by Preionization by Syringe Needle Electrode. 2012 Abstracts IEEE Intern. Conf. on Plasma Science. Edinburgh, UK, 08–13 July 2012. IEEE, 2012, pp. 5B-9–5B-9. doi: 10.1109/PLASMA.2012.6383989

15. Qiuping Zhou, Cheng Cheng, Yuedong Meng. Electron Density and Temperature Measurement by Stark Broadening in a Cold Argon Arc-Plasma Jet at Atmospheric Pressure. Plasma Science and Technology. 2009, vol. 11, no. 5, p. 560. doi: 10.1088/1009-0630/11/5/09

16. Nikiforov A. Yu., Leys Ch., Gonzalez M. A., Walsh J. L. Electron Density Measurement in Atmospheric Pressure Plasma Jets: Stark Broadening of Hydrogenated and Non-Hydrogenated Lines. Plasma Sources Science and Technology. 2015, vol. 24, no. 3, p. 034001. doi: 10.1088/0963-0252/24/3/034001

17. Shneider M. N., Miles R. B. Microwave Diagnostics of Small Plasma Objects. J. Appl. Phys. 2005, vol. 98, iss. 3, p. 033301. doi: 10.1063/1.1996835

18. Sharma A., Slipchenko M. N., Shneider M. N., Wang X., Rahman K. A., Shashurin A. Counting the Electrons in a Multiphoton Ionization by Elastic Scattering of Microwaves. Scientific Reports. 2018, vol. 8, art. num. 2874. doi: 10.1038/s41598-018-21234-y

19. Wang X., Stockett P., Jagannath R., Bane S., Shashurin A. Time-Resolved Measurements of Electron Density in Nanosecond Pulsed Plasmas Using Microwave Scattering. Plasma Source Sci. Technol. 2018, vol. 27, no. 7, art. num. 07LT02. doi: 10.1088/1361-6595/aacc06

20. Xingxing Wang, Apoorv Ranjan, Shneider M. N., Shashurin A. Thomson Microwave Scattering for Electron Number Density Diagnostics of Miniature Plasmas at Low Pressure. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Dallas, Texas, 17–21 June 2019. doi: 10.2514/6.2019-3250

21. Wang X., Shashurin A. Study of Atmospheric Pressure Plasma Jet Parameters Generated by DC Voltage Driven Cold Plasma Source. J. Appl. Phys. 2017, vol. 122, iss. 6, art. num. 063301. doi: 10.1063/1.4986636

22. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York, Dover Publication, 1975.

23. Gordy W., Smith W. V., Trambarulo R. F. Microwave spectroscopy. New York, John Wiley & Sons, 1953, 446 p.

24. Mett R. R., Sidabras J. W., Golovina I. S., Hyde J. S. Dielectric Microwave Resonators in TE<sub>011</sub> Cavities for Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy. Review of Scientific Instruments. 2008, vol. 79, iss. 9, art. num. 094702. doi: 10.1063/1.2976033

25. Beckers J., van de Ven T., van der Horst R., Astakhov D., Banine V. EUV-Induced Plasma: A Peculiar Phenomenon of a Modern Lithographic Technology. Appl. Sci. 2019, vol. 9, iss. 14, art. num. 2827. doi: 10.3390/app9142827

26. Agdur B., Enander B. Resonances of a Microwave Cavity Partially Filled with a Plasma. J. of Applied Physics. 1962, vol. 33, iss. 2, pp. 575–581. doi: 10.1063/1.1702469

27. Townes C. H., Schawlow A. L. Microwave Spectroscopy. New York, Dover Publication, 1975, 720 p.

28. Li J., Astafiev A. M., Kudryavtsev A. A., Yuan C., Zhou Z., Wang X. The Possibility of Measuring Electron Density of Plasma at Atmospheric Pressure by a Microwave Cavity Resonance Spectroscopy. IEEE Transactions on Plasma Science. 2021, vol. 49, iss. 3, pp. 1001–1008. doi: 10.1109/TPS.2021.3050110

29. Brandt A. A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Investigation of dielectrics at microwave frequencies]. Moscow, *Phyzzmatgiz*, 1963, 404 p. (In Russ.)

30. Golant V. E. *Sverkhvysokochastotnye metody issledovaniya plazmy* [Microwave Methods for Plasma Research]. Moscow, *Nauka*, 1968, 110 p.

31. Raizer Y. P. Gas Discharge Physics. New York, Springer-Verlag, 1991, 449 p.

32. Ginzburg V. L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas. Oxford, Pergamon Press, 1970, 615 p.

33. Pozar D. M. Microwave Engineering. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 2005, 700 p.

#### Information about the authors

**Aleksandr M. Astafiev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2017), Associate Professor (2020) at the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 80 scientific publications. Area of expertise: gas discharge physics; radiophysics; physics of wave processes.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [astafev-aleksandr@yandex.ru](mailto:astafev-aleksandr@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-7387-097X>



**Aleksandr M. Altmark**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2005), Associate Professor (2005) at the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: acoustics; physics of wave processes; gas discharge physics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [alexaltmark@gmail.com](mailto:alexaltmark@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-1912-7573>

**Nikita A. Lesiv**, Master's Degree (2018), Assistant (2021) of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: acoustics; physics of wave processes; gas discharge physics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [nick.lesiv@yandex.ru](mailto:nick.lesiv@yandex.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

**Alexander S. Chirtsov**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2014), Head of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 120 scientific publications. Area of expertise: photonics; gas discharge physics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: [alex\\_chirtsov@mail.ru](mailto:alex_chirtsov@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-3498-8198>

---