ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2019, № 3, с. 130–133

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.072

ИСТОЧНИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

© 2019 г. А. П. Семенов[a,*], Б. Б. Балданов[a], Ц. В. Ранжуров[a]

[a] Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
*e-mail: alexandersemenov2018@mail.ru, semenov@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 13.08.2018 г.
После доработки 13.08.2018 г.
Принята к публикации 13.09.2018 г.

Описан источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе диффузного разряда особой формы – тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Разряд формируется в потоке аргона в виде плазменных струй атмосферного давления. Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой установившийся режим периодичных импульсов тока. На основе источника плазмы создан портативный плазменный стерилизатор PortPlaSter.

DOI: 10.1134/S0032816219020319

ВВЕДЕНИЕ

Заметный интерес к источникам низкотемпературной неравновесной плазмы на основе плазменных струй атмосферного давления (atmosphere pressure plasma jets – APPJ) [1–5] обусловлен возможностями их использования в практических приложениях. Традиционно плазменная струя формируется в разряде (тлеющем, дуговом, высокочастотном, барьерном) и выносится через узкое сопло за счет создания в зоне разряда избыточного давления, превышающего атмосферное. Область применения плазменных струй быстро расширяется, открываются новые перспективные направления: использование плазменных струй в системах плазменного поддержания горения и конверсии (риформинга) углеводородов, модификация поверхности диэлектриков с низкой температурой плавления [1, 6]. Применение плазменных струй в новом направлении – плазменной медицине [7–11] – позволяет обеспечить активацию иммунного ответа и процессов заживления, уменьшение микробного обсеменения инфицированных ран и язв без инициации новых полирезистентных штаммов [12, 13].

Современные отечественные и зарубежные плазменные деструкторы-коагуляторы с плазменной областью небольшого размера и температурой плазмы на выходе от (3.3–4.3) · 10^3 K в основном предназначены для рассечения, удаления, деструкции и испарения мягких и плотных тканей и коагуляции. Однако возможность их использования для эффективной обработки обширных термочувствительных эпителиальных многослойных покровов тела человека, в том числе раневых, значительно сужается, поскольку приводит к их повреждению и разрушению.

Требования к плазменным источникам, генерирующим низкотемпературную аргоновую плазму для обеззараживания и стерилизации обширных поверхностей, в том числе инфицированных ран и незаживающих язв, существенно отличаются от требований к плазменным источникам типа плазменного “скальпеля–коагулятора–стимулятора”. Низкотемпературная аргоновая плазма должна уничтожать высокорезистентную патогенную микрофлору на обширной поверхности, в том числе и раневой, исключать дополнительное поражение биологических тканей и обеспечивать активацию процесса заживления инфицированных ран.

На современном этапе исследований объемная неравновесная плазма на обширной поверхности может быть получена при использовании различных конструкций источников плазмы, состоящих из системы плазменных струй, при специальной организации управления процессом [14–16].

Известен стационарный генератор низкотемпературной аргоновой плазмы для лечения обширных инфицированных ран и язв [17–21]. Для создания плазменного потока предложено использовать многоэлектродный сверхвысокочастотный (с.в.ч.) генератор, в котором в качестве плазмообразующего газа используется Ar с кон-

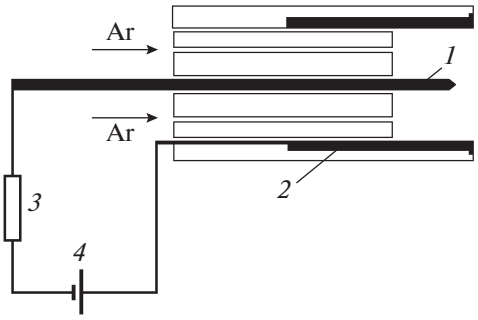

Рис. 1. Схема газоразрядного устройства. *1* – острийный катод; *2* – цилиндрический анод; *3* – балластное сопротивление; *4* – источник питания.

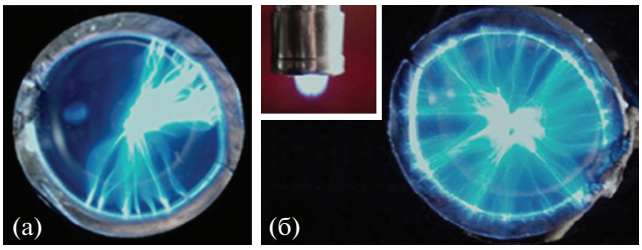

Рис. 2. Фотографии тлеющего разряда особой формы, на который накладываются слаботочные искровые разряды: **а** – вид на разряд с торца в момент зажигания разряда; **б** – вид на разряд с торца при увеличении напряжения разряда (на вставке продольный вид потока плазмы). Расход аргона $G = 1.5 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

тролируемо введенными добавками других газов, таких как CO_2, N или воздух [22].

Принципиально новый подход к организации плазменной струи атмосферного давления предложен в работах [1, 6, 23]. Плазменная струя создается на основе обнаруженной особой формы нестационарного разряда, формируемого в вихревом потоке газа. Как известно, искровой разряд является одной из форм нестационарного электрического разряда в плотных газах – (~10^5 Па) и возникает на финальной стадии процесса – электрического пробоя газового промежутка [24–26].

Пространственная структура разряда представляет собой столб тлеющего разряда и фоновую область слабо ионизированного газа, заполняющего сопло источника плазмы. На разряд накладываются кратковременные сильноточные импульсы искрового разряда с длительностью ~10^{-7} с. Разряд горит в форме тлеющего разряда со случайными переходами к искровому слаботочному разряду с вводом энергии порядка 10^{-3} Дж [1]. Искровые разряды характеризуются как слабые и умеренные [27, 28], если их интенсивность, приведенная к единице длины разрядного промежутка, меньше нескольких джоулей на метр.

Из вышесказанного следует, что плазменные струи на основе слаботочного искрового разряда можно рассматривать как эффективный и простой способ генерации низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы [29, 30]. Способ характеризуется технической простотой в сочетании с такими привлекательными свойствами, как сильная неравновесность создаваемой плазмы [27], низкая температура газа и возможность получения однородной объемной плазмы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментального газоразрядного источника низкотемпературной неравновесной (холодной) аргоновой плазмы на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда [31] представлена на рис. 1.

Разрядная камера содержит медный острийный катод *1* диаметром 8 мм с радиусом закругления острия 30 мкм. Катод установлен на оси изолятора в диэлектрическом корпусе, имеющем форму цилиндра ∅20 мм. Анод *2* представляет собой металлический цилиндр длиной 15 мм и внутренним диаметром 25 мм, коаксиально охватывающий острийный катод. Для стабилизации разряда острийный катод нагружается регулируемым балластным сопротивлением *3*. Изолятор снабжен продольными проходными отверстиями для подачи аргона. От регулируемого высоковольтного источника *4* подается постоянное напряжение до 10 кВ. Величина балластного сопротивления *3* во внешней цепи варьируется от 10 до 63 МОм. Расход аргона $G < 2.8 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При достижении критического напряжения *U*, подаваемого с плюсом на анод *2* и с минусом на острийный катод *1* через балластное сопротивление >1 МОм, возбуждается особая форма тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды (рис. 2а) [29, 30]. Данный тип разряда формируется в потоке аргона.

Пространственная структура разряда представляет собой слабосветящуюся область тлеющего разряда, перекрывающую всю площадь сопла источника плазмы, на фоне которой спонтанно формируются слаботочные искры. Визуально слаботочные искры проявляются как тонкие белые токовые нити, перекрывающие разрядный промежуток (см. рис. 2а). При увеличении напряжения *U* на разрядном промежутке последний более плотно заполняется искровыми разрядами (рис. 2б).

Сформированная таким образом низкотемпературная неравновесная плазма потоком аргона в виде плазменной струи вытекает из разрядного

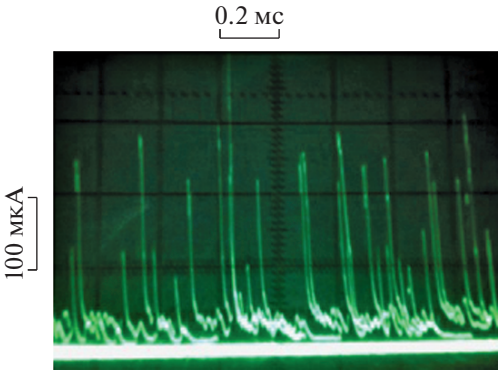

Рис. 3. Осциллограмма импульсов тока слаботочного искрового разряда. Межэлектродное расстояние 12.5 мм, сила тока 500 мкА, балластное сопротивление 21 МОм.

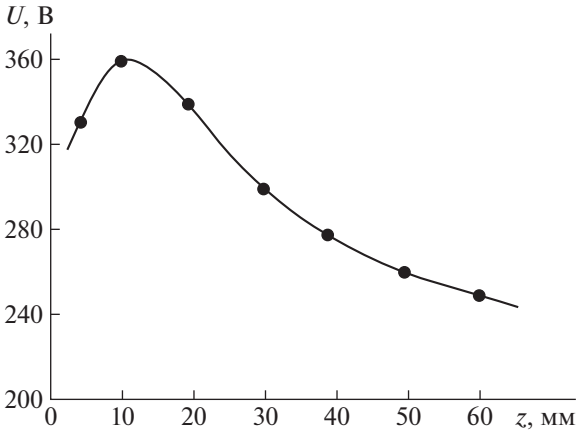

Рис. 4. Изменение потенциала сеточного зонда в плазменной струе на выходе из сопла источника плазмы. Диаметр сопла 25 мм, ток 1 мА.

Рис. 5. Портативный плазменный стерилизатор Port-PlaSter.

промежутка (см. рис. 2б). При сравнительно малых расходах газа, $G < 1.5 \cdot 10^{-2}$ кг/с, диаметр сформированной плазменной струи (факела) составляет 25 мм, длина 10–20 мм. Температура аргонового факела на расстоянии 5 мм от торцевого среза сопла источника плазмы достигает (2.91–2.93) $\cdot 10^2$ K. Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой последовательность регулярных импульсов тока (рис. 3). Амплитуда импульсов тока слаботочной искры возрастет при увеличении расхода газа G, что связано с увеличением длины плазменной струи.

Величина тока разряда регулируется изменением напряжения источника питания и балластного сопротивления. При уменьшении балластного сопротивления токовая область существования разряда значительно сужается, происходит срыв объемной формы горения разряда и реализуется режим контрагированного тлеющего разряда. Токовая область существования, однородность горения и устойчивость разряда увеличиваются с повышением расхода G газа.

На рис. 4 показано изменение потенциала сеточного зонда в плазменной струе на выходе из сопла источника плазмы. Зонд выполнен из металлической сетки Ø25 мм, размер ячейки составляет 0.5 мм. Как видно, потенциал резко уменьшается с увеличением расстояния от торцевого среза сопла. Необходимо отметить, что на расстояниях ≥ 30 мм от сопла потенциал не равен нулю, что свидетельствует о существовании заряженных частиц. С увеличением скорости прокачки газа через разрядный промежуток величина потенциала возрастает.

На основе проведенных исследований создан портативный плазменный стерилизатор Port-PlaSter [31–33] (рис. 5), включающий в себя высоковольтный выпрямитель постоянного тока, систему подачи и контроля газа и источник низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда. Плазменный источник содержит медный острийный электрод Ø1.5 мм с радиусом закругления 18 мкм, расположенный внутри заземленного металлического цилиндра с внутренним Ø8 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korolev Yu.D.* // Russian Journal of General Chemistry. 2015. V. 85. № 5. P. 1311. doi 10.1134/S1070363215050473
2. *Schutze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., Park J., Selwyn G.S., Hicks R.F.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. № 6. P. 1685. doi 10.1109/27.747887
3. *Кириллов А.А., Павлова А.В., Сафронов Е.А., Симончик Л.В., Дудчик Н.В.* // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 52.

4. *Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Печеницин Д.С., Кузнецов В.С.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 151.

5. *Савкин К.П., Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю., Шандриков М.В.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 549.

6. *Королев Ю.Д., Франц О.Б., Нехорошев В.О., Суслов А.И., Касьянов В.С., Шемякин И.А., Болотов А.В.* // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 6. С. 606. doi 10.7868/S0367292116060056

7. *Montie T.C., Kelly-Wintenberg K., Roth J.R.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 28. P. 41.

8. *Daeschlein G., von Woedtke T., Kindel E., Brandenburg R., Weltmann K.-D., Jünger M.* // Plasma Process. Polym. 2010. V. 7. № 3–4. P. 224. https://doi.org/10.1002/ppap.200900059

9. *Lee H.W., Nam S.H., Mohamed A.H., Kim G.C., Lee J.K.* // Plasma Process. Polym. 2010. V. 7. № 3–4. P. 274. https://doi.org/10.1002/ppap.200900083

10. *Jeong J.Y., Babayan S.E., Tu V.J., Park J., Henins I., Hicks R.F., Selwyn G.S.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. № 4. P. 282. doi 10.1088/0963-0252/7/3/005

11. *Fricke K., Steffen H., Woedtke T., Schröder K., Weltmann K.-D.* // Plasma Process. Polym. 2011. V. 8. № 1. P. 51. https://doi.org/10.1002/ppap.201000093

12. *Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Маевский Е.И., Васильев М.М., Петров О.Ф., Фортов В.Е.* // Интернет-издание www.medline.ru. 2010. Т. 11. С. 160.

13. *Ермаков А.М., Маевский Е.И., Васильев М.М., Петров О.Ф., Фортов В.Е.* // Интернет-издание www.medline.ru. 2011. Т. 12. С. 948.

14. *Foest R., Kindel E., Ohl A., Stieber M., Weltmann K.-D.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. № 12B. P. B525. doi 10.1088/0741-3335/47/12B/S38

15. *Ehlbeck J., Ohl A., Ma M., Krohmann U., Neumann T.* // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 174–175. P. 493. doi 10.1016/S0257-8972(03)00652-2

16. *Weltmann K.D., Brandenburg R., von Woedtke T., Ehlbeck J., Foest R., Stieber M., Kindel E.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 194008. doi 10.1088/0022-3727/41/19/194008

17. *Shimizu T., Nosenko T., Morfill G.E., Sato T., Schmidt H.-U., Urayama T.* // Plasma Processes and Polymers. 2010. V. 7. P. 288. doi 10.1002/ppap.200900085

18. *Shimizu T., Steffes B., Pompl R., Jamitzky F., Bunk W., Ramrath K., Georgi M., Stolz W., Schmidt H.-U., Urayama T., Fujii S., Morfill G.E.* // Plasma Processes and Polymers. 2008. V. 5. P. 577. doi 10.1002/ppap.200800021

19. *Isbary G.A., Morfill G., Schmidt H.U., Georgi M., Ramrath K., Heinlin J., Karrer S., Landthaler M., Shimizu T., Steffes B., Bunk W., Monetti R., Zimmermann J.L., Pompl R., Stolz W.* // British Journal of Dermatology. 2010. V. 163. P. 78. https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.09744.x

20. *Isbary G., Zimmermann J.L., Shimizu T., Li Y.F., Morfill G., Thomas H.M., Steffes B., Heinlin J., Karrer S., Stolz W.* // Clinical Plasma Medicine. 2013. V. 1. P. 19. doi 10.1016/j.cpme.2013.06.001

21. *Isbary G., Heinlin J., Shimizu T., Zimmermann J.L., Morfill G., Schmidt H.U., Monetti R., Steffes B., Bunk W., Li Y., Klaempfl T., Karrer S., Landthaler M., Stolz W.* // British Journal of Dermatology. 2012. V. 167. P. 404. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2133.2012.10923.x

22. *Маевский Е.И., Богданова Л.А., Селезнева И.И., Давыдова Г.А., Мурашев А.Н., Ермолаева С.А., Варфоломеев А.Ф., Юров Д.С., Петров О.Ф., Васильев М.М., Фортов В.Е., Дидковский Н.А., Малашенкова И.К., Владимиров И.В., Малашенков Д.К.* // Биомедицинский журнал. 2009. Т. 10. С. 198.

23. *Korolev Y.D., Mesyats G.A.* Physics of Pulsed Breakdown in Gases. Yekaterinburg: Ural Division of Russian Academy of Science, 1998.

24. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997.

25. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах. М.: Иностранная лит-ра, 1960.

26. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.

27. *Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Монич А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 642. doi 10.1134/S1063780X07070082

28. *Репьев А.Г., Репин П.Б., Данченко Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 23. С. 51.

29. *Балданов Б.Б., Семенов А.П., Ранжуров Ц.В., Николаев Э.О., Гомбоева С.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 156.

30. *Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Норбоев Ч.Н., Намсараев Б.Б., Дамбаев В.Б., Гомбоева С.В., Абидуева Л.Р.* // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 47.

31. *Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Норбоев Ч.Н.* // Патент № 2638569 РФ, Класс МПК B81B 3/00 // БИ. 2017. № 35. http://www1.fips.ru/ofpstorage/IZPM/2017.12.14/RUNWC1/000/000/002/638/569/%D0%98%D0%97-02638569-00001/document.pdf

32. *Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Норбоев Ч.Н., Намсараев Б.Б., Дамбаев В.Б., Гомбоева С.В., Абидуева Л.Р.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 229.

33. *Semenov A.P., Baldanov B.B., Ranzhurov C.V., Nikolaev E.O., Gomboeva S.V.* // Siberian Scientific Medical Journal. 2016. V. 36. № 1. P. 18.