

# Источник объемной плазменной струи на основе слаботочного нестационарного разряда

Б. Б. Балданов, А.П. Семенов, Ц.В. Ранжуров

Институт физического материаловедения СО РАН  
670047, Улан-Удэ, Россия  
e-mail: baibat@mail.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-92-97

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 периодичных импульсов тока. На основе особой формы разряда – типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды, создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter.

## 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 atmosphere pressure plasma jets (APPJ) [1-5]. Область применения плазменных струй быстро расширяется, открываются новые перспективные направления: использование плазменных струй в системах плазменного поддержания горения и конверсии (риформинга) углеводородов, модификация поверхностей (особенно для диэлектриков с низкой температурой плавления) [1,6]. Широкие возможности применения плазменных струй открываются в новом направлении – плазменной медицине [7-11]. В настоящее время применение низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы является одним из наиболее перспективных 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, высокочастотном, барьерном) и выносится через узкое сопло за счет

создания в зоне разряда избыточного давления, превышающего атмосферное. Конструкции современных отечественных и зарубежных плазменных деструкторов-коагуляторов с небольшими размерами плазменной области и температурой плазмы на выходе от  $(3-4) \cdot 10^3$  °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 вышесказанным 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].

Известен стационарный генератор низкотемпературной аргоновой плазмы для лечения обширных инфицированных ран и язв [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  $\text{CO}_2$ , 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  $10^{-7}$  с.

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  $10^{-3}$  Дж [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

энерговыведением, приведенным к единице длины, и искры с погонным энерговыведением 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].

## 1. Методика эксперимента

Для генерации низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы разработан

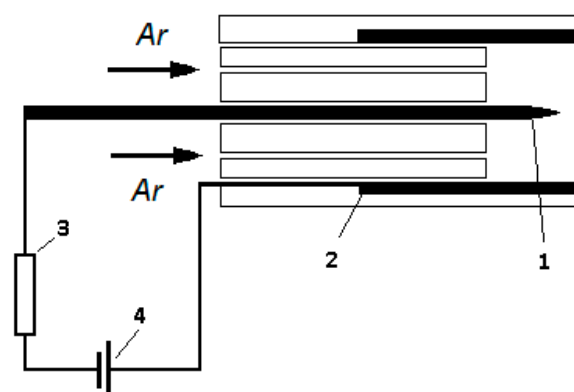


Рис. 1. Схема газоразрядного устройства: 1 – острый катод; 2 – цилиндрический анод; 3 – балластное сопротивление; 4 – источник питания

источник низкотемпературной неравновесной плазмы на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда.

На рис. 1 представлена схема газоразрядного устройства. Разрядная камера содержит острый катод 1 с радиусом закругления острия 30 мкм. Катод установлен на оси изолятора в диэлектрическом корпусе, имеющем форму 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 нагружался 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 варьировалась от 10 до 63 МОм. Расход аргона  $G < 28 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

## 2. Результаты эксперимента

При достижении критического напряжения  $U$ , подаваемого на острый катод через балластное сопротивление  $> 1$  МОм, возбуждается особая форма разряда типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды, рис. 2 (а) [29,30]. Особенностью данного типа разряда является то что, он реализуется в потоке газа.

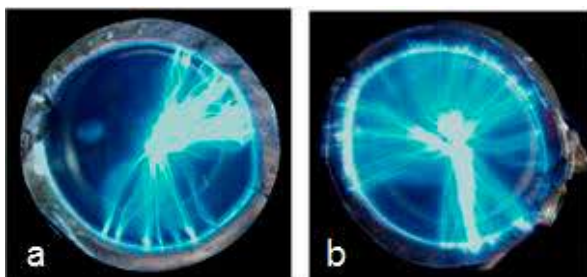


Рис. 2. Фотография особой формы тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды: а – в момент зажигания разряда; б – при увеличении напряжения. Расход аргона  $G = 15 \cdot 10^{-3}$  кг/с

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 (б).

Сформированная таким образом низкотемпературная неравновесная плазма потоком аргона в виде плазменной струи выносится из разрядного промежутка.

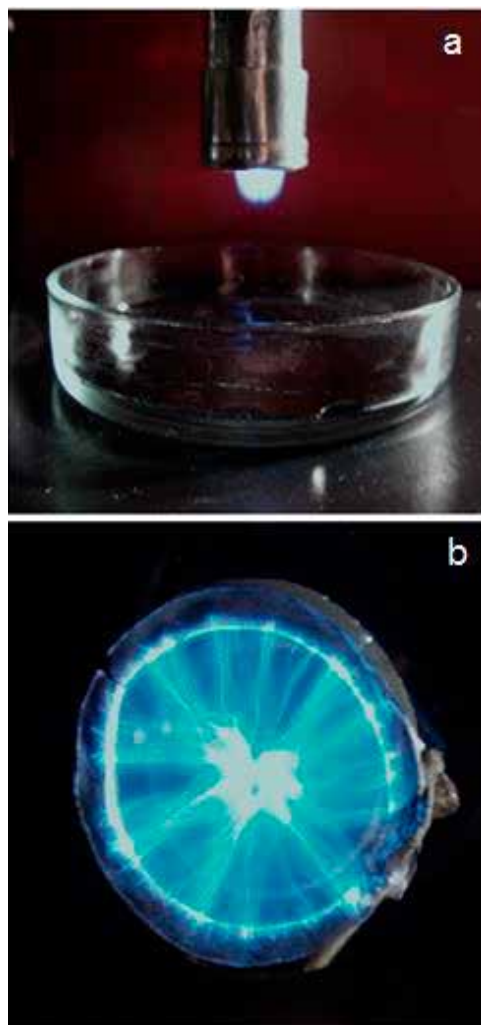


Рис. 3. Источник холодной аргоновой плазмы на основе плазменных струй слаботочной искры: а – инактивация микроорганизмов в чашке Петри; б – вид разряда с торца

На рис. 3 представлена фотография источника холодной аргоновой плазмы на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда.

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 от сопла генератора равна комнатной температуре 18-20° С.

Характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой последовательность регулярных импульсов тока, рис. 4. Амплитуда импульсов тока

слаботочной искры возрастет при увеличении расхода газа  $G$ , что связано с увеличением длины плазменной струи.

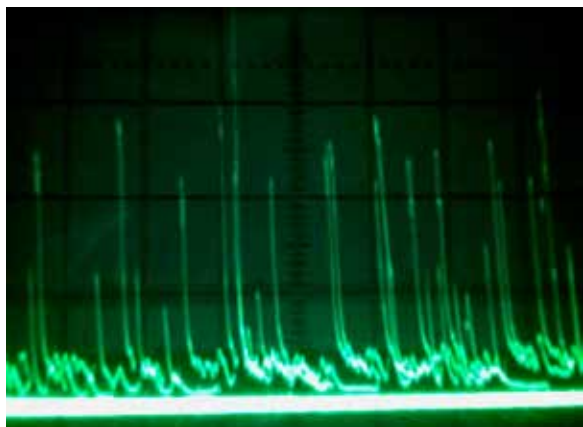


Рис. 4. Токвые импульсы слаботочного искрового разряда. Межэлектродное расстояние 1,25 см, сила тока 500 мкА, балластное сопротивление 21 МОм

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. Токвая область существования и однородность горения, и устойчивость разряда увеличиваются с повышением расхода газа  $G$ .

На рис. 5 показано изменение 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. Как видно, потенциал резко уменьшается с увеличением расстояния от сопла генератора. Необходимо отметить, что на расстояниях  $\geq 3$  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.

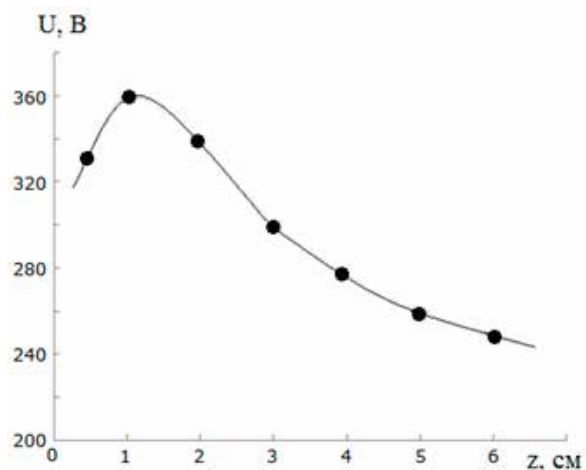


Рис. 5. Изменение потенциала сеточного зонда в плазменной струе. Диаметр сопла 2,5 см; ток 1 мА

На основе проведенных исследований



Рис. 6. Портативный плазменный комплекс.

разработан и создан портативный плазменный комплекс, рис. 6, включающий в себя источник постоянного тока, систему подачи и контроля газа и источник низкотемпературной (холодной) аргонной плазмы PortPlaSter на основе плазменных струй слаботочного искрового разряда.

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.

## Литература

- [1]. Korolev Yu.D. // Russian Journal of General Chemistry. 2015. Vol. 85. № 5. P. 1311-1325.
- [2]. Schutze A., Jeong J.Y., Babayan S.E., Park J., Selwyn G.S., Hicks R.F. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. № 6. P. 1685-1694.
- [3]. Кириллов А.А., Павлова А.В., Сафронов Е.А., Симончик Л.В., Дудчик Н.В. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 52-55.
- [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. № 4. С. 151-153.
- [5]. Савкин К.П., Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю., Шандриков М.В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 549-559.
- [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. 606-615.
- [7]. Montie T.C., Kelly-Wintenberg K., Roth J.R. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. P. 41-50.
- [8]. Daeschlein G., Daeschlein G., von Woedtke T., Kindel E., Brandenburg R., Weltmann K.-D., Jünger M. // Plasma Process. Polym. 2010. Vol. 7. № 3-4. P. 224-230.
- [9]. Lee H.W., Nam S.H., Mohamed A.H., Kim G.C., Lee J.K. // Plasma Process. Polym. 2010. Vol. 7. P. 274-280.
- [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. Vol. 7. № 4. P. 282-285.
- [11]. Fricke K., Steffen H., Woedtke T., Schröder K., Weltmann K.-D. // Plasma Process. Polym. 2011. Vol. 8. № 1. P. 51-58.
- [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. 160-167.
- [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. 948-958.
- [14]. Foest R., Kindel E., Ohl A., Stieber M., Weltmann K.-D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. Vol. 47. № 12B. P. B525-536.
- [15]. Ehlbeck J., Ohl A., Maaß M., Krohmann U., Neumann T. // Surf. Coat. Technol. 2003. Vol. 174-175. P. 493-497.
- [16]. Weltmann K.D., Brandenburg R., von Woedtke T., Ehlbeck J., Foest R., Stieber M., Kindel E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 194008.
- [17]. Shimizu T., Nosenko T., Morfill G.E., Sato T., Schmidt H.-U., Urayama T. // Plasma Processes and Polymers. 2010. Vol. 7. P. 288-293.
- [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. Vol. 5. P. 577-582.
- [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. Vol. 163. P. 78-82.
- [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. Vol. 1. P. 19-23.
- [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. Vol. 167. P. 404-410.
- [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. 198-409.
- [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. 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., Каральник В.Б., Мониц А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 642-660.

[28]. Репьев А.Г., Репин П.Б., Данченко Н.Г. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 23. С. 51-58.

[29]. Балданов Б.Б., Семенов А.П., Ранжуров Ц.В., Николаев Э.О., Гомбоева С.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 156-158.

[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. 47-49.