

УДК 537.523.9

ИСТОЧНИК ОБЪЕМНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА ОСНОВЕ СЛАБОТОЧНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО РАЗРЯДА

© 2019 г. Б. Б. Балданов¹*, А. П. Семенов¹, Ц. В. Ранжуров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: baibat@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Экспериментально реализована и исследована особая форма диффузного разряда – тлеющего разряда, на который накладываются слабotoчные искровые разряды. Данный тип разряда формируется в потоке газа в виде плазменных струй атмосферного давления. Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока. На основе особой формы разряда типа тлеющего, на который накладываются слабotoчные искровые разряды, создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter.

DOI: 10.1134/S0367676519110061

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интенсивно развиваются исследования, направленные на развитие физических принципов создания, и путей технической реализации принципиально новых типов источников низкотемпературной неравновесной плазмы на основе плазменных струй атмосферного давления (в англ. “atmosphere pressure plasma jets (APPJ)”) [1–5]. Область применения плазменных струй быстро расширяется, появляются новые направления: использование плазменных струй в системах плазменного поддержания горения и конверсии (риформинга) углеводородов, модификация поверхностей (особенно для диэлектриков с низкой температурой плавления) [1, 6]. Перспективной областью применения плазменных струй является плазменная медицина [7–11]. В настоящее время применение низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы является одним из наиболее предпочтительных подходов, обеспечивающих активацию иммунного ответа и процессов заживления, уменьшение микробного обсеменения инфицированных ран и язв без инициации новых полирезистентных штаммов [12, 13].

Традиционно плазменная струя формируется в разряде (тлеющем, дуговом, радиочастотном, барьерном и т.д.) и выносятся через узкое сопло за счет создания в зоне разряда избыточного давления, превышающего атмосферное. Конструкции современных отечественных и зарубежных плазменных деструкторов-коагуляторов с не-

большими размерами плазменной области и температурой плазмы на выходе от 3000–4000°С в основном предназначены для рассечения, удаления, деструкции и испарения мягких и плотных тканей и коагуляции. Это значительно сужает возможность их использования для эффективной обработки обширных термочувствительных поверхностей, в том числе раневых, так как приводит к повреждению поверхности, разрушению тканей животных и человека.

В связи с вышеуказанным 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”. Параметры низкотемпературной аргоновой плазмы и характеристики действующего генератора плазмы должны обеспечивать уничтожение высокорезистентной патогенной микрофлоры на обширной поверхности, в том числе и раневой, исключать дополнительное поражение тканей раны, и обеспечивать активацию процесса заживления инфицированных ран.

На современном этапе исследований получение объемной неравновесной плазмы на обширной поверхности решается с использованием различных конструкций, состоящих из системы плазменных струй при специальной организации управления процессом [14–16].

Исследовательский образец стационарного генератора низкотемпературной аргоновой плазмы для лечения обширных инфицированных ран и язв создан в 2007 г. [17–21]. Для создания плазменного потока предложено использовать многоэлектродный СВЧ-генератор, в котором в качестве плазмообразующего газа используется аргон (чистота 99.999%) с контролируемым введением добавок 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], на основе обнаруженной особой формы нестационарного разряда формируемого в вихревом потоке газа. Разряд представляет собой слаботочный разряд типа тлеющего, на который (в результате спонтанных переходов тлеющего разряда в искровой) накладываются кратковременные сильноточные импульсы искрового разряда с типичной длительностью около 100 нс.

Пространственная структура разряда представляет собой столб тлеющего разряда и фоновую область слабо ионизированного газа, заполняющую сопло плазматрона. Разряд горит в форме тлеющего разряда со случайными переходами к искровому разряду. Искровые разряды являются слаботочными с вводом энергии на уровне 1 мДж [1].

Как известно, искровой разряд является одной из форм нестационарного электрического разряда в плотных газовых средах ($\sim 10^5$ Па) и возникает на финальной стадии процесса, называемого электрическим пробоем газового промежутка [24–26]. Интенсивность искрового разряда связывается с энерговыделением, приведенным к единице длины, и искры с погонным энерговыделением меньше нескольких Дж/см характеризуются как умеренные и слабые искры [27, 28].

В связи с вышесказанным, благодаря технической простоте в сочетании с такими привлекательными свойствами, как сильная неравновесность плазмы [27], низкая температура газа и возможность получения однородной объемной плазмы, плазменные струи на основе слаботочного искрового разряда можно рассматривать как эффективный и простой способ генерации низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы [29, 30].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для генерации низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы разработан источник низкотемпературной неравновесной плазмы на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Разрядная камера содержит острый катод 1 с радиусом закругления острия 30 мкм. Катод установлен на оси изолятора в диэлектрическом корпусе, имеющем форму

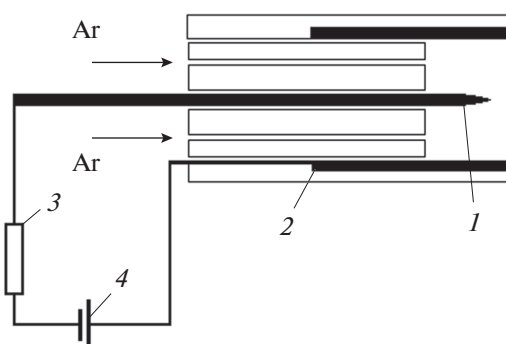


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — острый катод; 2 — цилиндрический анод; 3 — балластное сопротивление; 4 — источник питания.

цилиндра диаметром 2 см. Анод 2 представляет собой металлический цилиндр длиной 1.5 см и внутренним диаметром 2.5 см, коаксиально охватывающий острый катод. Для стабилизации разряда острый 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 измеряется с помощью ротаметров до $28 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При достижении критического напряжения U , подаваемого на острый катод через балластное сопротивление большой величины (>1 МОм), возбуждается особая форма разряда типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды (рис. 2) [1, 6]. Особенностью данного типа разряда является то, что он реализуется в потоке газа.

Пространственная структура разряда представляет собой слабосветящуюся область тлеющего разряда, перекрывающую всю площадь сопла источника, на фоне которой спонтанно формируются слаботочные искры. Визуально слаботочные искры проявляются, как тонкие белые токовые нити, перекрывающие разрядный промежуток. При увеличении напряжения U на разрядном промежутке наблюдается более плотное заполнение разрядного промежутка искровыми разрядами (рис. 2). Сформированная таким образом низкотемпературная неравновесная плазма потоком аргона в виде плазменной струи выносится из разрядного промежутка. Диаметр сформированной плазменной струи составляет 2.5 см, длина струи 1–2 см, при небольших расходах газа ($G < 15 \cdot 10^{-3}$ кг/с). Температура аргонового факела на расстоянии 0.5 см

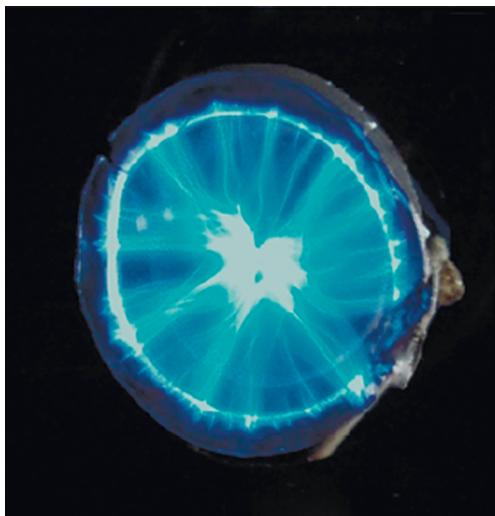


Рис. 2. Фотография особой формы тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Расход аргона $G = 15 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

от сопла генератора равна комнатной температуре (18–20°C).

Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой последовательность регулярных импульсов тока. Амплитуда импульсов тока слаботочной искры возрастет при увеличении расхода газа G , что связано с увеличением длины плазменной струи. Величина тока разряда регулируется при изменении напряжения источника питания и балластного сопротивления. При уменьшении величины балластного сопротивления токовая область существования разряда значительно сужается, происходит срыв объемной формы горения разряда и реализуется режим контрагированного тлеющего разряда. Токовая область существования и однородность горения, и устойчивость разряда увеличиваются с повышением расхода газа G .

Определено распределение потенциала сеточного зонда в плазменной струе на выходе из сопла генератора. Зонд выполнен из металлической сетки диаметром 2.5 см, размер ячейки составляет 0.5 мм. Потенциал резко уменьшается с увеличением расстояния от сопла генератора. Необходимо отметить, что на расстояниях ≥ 3 см от сопла потенциал не равен нулю, что свидетельствует о существовании заряженных частиц. С увеличением скорости прокачки газа через разрядный промежуток генератора, величина потенциала увеличивается.

На основе проведенных исследований разработан и создан портативный плазменный комплекс (рис. 3), включающий в себя источник постоянного тока, систему подачи и контроля газа и портативный источник низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы PortPlaSter на основе

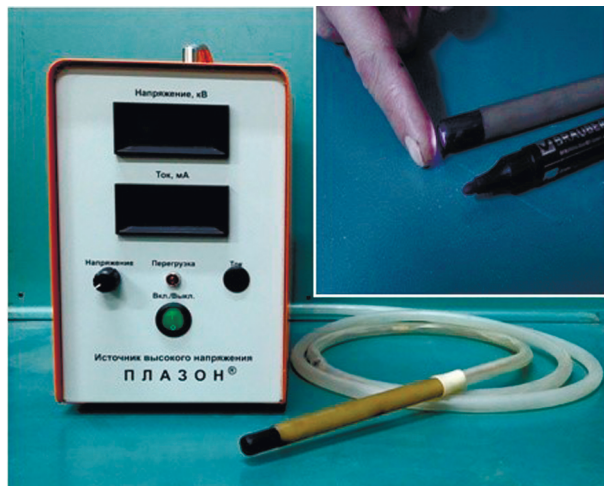


Рис. 3. Портативный плазменный комплекс.

плазменных струй слаботочного искрового разряда. Портативный плазменный источник содержит металлический острый электрод диаметром 1.5 мм и радиусом закругления 18 мкм, расположенный внутри заземленного металлического цилиндра с внутренним диаметром 0.8 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально реализована и исследована особая форма диффузного разряда — тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Данный тип разряда формируется в потоке газа в виде плазменных струй атмосферного давления. Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока. На основе особой формы разряда — типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды, создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев Ю.Д. // Росс. хим. журн. 2013. Т. 57. № 3–4. С. 108.
2. Schutze A., Jeong J.Y., Babayan S.E. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. № 6. P. 1685.
3. Кириллов А.А., Павлова А.В., Сафронов Е.А. и др. // Прикл. физ. 2013. № 5. С. 52.
4. Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С. и др. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 5. С. 151; Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S. et al. // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2016. V. 61. № 5. P. 789.
5. Савкин К.П., Николаев А.Г., Окс Е.М. и др. // Усп. прикл. физ. 2017. Т. 5. № 6. С. 549.
6. Королев Ю.Д., Франц О.Б., Нехорошев В.О. и др. // Физ. плазмы. 2016. Т. 42. № 6. С. 606; Korolev Y.D.,

- Frants O.B., Nekhoroshev V.O. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42. № 6. P. 592.
7. *Montie T.C., Kelly-Wintenberg K., Roth J.R.* // IEEE Transact. Plasma Sci. 2000. V. 28. P. 41.
8. *Daeschlein G., von Woedtke T., Kindel E.* // Plasma Proc. Polym. 2010. V. 7. № 3–4. P. 224.
9. *Lee H.W., Nam S.H., Mohamed A.H. et al.* // Plasma Proc. Polym. 2010. V. 7. P. 274.
10. *Jeong J.Y., Babayan S.E., Tu V.J. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. № 4. P. 282.
11. *Fricke K., Hartmut S., von Woedtke T. et al.* // Plasma Process. Polym. 2011. V. 8. № 1. P. 51.
12. *Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Маевский Е.И. и др.* // Интернет издание: www.medline.ru. 2010. Т. 11. С. 160.
13. *Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Маевский Е.И. и др.* // Интернет-издание www.medline.ru. 2011. Т. 12. С. 948.
14. *Foest R., Kindel E., Ohl A. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. № 12B. P. B525.
15. *Ehlbeck J., Ohl A., Maaß M. et al.* // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 174–175. P. 493.
16. *Weltmann K.D., Brandenburg R., von Woedtke T. et al.* // J. Phys. D. 2008. V. 41. Art. № 194008.
17. *Shimizu T., Nosenko T., Morfill G.E. et al.* // Plasma Proc. Polymers. 2010. V. 7. P. 288.
18. *Shimizu T., Steffes B., Pompl R. et al.* // Plasma Proc. Polymers. 2008. V. 5. P. 577.
19. *Isbary G.A., Morfill G., Schmidt H.U. et al.* // Brit. J. Dermatology. 2010. V. 163. P. 78.
20. *Isbary G., Zimmermann J.L., Shimizu T. et al.* // Clinical Plasma Medicine. 2013. V. 1. P. 19.
21. *Isbary G., Heinlin J., Shimizu T. et al.* // Brit. J. Dermatology. 2012. V. 167. P. 404.
22. *Маевский Е.И., Богданова Л.А., Селезнева И.И. и др.* // Биомед. журн. 2009. Т. 10. С. 198.
23. *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
24. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
25. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах. М.: Иностранная литература, 1960. 605 с.
26. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М. Наука, 1992. 536 с.
27. *Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е. и др.* // Физ. плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 642; *Akishev Yu.S., Aponin G.I., Grushin M.E. et al.* // Plasma Phys. Rep. 2007. V. 33. № 7. P. 584.
28. *Репьев А.Г., Репин П.Б., Данченко Н.Г.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. № 23. С. 51; *Rep'ev A.G., Repin P.B., Danchenko N.G.* // Techn. Phys. Lett. 2007. V. 33. № 12. P. 1011.
29. *Балданов Б.Б., Семенов А.П., Ранжуров Ц.В. и др.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 11. С. 156; *Baldanov B.B., Semenov A.P., Ranzhurov T.V. et al.* // Techn. Phys. Russ. J. Appl. Phys. 2015. V. 60. № 11. P. 1729.
30. *Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. и др.* // Прикл. физ. 2014. № 3. С. 47.