

ИСТОЧНИК НЕРАВНОВЕСНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2020 г. А. П. Семенов^{а,*}, Б. Б. Балданов^а, Ц. В. Ранжуров^а

^а Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

*e-mail: alexandersemenov2018@mail.ru, semenov@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 17.10.2019 г.

После доработки 17.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Рассмотрен принципиальный подход и разработан эффективный источник объемной пространственно однородной неравновесной плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления, формируемого в неоднородном электрическом поле. Выявлены основные преимущества реализованного разряда – высокая однородность горения, экономичность, возможность масштабирования конструкции в широких пределах, с одновременным повышением стабильности его работы и обеспечение более равномерного и эффективного воздействия нетермической объемной плазмы на термочувствительные поверхности.

DOI: 10.31857/S003281622002007X

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к источникам низкотемпературной неравновесной плазмы на основе объемного тлеющего разряда атмосферного давления [1, 2] обусловлен возможностями их использования в практических приложениях, в частности предпосевной обработке семян [3, 4].

Различные конструкции источников плазмы описаны в статьях [5–7]. Представляет интерес импульсно-периодический режим отрицательного коронного разряда постоянного напряжения в конфигурации электродов острие–плоскость. В токовой области между формами разряда – короной и искрой – возникает новый вид разряда: диффузный тлеющий разряд при атмосферном давлении, создающий стационарную и однородную неравновесную плазму по всему объему межэлектродного промежутка.

Специальные меры стабилизации отрицательной короны позволяют существенно отодвинуть токовую границу появления искры [8, 9]. Повышенный интерес к изучению диффузного тлеющего разряда в настоящее время обусловлен возможностью использования разряда как нового перспективного источника неравновесной плазмы атмосферного давления [10].

Требования к плазменным источникам, генерирующим низкотемпературную аргоновую плазму для обработки обширных термочувствительных поверхностей, существенно отличаются от требований к источникам плазменных струй [11, 12].

С одной стороны, формирование холодных (близких к комнатной температуре) плазменных струй, способных химически активировать при атмосферном давлении газовые среды и поверхности термически нестойких материалов, не обеспечивает создание неравновесной объемной (большой площади) однородной плазмы в свободном пространстве, с другой, значительно сужается возможность их использования для эффективной обработки обширных термочувствительных поверхностей.

В [13] рассмотрен вариант генерирования слаботокового поверхностного разряда в аргоне атмосферного давления с диэлектрическим барьером на аноде, инициированного отрицательным коронным разрядом постоянного напряжения в промежутке острый катод–плоский анод, покрытый диэлектриком. Показано, что при повышении напряжения на поверхности диэлектрика формируются ярко светящиеся поверхностные разряды – стримеры, при этом наблюдаются как контрагированная, так и диффузная форма разряда. Указанная структура электродов близка к электродной конфигурации острие–плоскость классического отрицательного коронного разряда.

Электродную структуру острый катод–плоский анод можно рассматривать как эффективный и простой подход к генерации низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на обширной площади благодаря переходу к специальной электродной структуре из многоострийных катодов, равномерно рассредото-

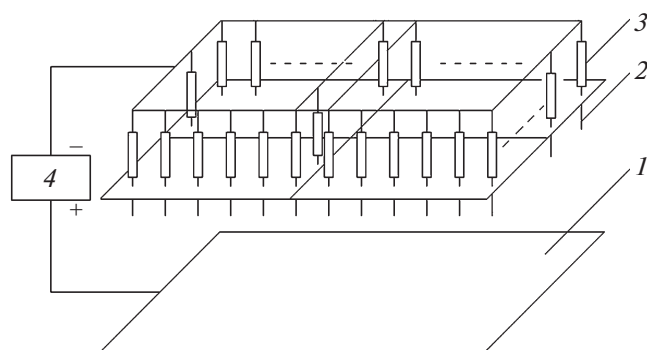


Рис. 1. Схема газоразрядного устройства [15]. 1 – анод; 2 – острые катоды; 3 – балластные сопротивления; 4 – высоковольтный выпрямитель.

ченных над плоским металлическим анодом и нагруженных на балластные сопротивления. Такой принцип построения электродной структуры открывает возможность получения неравновесной однородной объемной плазмы и позволяет получить в межэлектродном промежутке высокие [14] по сравнению с классической отрицательной короной в геометрии острие–плоскость плотность тока $j \sim 10 \text{ mA/cm}^2$ и приведенное электрическое поле $E/N \sim 75\text{--}100 \text{ Td}$ (N – концентрация газа).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментального источника низкотемпературной неравновесной (холодной) аргонной плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления, формируемого в неоднородном электрическом поле [15], представлена на рис. 1.

Тлеющий разряд инициируется в электродной конструкции между плоским металлическим анодом 1 и острыми катодами 2. Протяженность разрядного промежутка от вершины острий до плоскости анода составляет 1–2 см. Плоский анод представляет собой металлическую пластину площадью 672 cm^2 или металлическую сетку с размером ячеек 1 mm^2 . Острые катоды ориентированы нормально плоскости анода, объединены в четыре секции на площади 420 cm^2 и нагружены на балластные сопротивления 3. Плотность острых катодов в секциях – один на площадь 1 cm^2 . Диаметр острых катодов 1.5 мм. Радиус закругления торцевых срезов катодов составлял 50 мкм.

Для стабильного зажигания и устойчивого горения тлеющего разряда [8, 9, 16] каждый острый катод нагружался регулируемым в диапазоне 1–9 МОм балластным сопротивлением. Плазмобразующий газ аргон нагнетался перпендикулярно острым катодам и направлению электрического тока пробиваемого разрядного промежутка. Устойчивость разряда относительно

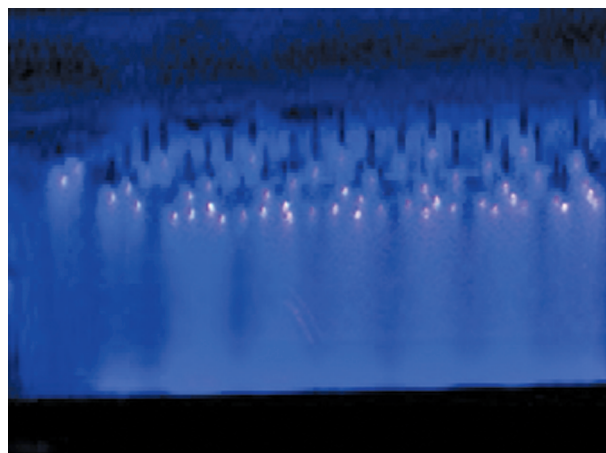


Рис. 2. Свечение тлеющего разряда атмосферного давления.

перехода отрицательной короны в искровой пробой разрядного промежутка достигается слабой прокачкой аргона через разрядный промежуток. Скорость прокачки на входе в разрядный промежуток 0.45–2.24 м/с. Расход нагнетаемого аргона $5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$. Разряд зажигался от регулируемого высоковольтного источника питания ВС-20-10 с выходным напряжением до 20 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В режиме тлеющего разряда атмосферного давления разряд наблюдается в виде однородных, самостоятельных разрядов, заполняющих и перекрывающих весь протяженный разрядный промежуток. Разряд сопровождается появлением светящегося положительного столба и светящегося слоя на аноде, характерного для тлеющего разряда. Свечение плазмы тлеющего разряда наблюдается в виде расширяющихся цилиндрических каналов – от вершин острых катодов до поверхности анода (рис. 2).

На редуцированной вольт-амперной характеристике (рис. 3) выделяются два участка с линейной зависимостью приведенного тока от напряжения – в импульсно-периодическом режиме отрицательной короны (участок $a\text{--}b$) и в режиме тлеющего разряда атмосферного давления (участок $b\text{--}e$). Место пересечения двух экстраполированных прямых отождествляется с началом перехода режима коронного разряда в режим тлеющего разряда. Как видно, включение ионизации в дрейфовой области разрядного промежутка приводит к более крутому нарастанию тока с напряжением в режиме тлеющего разряда атмосферного давления по сравнению с режимом коронного разряда.

Превысив значение критического тока I^* , соответствующее излому редуцированной вольт-

амперной характеристики, свечение разряда однородно заполняет весь разрядный промежуток острые катоды—плоский анод, что характерно для классического тлеющего разряда, и позволяет получить объемную однородную плазму на всей площади анода. Повышению предельного тока препятствует переход тлеющего разряда атмосферного давления в искровой пробой разрядного промежутка в результате локального усиления напряженности поля и роста плотности ионного пространственного заряда.

Напряженность E электрического поля линейно растет с ростом плотности тока j (рис. 4, кривая 1). В отличие от тлеющего разряда низкого давления, где напряженность электрического поля увеличивается с ростом протяженности разрядного промежутка, в тлеющем разряде атмосферного давления напряженность электрического поля остается неизменной с ростом протяженности разрядного промежутка (кривая 2).

Концентрация электронов n_e в положительном столбе тлеющего разряда атмосферного давления, получаемая из измерений полного тока I и сечения разряда S : $I/S \sim j \sim e\mu_e E n_e$ (e — заряд электронов, μ_e — подвижность электронов), равна $n_e \sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$. Необходимо отметить, что увеличение количества коронирующих острий заметно снижает величину тока, приходящегося на острие, и предельный ток разряда увеличивается (рис. 5).

Источник неравновесной аргоновой плазмы тлеющего разряда испытан при обработке зерен пшеницы [17]. Поверхность зерен становится гидрофильной, характеризуется низкими значениями углов смачивания $\sim 57^\circ$ (исходная поверхность характеризуется углом смачивания $\sim 107^\circ$).

На рис. 6 представлена морфология оболочки зерна пшеницы до и после обработки плазмой. Исходная поверхность зерна (рис. 6а) достаточно ровная и гладкая. После воздействия холодной аргоновой плазмы на оболочку зерна (рис. 6б) наблюдаются структурные изменения оболочки зерна, развивается мелкая сетчатая структура с резко очерченными границами ячеек.

Показано [18], что обработка зерен в низкотемпературной неравновесной плазме позволяет значительно увеличить всхожесть и стимулирует рост растений в начальной стадии онтогенеза, при этом достигается значительное увеличение биомассы. Наибольший эффект проявляется при длительности воздействия ~ 30 с и плотности мощности $\sim 74.5 \text{ Вт/м}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления. Переход импульсно-периодического режима отрицатель-

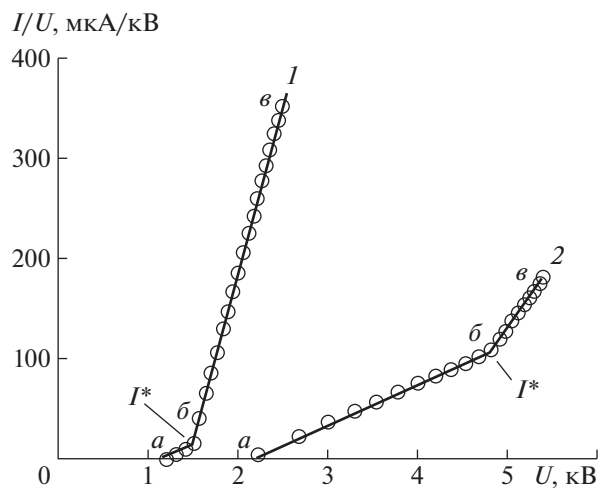


Рис. 3. Редуцированные вольт-амперные характеристики тлеющего разряда атмосферного давления (величина тока пересчитана на одно острие). I^* — критический ток перехода в режим тлеющего разряда; протяженность разрядного промежутка: 1 — 1 см, 2 — 2 см.

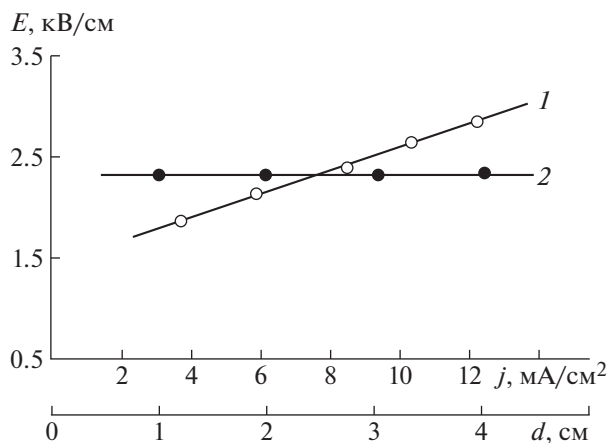


Рис. 4. Зависимости напряженности электрического поля E : 1 — от плотности тока j (протяженность разрядного промежутка 2 см), 2 — от протяженности разрядного промежутка d (плотность тока 0.3 mA/cm^2).

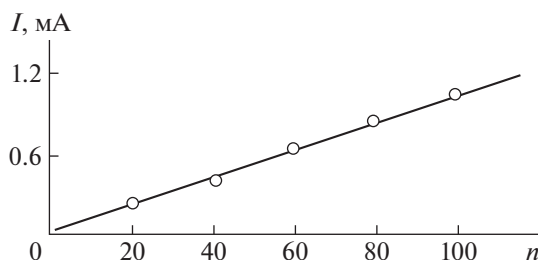


Рис. 5. Зависимость предельного тока разряда от числа острий n . Протяженность разрядного промежутка 2 см.

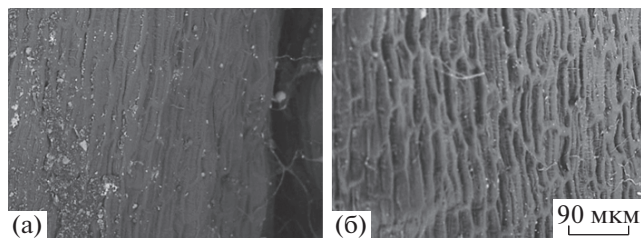


Рис. 6. Микрофотография оболочки зерна пшеницы: **а** – до обработки; **б** – после обработки плазмой (ток разряда ~300 мкА, время экспозиции ~30 с).

ной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления происходит при определенном значении тока и сопровождается появлением светящегося положительного столба в разрядном промежутке. Разряд формируется в потоке газа аргона. Балластные сопротивления в цепи коронирующих острий существенно влияют на устойчивость разряда и однородность заполнения разрядного промежутка плазмой, увеличивают предельный ток и расширяют токовую область существования разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балданов Б.Б., Норбоев Ч.Н. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 93.
2. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 152.
3. Порсев Е.Г. Патент на изобретение № 2299542 RU. МПК А01С 1/00 // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 15. <http://new.fips.ru/Archive/PAT/2007FULL/2007.05.27/DOC/RUNWC2/000/000/002/299/542/DOCUMENT.PDF>
4. Аксенов В.В., Порсев Е.Г. // Вестник КрасГАУ. 2012. № 12. С. 175.
5. Foest R., Kindel E., Ohl A., Stieber M., Weltmann K.-D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. № 12B. P. B525.
6. Ehlbeck J., Ohl A., Ma M., Krohmann U., Neumann T. // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 174–175. P. 493. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00652-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00652-2)
7. 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. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/19/194008>
8. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В., Напартович А.П., Панькин М.В., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 2. С. 172.
9. Baldanov B.B., Semenov A.P., Ranjurov Ts.V. // J. Electrostatics. 2019. V. 100. UNSP 103351. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.05.003>
10. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Кочетов И.В., Монич А.Е., Напартович А.П., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 2. С. 198.
11. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Трушкин Н.И. Патент на изобретение № 2370924 RU. МПК H05H 1/24 // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 29. <http://new.fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.10.20/DOC/RUNWC2/000/000/002/370/924/DOCUMENT.PDF>
12. Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В. // ПТЭ. 2019. № 3. С. 130. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020319>
13. Балданов Б.Б., Семенов А.П., Ранжуров Ц.В. // Изв. РАН. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 11. С. 1502. <https://doi.org/10.1134/S036767651911005X>
14. Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 7. С. 70.
15. Семенов А.П., Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Норбоев Ч.Н., Намсараев Б.Б., Дамбаев В.Б., Гомбоева С.В., Абидуева Л.В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 229.
16. Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Каральник В.Б., Кочетов И.В., Напартович А.П., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571.
17. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Сордонова М.Н., Будажапов Л.В. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 41.
18. Балданов Б.Б., Ранжуров Ц.В., Сордонова М.Н., Будажапов Л.В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 260.