

УДК 533.9.03
EDN: BESPPD

PACS: 52.80.-s

**Генерация плазменных струй умеренной температуры
на основе поперечного СВЧ-разряда в волноводе***С. Н. Антипов, М. Х. Гаджиев, Д. В. Терешонок, С. А. Горбатов,
И. А. Иванов, В. Н. Тихонов, А. В. Тихонов, А. Г. Абрамов, А. В. Угрюмов*

Проведено исследование плазменных струй, полученных на основе безэлектродного СВЧ-разряда атмосферного давления в потоке газа, направленном перпендикулярно вектору напряженности электрического поля (поперечная конфигурация). Разряд возбуждался в диэлектрической трубке с внутренним диаметром 6 мм в волноводном устройстве с помощью СВЧ-генератора на базе типового 1 кВт магнетрона, работающего на частоте 2,45 ГГц. Представлено описание конструкции газоразрядного волноводного устройства и результаты измерений пространственного распределения температуры газа в аргоновой плазменной струе методами термопар и оптической термографии. Показано, что максимальная температура газа в струе зависит от скорости потока и может быть понижена до значений 180–200 градусов Цельсия при скоростях потока 20–30 л/мин на расстояниях 2–3 см от выходного отверстия устройства. При этом наблюдается ламинарный режим истечения плазменной струи в окружающий воздух. Результаты работы востребованы в области разработки новых источников неравновесной плазмы для технологий плазменной модификации поверхности различных материалов.

Ключевые слова: СВЧ-генератор, СВЧ-разряд, плазменная струя, термография, термопара, ламинарный поток, плазменная модификация.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-5-11

Введение

В последние десятилетия начались интенсивные разработки плазмохимических методов модифицирования поверхностей материалов, в том числе таких нетермостойких материалов, как синтетические и природные

полимеры. Используемая для этих целей неравновесная плазма является генератором целого ряда активных агентов, основным из которых являются ускоренные заряженные частицы, фотоны света и нейтральные активные частицы (ионы, радикалы, возбужденные молекулы).

Антипов Сергей Николаевич¹, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: antipov@ihed.ras.ru

Гаджиев Махач Хайрудинович¹, зав. лабораторией, к.ф.-м.н.**Терешонок Дмитрий Викторович**¹, с.н.с., к.ф.-м.н.**Горбатов Сергей Андреевич**², н.с.**Иванов Игорь Анатольевич**², н.с.**Тихонов Виктор Николаевич**², н.с.**Тихонов Александр Викторович**², м.н.с.**Абрамов Артем Григорьевич**³, руководитель направления, к.х.н.**Угрюмов Александр Валерьевич**³, старший вице-президент по научно-технической деятельности, к.т.н.¹ Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии.

Россия, 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км.

³ Акционерное общество «ТВЭЛ».

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 49.

Статья поступила в редакцию 07 ноября 2022 г.

© Антипов С. Н., Гаджиев М. Х., Терешонок Д. В., Горбатов С. А., Иванов И. А., Тихонов В. Н., Тихонов А. В., Абрамов А. Г., Угрюмов А. В., 2022

Воздействие неравновесной плазмы на поверхность имеет комплексный характер и выбирая параметры обработки, можно проводить такие процессы, как плазменная очистка, плазменная активация поверхности, плазменное осаждение и плазменное травление. Связанная с этим модификация поверхности материалов имеет весьма широкую гамму технологических приложений.

Для целей плазменной модификации широко исследуются холодные плазменные струи атмосферного давления с температурой газа в несколько десятков градусов Цельсия [1–9]. Так, например, наибольшее распространение получило, так называемое, «плазменное перо» («plasma plume» в англоязычной литературе), представляющие собой электродный разряд в потоке газа в устройствах с узкой выходной диафрагмой (~1 мм) [3–9]. Температура струй типа «плазменного пера» (название обусловлено формой струи) может быть понижена вплоть до комнатной, что позволяет использовать их в медико-биологических приложениях [3–5]. В целом, такие струи характеризуются малой интенсивностью факторов воздействия на обрабатываемые объекты.

Основной особенностью плазмы СВЧ-разрядов является ее существенная неравновесность даже при высоких давлениях. Использование газовых разрядов при давлении около атмосферного обеспечивает дополнительное преимущество, заключающееся в отсутствии необходимости в каком-либо дорогом и сложном оборудовании для поддержания вакуума. Однако при атмосферном давлении СВЧ-плазмотрон на волне H_{10} «классической» безэлектродной конструкции формирует плазменную струю с температурой до нескольких тысяч градусов [10].

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей генерации и температурная диагностика плазменных струй на основе безэлектродного СВЧ-разряда атмосферного давления, возбуждаемого в поперечном потоке газа в диэлектрической трубке, пересекающей волновод перпендикулярно

вектору напряженности электрического поля E , т. е., так называемого, поперечного СВЧ-разряда. Достоинством плазменных струй на основе СВЧ-разряда в такой конфигурации является более высокая, по сравнению с холодными плазменными струями, концентрация плазмы и химически активных частиц при сравнительно невысокой (умеренной) температуре газа – порядка двух-трех сотен градусов Цельсия, что, в ряде случаев, не приводит к термической деструкции обрабатываемых объектов.

Микроволновый источник плазменных струй

В качестве источника электромагнитной энергии с частотой 2,45 ГГц использовался СВЧ-генератор на базе типового 1 кВт магнетрона с волноводным трактом сечением 96 на 46 мм [11]. Присоединяемое к СВЧ-генератору устройство для возбуждения безэлектродного поперечного СВЧ-разряда атмосферного давления в диэлектрических трубках малого диаметра представляет собой диафрагмированный в начале и короткозамкнутый (КЗ) на конце отрезок прямоугольного волновода, работающего на основном типе колебаний H_{10} . Длина отрезка выбрана близкой к резонансной, т. е. кратной четному числу четвертей длин волн в данном волноводе. В ближайшей к КЗ пучности поля поперек волновода размещена разрядная трубка так, что её ось перпендикулярна вектору электрического поля. В этой зоне высота волновода уменьшена для повышения напряженности E -поля. В качестве материала разрядной трубки могут быть использованы кварц, керамика и стекло. На рис. 1а представлен прототип устройства с разрядом в струе аргона в стеклянной трубке. Для точной подстройки резонансных свойств отрезка волновода, в нем размещен четвертьволновой диэлектрический трансформатор из тефлона с возможностью его перемещения вдоль продольной оси волновода.

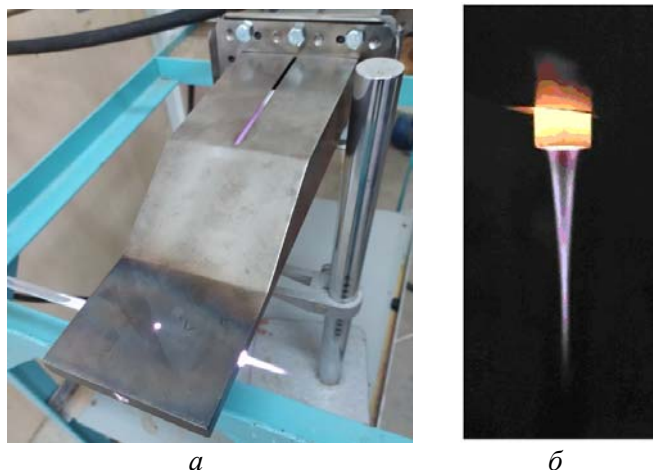


Рис. 1. Микроволновый источник плазменных струй умеренной температуры на основе поперечного СВЧ-разряда в волноводе (а). Аргоновая плазменная струя на выходе из керамической трубки (б)

Конструкция устройства рассчитывалась исходя из длины резонансной части, равной двум длинам волн, то есть с четырьмя максимумами стоячей волны электрического поля. При этом первые от диафрагмы два максимума располагаются на отрезке волновода постоянного сечения и не ограничивают возможности перемещения подстроечного диэлектрического трансформатора. В результате оптимизации были получены следующие значения основных геометрических параметров устройства для случая использования питающего прямоугольного волновода с внутренним сечением 96 на 46 мм в качестве основного:

- общая длина резонатора от диафрагмы до КЗ – 298,5 мм;
- толщина диафрагмы – 6 мм;
- ширина просвета окна диафрагмы – 19 мм;
- высота просвета окна диафрагмы – 46 мм (равняется высоте волновода – чисто индуктивная диафрагма).

При работе устройства между диафрагмой и КЗ наблюдается стоячая ЭМ-волна с четырьмя выраженными максимумами электрического поля. Если диэлектрический четвертьволновый трансформатор расположен в узле стоячей волны по напряжению, он минимально влияет на электрическое поле в нагрузке и на ее входное сопротивление. При смещении трансформатора в сторону той или другой пучности стоячей волны, происходит перестройка комплексного входного сопротивления нагрузки и смещение частоты минимума коэффициента стоячей волны в основном волноводе, то есть наблюдается изменение резонансной частоты устройства.

Конструкция такого подстроечного элемента предельно простая и не содержит ни трущихся электрических контактов, ни металлических деталей вообще. Узкая продольная прорезь посередине широкой стенки волновода позволяет механически изменять положение трансформатора и при этом не вызывает излучения во внешнюю среду, поскольку не производит разрыва линий тока основного типа колебаний на внутренней поверхности волновода. Для безопасного функционирования описываемого устройства в качестве средства защиты магнетронного генератора от отраженной волны использовался циркулятор.

Измерения температуры

Измерения проводились при мощности СВЧ-генератора 600 Вт, в качестве плазмообразующего газа использовался аргон ВЧ высшего сорта (99,993 %).

Исследования пространственного распределения температуры плазменной струи проводилась методами термопар и оптической термографии. В экспериментах в качестве разрядной трубки использовалась кварцевая трубка с внутренним диаметром 6 мм и толщиной стенки 1 мм. Трубка располагалась таким образом, чтобы срез её выходного отверстия совпадал с плоскостью внешней поверхности узкой стенки волновода.

Для измерений распределения температуры вдоль струи на центральной оси трубки использовалась открытая малоинерционная хромель-копелевая термопара ХК (термопара типа L в зарубежной классификации). Термопара представляет собой термоэлектроды

длиной около 30 см в диэлектрической изоляции. Такая длина необходима для удаления свободных концов от плазменной струи и позволяет поддерживать постоянство температуры свободных концов в течение всего периода измерений на уровне комнатной температуры. Температура свободных концов (холодного спая) измерялась дополнительным датчиком температуры – стандартной термопарой К-типа с помощью мультиметра. В качестве электроизмерительного прибора использовался вольтметр В7-78/1. Для снижения наводимых электромагнитных помех, было выполнено экранирование термопары и проводов измерительного вольтметра с помощью ме-

таллической оплетки. Для сохранения малой инерционности кончик горячего спая оставался открытым. Провода вблизи горячего спая были тщательно скручены, поэтому влиянием дополнительной возможной ЭДС вследствие воздействия частиц плазмы пренебрегалось. Измерение температуры проводилось методом компенсации температуры холодного спая с использованием значений ТЭДС для термопары L-типа для различных температур рабочего конца, приведенных в ГОСТ Р 8.585-2001. Рабочий спай термопары помещался в плазменную струю на заданных расстояниях от выходного отверстия трубки. Результаты измерений приведены на рис. 2.

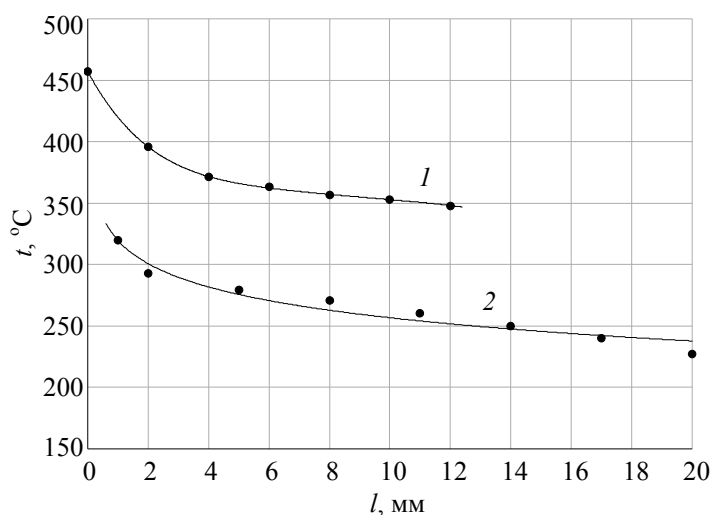


Рис. 2. Распределения температуры плазменной струи по центральной оси разрядной трубки для расходов аргона 15 (1) и 30 (2) л/мин, полученные с помощью термопарных измерений (l – расстояние от стенки волновода)

Изучение распределения температуры газа в поперечном сечении плазменной струи выполнялось методом оптической термографии, заключающимся в измерении распределения температуры на тыльной стороне тонкой металлической мишени, нагреваемой направляемой на нее струей. В работах [12–14] данный метод применялся для диагностики мощных импульсных ионных пучков и сильноточных электронных пучков различной мощности. Достоинством тепловизионной диагностики является ее панорамность, т. е. получение одномоментного распределения температуры по всему сече-

нию струи. В нашей работе для тепловизионных измерений использовался тепловизор Hotfind LX, SDS Infrared; в качестве коллектора струи использовалась алюминиевая фольга толщиной около 10 μm . Измерения проводились для двух значений расхода аргона – 10 и 20 л/мин, на расстоянии 20 и 30 мм от стенки волновода. Типичные термограммы теплового пятна на тыльной стороне фольги представлены на рис. 3. Из термограмм видно, что в поперечном сечении температура струи монотонно спадает от центра к периферии – распределение имеет колокообразный характер.

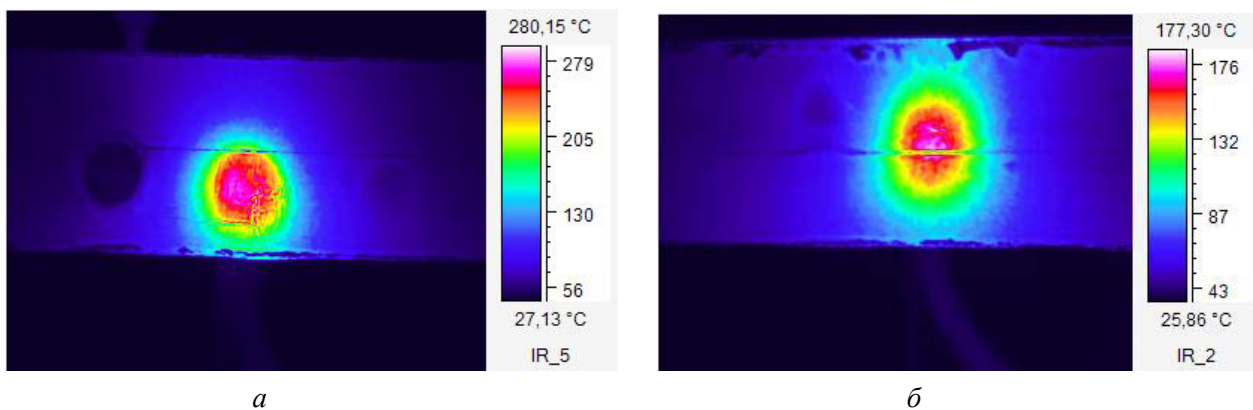


Рис. 3. Тепловизионные термограммы внешней поверхности алюминиевой фольги в поперечном сечении плазменной струи: а – при расходе аргона 10 л/мин на расстоянии 20 мм от стенки волновода; б – при расходе 20 л/мин на расстоянии 30 мм

Полученные распределения температуры газа показывают, что максимальная температура в генерируемых плазменных струях зависит от скорости потока и может быть понижена до значений 180–200 градусов Цельсия при скоростях потока 20–30 л/мин на расстояниях 2–3 см от выходного отверстия устройства. Такие сравнительно невысокие газовые температуры позволяют проводить плазменную обработку различных материалов, в том числе таких нетермостойких как органические и синтетические полимеры, не вызывая их термическую деструкцию и горение. Это, в свою очередь обуславливает интерес к использованию разработанного микроволнового устройства, например, в технологиях плазменной модификации свойств (активации) твердых дисперсных наполнителей (керамических, металлических или полимерных порошков) для получения современных композиционных материалов.

Расход 10 л/мин при комнатной температуре соответствует массовому расходу $G = 0,27 \times 10^{-3}$ кг/с при плотности $\rho = 1,6$ кг/м³. Оценка нагрева газа в струе на выходе из плазматрона даёт $\Delta T = \eta P / (G \times C_p) \sim 900$ К, где мощность $P = 600$ Вт, η – доля вкладываемой в разряд мощности, которая, на основании оценок потребляемой нагрузкой плазматрона мощности при горящем разряде и без него, составляет не более 20 % ($\eta = 0,2$), теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 500$ Дж/(кг·К). Стоит отметить, что достаточно в большом диапазоне температур теплоемкость аргона C_p остается постоянной величиной, так как газ является атомарным и

нет колебательных уровней, а первые четыре электронных уровня соответствуют энергии около $\sim 11,5$ эВ. При увеличении расхода газа до 20–30 л/мин, ΔT уменьшается до значений $\sim (300\text{--}450)$ К. Таким образом, оценка по нагреву ΔT находится в согласии с результатами измерений температуры плазменной струи по центральной оси (см. рис. 2).

Оценим число Рейнольдса на выходе из трубки как $Re = \rho v D / \mu = 4G / (\pi D \mu)$, где v – средняя скорость истечения, $D = 6$ мм – диаметр трубки, μ – вязкость, которая в исследуемом диапазоне температур не превосходит величины $\mu \sim 0,5 \times 10^{-4}$ Па·с [15]. Таким образом, при расходе 10 л/мин число Рейнольдса составит $Re \sim 600$. Соответственно, увеличение расхода до 30 л/мин приводит к росту Re до ~ 1800 . Кроме того, с увеличением G нагрев газа падает, что ведет к уменьшению вязкости, и, соответственно, росту числа Рейнольдса Re , которое может оказаться близко к критическому значению $Re_{кр} = 2300$, что может вызвать переход к турбулентному режиму истечения газа.

Заключение

Представлен способ генерации плазменных струй на основе поперечного СВЧ-разряда в волноводе. При этом температура газа в такой струе на выходе из плазматрона находится на уровне несколько сотен градусов, что подтверждается термопарными и тепловизионными измерениями профилей температуры. Режим истечения аргона, полученный

на основе оценки числа Рейнольдса, соответствует ламинарному, что также подтверждается визуальным наблюдением.

Полученные плазменные струи представляют практический интерес для технологической плазменной модификации и создания новых материалов со специальными свойствами, таких как, например, полимерные композиционные материалы.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 21-79-30062) и средств
индустриального партнера АО «ТВЭЛ»
(департамент по научно-технической
деятельности неядерных производств).

ЛИТЕРАТУРА

1. Laroussi M., Akan T. // Plasma Processes and Polymers. 2007. Vol. 4. № 9. P. 777.
2. Qian Zhang, Peng Sun, Hongqing Feng, Ruixue Wang, Yongdong Liang, Weidong Zhu, Kurt H. Becker, Jue Zhang, Jing Fang // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 11. № 12. P. 123305.
3. Kolb J. F., Mohamed A.-A. H., Price R. O., Swanson R. J., Bowman A., Chiavarini R. L., Stacey M., Schoen-

- bach K. H. // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. № 24. P. 241501.
4. Won-Seok, KangaYong-Cheol, HongbYoo-Beom, Honga Jae-Ho, Kima Han and Sup Uhm // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205. P. S418.
5. Laroussi M., Lu X. P. // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 87. № 11. P. 113902.
6. Lua X., Xiong Q., Xiong Z., Hu J., Zhou F., Gong W., Xian Y., Zou C., Tang Z., Jiang Z., Pan Y. // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. P. 043304.
7. Longwei Chen, Peng Zhao, Xingsheng Shu, Jie Shen, and Yuedong Menga // Physics of plasmas. 2010. Vol. 17. № 8. P. 083502.
8. Yambe K., Satou S. // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. № 2. P. 023509.
9. Xuechen Li, Jiacun Wu, Boyu Jia, Kaiyue Wu, Pengcheng Kang, Furong Zhang, Na Zhao, Pengying Jia, Long Wang, Shouzhe Li // Applied Physics Letters. 2020. Vol. 117. № 13. P. 134102.
10. Tikhonov V. N., Aleshin S. N., Ivanov I. A., Tikhonov A. V. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 927. P. 012067.
11. Тихонов В. Н., Иванов И. А., Крюков А. Е., Тихонов А. В. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 102.
12. Davis H. A., Bartsch R. R., Olson J. C. et al. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. № 7. P. 3223.
13. Pushkarev A. I., Kholodnaya G. E., Sazonov R. V., Ponomarev D. V. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. № 10. P. 103301.
14. Кузуриду П. П., Озур Г. Е. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 6. С. 132.
15. Macrossan M. N., Lilley C. R. // Phys. Fluids. 2003. Vol. 15. P. 3452.

PACS: 52.80.-s

Generation of moderate temperature plasma jets based on a transverse microwave discharge in a waveguide

*S. N. Antipov¹, M. Kh. Gadzhiev¹, D. V. Tereshonok¹, S. A. Gorbatov², I. A. Ivanov²,
V. N. Tikhonov², A. V. Tikhonov², A. G. Abramov³ and A. V. Ugryumov³*

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: antipov@ihed.ras.ru

² Russian Institute of Radiology and Agroecology
109 km Kievskoe shosse, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russia

³ TVEL JSC
49 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received November 07, 2022

This work is devoted to the study of plasma jets based on an electrodeless atmospheric-pressure microwave discharge in a transverse gas flow perpendicular to the electric field strength vec-

tor. The discharge is excited in a dielectric tube in a waveguide device using a microwave generator based on a typical 1 kW magnetron operating at a frequency of 2.45 GHz. A description of the design of the gas-discharge waveguide device and the results of measurements of the spatial distribution of gas temperature in an argon plasma jet using thermocouples and optical thermography are presented. It is shown that the maximum gas temperature in the jet depends on the flow rate and can be reduced to values 180–200 degrees Celsius at a flow rate of 20–30 l/min at a distance of 2–3 cm from the outlet of the device. In this case, a laminar flow of the plasma jet into the surrounding air is observed. The results of this work are in demand for the development of new plasma sources for surface plasma modification technologies.

Keywords: microwave generator, microwave discharge, plasma jet, thermography, thermocouple, laminar flow, plasma modification.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-5-11

REFERENCES

1. M. Laroussi and T. Akan, *Plasma Processes and Polymers* **4** (9), 777 (2007).
2. Qian Zhang, Peng Sun, Hongqing Feng, Ruixue Wang, Yongdong Liang, Weidong Zhu, Kurt H. Becker, Jue Zhang and Jing Fang, *Journal of Applied Physics* **11** (12), 123305 (2012).
3. J. F. Kolb, A.-A. H. Mohamed, R. O. Price, R. J. Swanson, A. Bowman, R. L. Chiavarini, M. Stacey and K. H. Schoenbach, *Applied Physics Letters* **92** (24), 241501 (2008).
4. Won-Seok, KangaYong-Cheol, HongbYoo-Beom, Honga Jae-Ho, Kima Han and Sup Uhm, *Surface and Coatings Technology* **205**, S418 (2010).
5. M. Laroussi and X. P. Lu, *Applied Physics Letters* **87** (11), 113902 (2005).
6. X. Lua, Q. Xiong, Z. Xiong, J. Hu, F. Zhou, W. Gong, Y. Xian, C. Zou, Z. Tang, Z. Jiang and Y. Pan, *Journal of Applied Physics* **105**, 043304 (2009).
7. Longwei Chen, Peng Zhao, Xingsheng Shu, Jie Shen and Yuedong Menga, *Physics of plasmas* **17** (8), 083502 (2010).
8. K. Yambe and S. Satou, *Physics of Plasmas* **23** (2), 023509 (2016).
9. Xuechen Li, Jiacun Wu, Boyu Jia, Kaiyue Wu, Pengcheng Kang, Furong Zhang, Na Zhao, Pengying Jia, Long Wang and Shouzhe Li, *Applied Physics Letters* **117** (13), 134102 (2020).
10. V. N. Tikhonov, S. N. Aleshin, I. A. Ivanov and A. V. Tikhonov, *J. Phys. Conf. Ser.* **927**, 012067 (2017).
11. V. N. Tikhonov, I. A. Ivanov, A. E. Kryukov and A. V. Tikhonov, *Applied physics*, No. 5, 102 (2015) [in Russian].
12. H. A. Davis, R. R. Bartsch, J. C. Olson et al., *J. Appl. Phys.* **82** (7), 3223 (1997).
13. A. I. Pushkarev, G. E. Kholodnaya, R. V. Sazonov and D. V. Ponomarev, *Rev. Sci. Instrum.* **83** (10), 103301 (2012).
14. P. P. Kiziridi and G. E. Ozur, *JETP* **85** (6), 132 (2015).
15. M. N. Macrossan and C. R. Lilley, *Phys. Fluids*. **15**, 3452 (2003).