

## Особенности режимов возбуждения и структуры межэлектродного сверхвысокочастотного разряда атмосферного давления в аргоне

© С.Н. Антипов, М.Х. Гаджиев, М.В. Ильичев, А.С. Тюфтяев, В.М. Чепелев, Д.И. Юсупов

Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия  
e-mail: antipov@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 10 октября 2023 г.  
В окончательной редакции 1 июля 2024 г.  
Принято к публикации 2 июля 2024 г.

Экспериментально исследованы непрерывный и импульсно-периодический режимы возбуждения и пространственно-временная структура межэлектродного сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда атмосферного давления в поперечном потоке аргона в геометрии межэлектродного промежутка „полусфера—плоскость“. В качестве газоразрядного устройства использовалась многоэлектродная плазменная горелка с потребляемой электрической мощностью  $\sim 100$  W, электромагнитная энергия к которой подводится от СВЧ плазмотрона волноводного типа, работающего на базе магнетрона с частотой 2.45 GHz. Управление режимами СВЧ разряда осуществлялось с помощью высоковольтного трехфазного источника питания магнетрона. В непрерывном режиме описана фрактальная филаментация приэлектродных областей плазменного канала СВЧ разряда тлеющего типа. Диагностика режимов осуществлялась осциллографированием плавающего потенциала в потоковом послесвечении СВЧ разряда (холодной плазменной струе).

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотный плазмотрон, тлеющий разряд атмосферного давления, диагностика плазмы, филаментация разряда.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58858.260-23

### Введение

Как известно, неравновесная плазма представляет собой плазму, состояние которой не является состоянием полного термодинамического равновесия [1]. Основной особенностью неравновесной плазмы является то, что электрическая энергия приводит к возникновению энергетических электронов без существенного нагрева газовой среды. При этом образуется целый спектр радикалов и возбужденных частиц с высокой реакционной способностью. Данная особенность находит широкое практическое применение в технологиях плазменной модификации свойств поверхности различных материалов, в том числе таких нетермостойких, как полимеры, биологические объекты и другие [2]. В течение долгого времени для плазменной обработки использовались тлеющие разряды низкого и пониженного давлений (например, емкостные ВЧ разряды и разряды постоянного тока) [3–7]. Плазма в таких разрядах характеризуется низкой плотностью атомов в газовой фазе и, следовательно, низким уровнем столкновений между электронами и тяжелыми частицами. В последние годы все возрастающий интерес представляют холодные плазменные струи на основе сверхвысокочастотных (СВЧ) разрядов атмосферного давления, в которых происходит образование возбужденных частиц и радикалов с высокой реакционной способностью. При этом сами струи не оказывают деструктивного воздействия на материал в процессе плазменной обработки [8–14]. Наиболее широко используется и исследуется в настоящее время

так называемое „плазменное перо“ („plasma plume“ в англоязычной литературе), которое представляет собой разряд в потоке газа вблизи остроконечного электрода внутри диэлектрической трубки малого ( $\sim 1$  mm) диаметра [15–23]. Такой вид одноэлектродного СВЧ разряда по своей форме близок к факельному разряду, типичному для ВЧ коронного разряда при частотах 10 MHz и давлениях, близких к атмосферному.

Во многих технологических процессах, таких, как плазменная очистка, плазменная активация поверхности, плазменное осаждение и плазменное травление, площадь обрабатываемой поверхности является важным параметром источника плазмы. Для обработки больших площадей используются различные приемы, такие, как „сканирование“ поверхности или использование матрицы из разрядных трубок [16,24–27]. В то же время исследования разрядов, удобных для генерации широких плазменных струй, в настоящее время весьма немногочисленны. Отметим, прежде всего, цикл работ, проводимых на аппарате для генерации холодной СВЧ плазмы MicroPlaster, плазменная горелка которого содержит шесть электродов в общей разрядной камере (см., например, [27–32]). Однако данные работы были направлены на исследования характеристик потокового послесвечения аргонового СВЧ разряда (холодной плазменной струи) и производимого им эффекта стерилизации в биомедицинских приложениях, но свойства самого разряда в них не изучались. Разработке и исследованию подобного источника СВЧ плазмы были посвящены также и недавние работы [33–36], в

которых принимали участие сотрудники, входящие в авторский коллектив настоящей статьи. Что касается разработки безэлектродных источников широких СВЧ плазменных струй, то следует упомянуть полученный в работе [37] свободно локализованный неравновесный разряд атмосферного давления, поддерживаемый непрерывным СВЧ излучением технологического гиротрона с частотой 24 GHz и мощностью 20–5000 W. Плазменная струя в этом случае формировалась в потоке газа в области перетяжки квазиоптического СВЧ пучка и в чистом аргоне состояла из короткоживущих нитевидных плазменных образований. При введении в поток аргона малых добавок  $\text{CO}_2$  плазменные нити „размывались“, и разряд приобретал диффузный вид.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования непрерывного и импульсно-периодического токовых режимов и пространственно-временной структуры электродного СВЧ разряда, возбуждаемого в геометрии межэлектродного промежутка „полусфера–плоскость“ в поперечном потоке аргона при атмосферном давлении. Как уже было упомянуто выше, такой разряд был впервые получен для использования в медико-биологических приложениях и представляет собой разряд нового типа — тлеющий СВЧ разряд атмосферного давления. В качестве газоразрядного устройства использовалась разработанная ранее многоэлектродная плазменная горелка с широким выходным отверстием, электрическая мощность к которой подводится от волноводного СВЧ плазмотрона [33–36,38].

## 1. СВЧ плазмотрон с плазменной горелкой

Используемый в настоящих экспериментах СВЧ плазмотрон изготовлен на базе типового маломощного СВЧ генератора (магнетрона) с частотой 2.45 GHz и мощностью 1.1 kW. Он позволяет получать СВЧ разряды атмосферного давления как в собственном волноводном тракте (безэлектродная конфигурация), так и во внешней портативной разрядной камере (плазменной горелке), предназначенной для генерации холодных плазменных струй на основе межэлектродного СВЧ разряда мощностью до нескольких сотен ватт [33–36,38]. СВЧ плазмотрон представляет собой модульную систему, включающую в себя три основных компонента: высоковольтный трехфазный блок питания (БП), блок СВЧ с магнетроном и разборный трехсекционный волноводный тракт с водяной нагрузкой. Волновод изготовлен из стального прямоугольного профиля размером  $100 \times 50 \times 2$  mm с фланцами WR-340. Вода в контур охлаждения и водяной нагрузки подается из водопроводной сети.

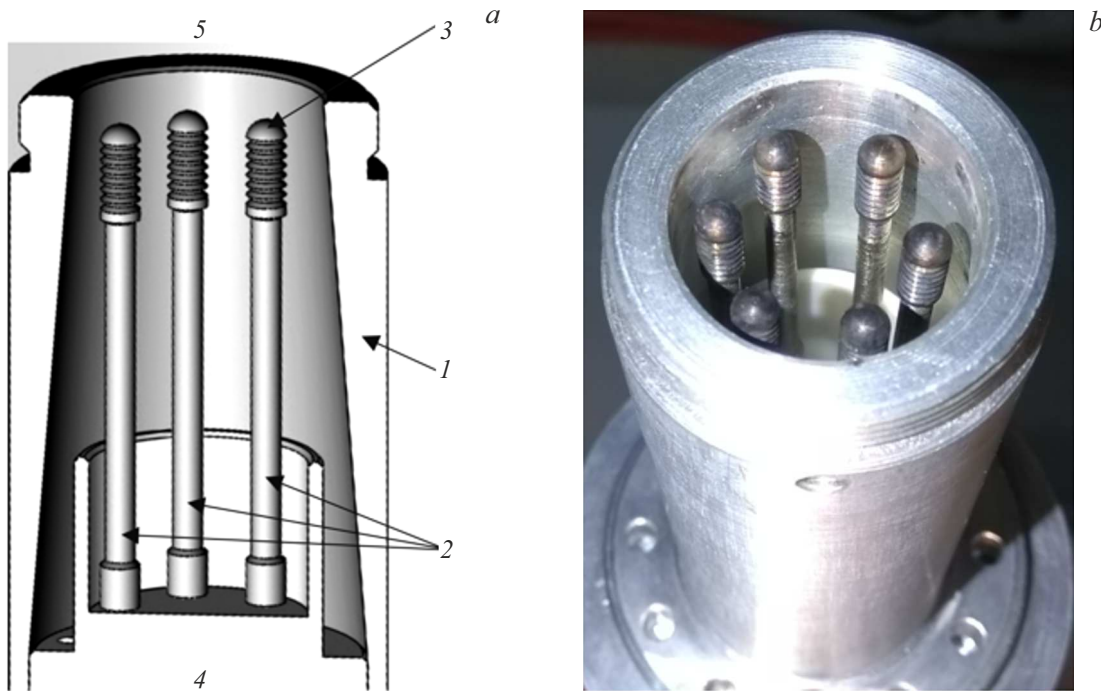
Для питания внешних газоразрядных устройств использовался ответвитель индукционного типа, представляющий собой петлю связи, размещенную на узкой стенке центральной секции волновода. Конструкция ответвителя позволяет изменять величину связи путем

поворота плоскости петли, которая нагружена на коаксиальный разъем N-типа. Ответвителем с учетом потерь отводится до 15% мощности магнетрона [36]. Плазменная горелка представляет собой полезную нагрузку и присоединяется к ответвителю с помощью кабельной сборки (коаксиальный кабель  $50 \Omega$  длиной 2 m с двумя N-разъемами). Конструктивно горелка представляет собой цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 25 mm, содержащую шесть стержневых электродов диаметром 4 mm и длиной  $\approx 9.2$  mm, размещенных параллельно друг другу с образованием равностороннего шестиугольника в поперечном сечении горелки (рис. 1). В качестве плазмообразующего газа использовался аргон высокой чистоты (99.998%), расход которого регулировался в диапазоне 3–10 l/min. Газ в горелку подавался из баллонов с редукторами-расходомерами.

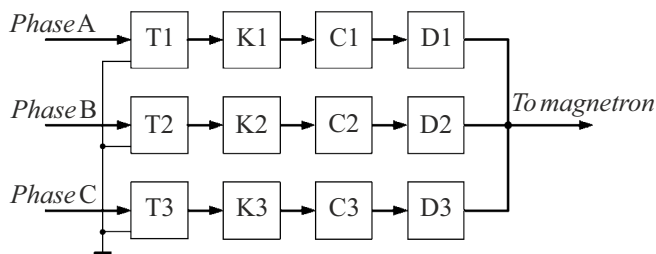
Исследовались непрерывный и импульсно-периодический режимы возбуждения (токовые режимы) разряда, переключение между которыми осуществлялось с помощью трехфазного БП плазмотрона (380/220 V, 50 Hz). Схематично работа радиотехнических систем, входящих в модуль БП, представлена на рис. 2. БП включает в себя повышающие трансформаторы T1–T3, коммутаторы K1–K3, батареи конденсаторов C1–C3 и диодные выпрямители D1–D3. Использовалась трехфазная схема питания магнетрона, в которой напряжение с каждой фазы поступает на отдельный повышающий трансформатор, при этом на вторичной обмотке каждого трансформатора переменное напряжение составляет около 2.2 kV. Коммутаторы K1–K3 позволяют регулировать емкость конденсаторных батарей C1–C3. Чем больше емкость конденсаторной батареи, тем больше электрическая мощность питания магнетрона и тем больше мощность выходного СВЧ-излучения. Напряжение питания магнетрона формируется диодными выпрямителями D1–D3. Сигналы управления коммутаторами K1–K3 подаются от системы управления БП. Для питания магнетрона могут быть задействованы все три фазы „А“, „В“ и „С“. При этом напряжение питания можно считать практически постоянным, и магнетрон работает в непрерывном режиме. При питании от одной или двух фаз напряжение питания подается с частотой 50 Hz. В этом случае магнетрон работает в импульсно-периодическом режиме. Недостатком такого способа включения магнетрона является отсутствие возможности менять частоту следования импульсов, поскольку она определяется частотой сети электропитания.

## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

СВЧ разряд в плазменной горелке инициировался посредством затравочной ионизации при кратковременном внесении в межэлектродный промежуток острия тонкой



**Рис. 1.** Плазменная горелка для возбуждения межэлектродного СВЧ разряда атмосферного давления в поперечном газовом потоке (*a* — схема, *b* — фотография): 1 — цилиндрическая разрядная камера, 2 — стержневые электроды, 3 — область локализации электродных пятен разряда (закругленный торец электрода), 4 — изолятор, 5 — выходное отверстие разрядной камеры. Диаметр выходного отверстия разрядной камеры 25 мм, диаметр закругленного торца электрода 4 мм, расстояние между торцом электрода и внутренней стенкой выходного отверстия камеры 2 мм.



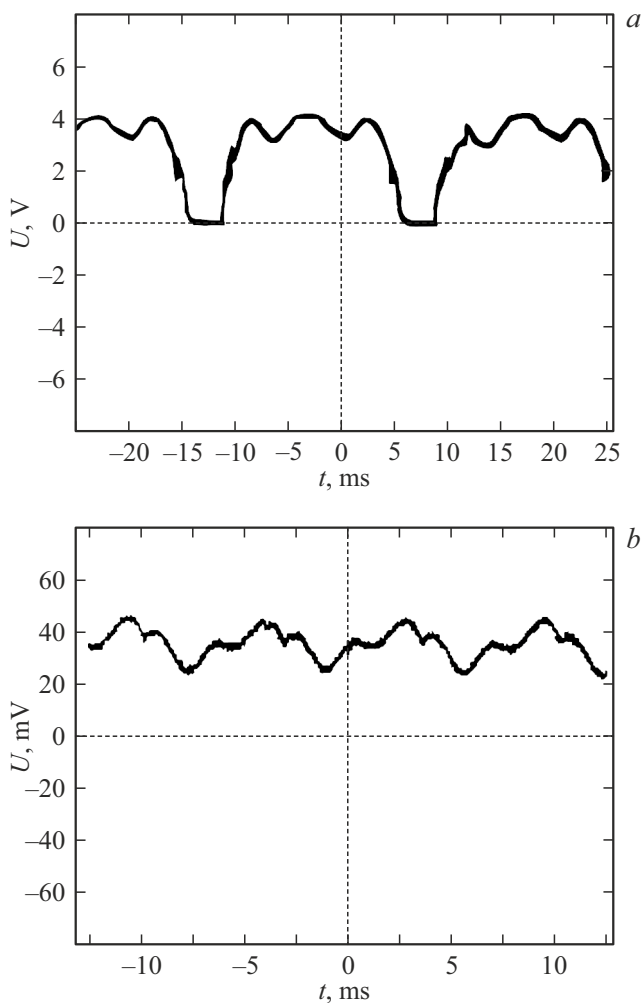
**Рис. 2.** Блок-схема цепи питания магнетрона от трехфазной сети: T1–T3 — повышающие трансформаторы, K1–K3 — коммутаторы, C1–C3 — батареи конденсаторов, D1–D3 — диодные выпрямители.

проволоки диаметром 200 мкм. Зона вблизи проволочного острия характеризуется значительно более высокими значениями напряженности поля по сравнению со средними значениями для всего промежутка, что приводит к ионизации газа и появлению затравочных электронов у острия и последующему развитию разряда во всем межэлектродном промежутке. Кроме того, инициация разряда возможна с помощью искры от внешних источников, таких, как пьезоэлемент, катушка Теслы и т. п.

Диагностика токовых режимов разряда осуществлялась при измерении осциллографом плавающего потенциала одиночного электрического зонда в потоковом послесвечении СВЧ разряда (холодной плазменной струе)

за выходным отверстием горелки. Для этого игольчатый контакт шупа осциллографа, используемый в качестве зонда, располагался вблизи выходного отверстия горелки вдоль ее центральной оси. Таким способом были получены амплитудно-временные (частотные) характеристики плавающего потенциала в плазменной струе в непрерывном и импульсно-периодическом режимах СВЧ разряда. Формы электрического потенциала на зонде представлены на рис. 3. Как видно, импульсно-периодический режим при питании от двух фаз осуществляется с частотой 50 Hz, длительность импульсов составляет около 15 ms, скважность — 4/3. Импульсы имеют форму, близкую к прямоугольной, с тремя „горбами“ высотой около 20% от максимального значения сигнала (рис. 3, *a*). В непрерывном режиме сигнал осциллировал с частотой 150 Hz, что обусловлено действием трех фаз напряжения питания магнетрона (рис. 3, *b*). Уровень сигнала на расстоянии нескольких сантиметров от выходного отверстия горелки составлял ~ 10–100 mV и мог достигать нескольких вольт непосредственно вблизи него.

В исследуемых режимах проводились наблюдения СВЧ разряда со стороны выходного отверстия горелки с помощью ПЗС-видеокамеры с частотой 30 кадров в секунду. Феноменологическое описание СВЧ разряда в горелке может быть дано следующим образом. В непрерывном режиме между закругленным торцом



**Рис. 3.** Осциллограммы плавающего потенциала в потоковом послесвечении СВЧ разряда (холодной плазменной струе) в импульсно-периодическом (а) и непрерывном (б) токовых режимах.

стержневого электрода и внутренней стенкой разрядной камеры возбуждается тлеющий разряд в виде яркого плазменного шнура (рис. 4, см. также [35]). При этом у стержневого электрода разряд практически полностью покрывает его закругленный торец, а на внутренней стенке разрядной камеры образует круглое электродное пятно диаметром примерно 4 мм. В центральной части межэлектродного промежутка разрядный канал сжимается более чем в два раза, формируя узкую перемычку с однородным свечением. Поскольку диаметр электродов и размеры пятна на стенке камеры малы по сравнению с внутренним диаметром камеры, кривизной стенки камеры в области пятна можно пренебречь и считать, что разряд создается в геометрии межэлектродного промежутка „полусфера–плоскость“. Вблизи торца стержневого электрода наблюдалось расщепление разрядного канала на филаменты, образующие самоподобную (фрактальную) пространственную структуру

(рис. 4, а, б). При этом концы филаментов, касающихся поверхности электрода, образуют на ней паттерн из порядка  $10^2$  ярких подвижных микропятен, упорядоченных в кластеры с треугольной структурой (рис. 4, а). Мы полагаем, что подобная отчетливая филаментация обусловлена выпуклой формой торцов электродов в виде полусферы, которая приводит к значительному растяжению разрядного канала, что делает хорошо различимыми отдельные филаменты. При этом на противоположном конце канала, у стенки камеры, филаментация разряда была выражена гораздо слабее. Тем не менее в области электродного пятна также наблюдались хаотично перемещающиеся яркие микропятна (рис. 4, с). Отметим, что подобная филаментация разрядного канала характерна также и для тлеющего разряда атмосферного давления при возбуждении на постоянном токе (см., например, [39]). Из результатов спектральной диагностики и оценок, полученных для сходных условий эксперимента, известно, что температура газа  $T_g$  в разрядном канале составляет 1200 К, а концентрация и температура электронов —  $n_e \sim 10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  и  $T_e \sim 1 \text{ eV}$  соответственно [34,35]. В импульсно-периодическом режиме одновременно с разрядными каналами тлеющего типа наблюдались одноканальные искры, хаотично возникающие между электродами (рис. 4, d). Появление искр обусловлено периодичностью работы магнетрона и свидетельствует о том, что на переднем фронте импульса формированию канала тлеющего типа предшествует искровой пробой. В обоих режимах динамика разрядных каналов была подвержена сильному влиянию газодинамического потока, неоднородность которого приводила к их смещению и осцилляциям. Сравнивая полученные режимы СВЧ разряда с точки зрения их практического использования (например, для плазменной обработки материалов), мы полагаем, что в случае непрерывного токового режима может быть получена большая концентрация активных частиц в холодной плазменной струе. Преимуществом же импульсно-периодического режима является меньший нагрев элементов конструкции горелки (электродов, разрядной камеры и др.) и более низкая температура плазменной струи, что может быть критичным для обработки термочувствительных материалов.

## Заключение

В работе с помощью управления питанием магнетрона реализованы непрерывный и импульсно-периодический режимы возбуждения тлеющего СВЧ разряда атмосферного давления в электродной плазменной горелке в поперечном потоке аргона. Измерены амплитудно-временные характеристики плавающего потенциала в холодной плазменной струе СВЧ разряда в этих режимах. В непрерывном режиме описана фрактальная филаментация приэлектродных областей разрядного канала. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использования СВЧ разряда тлеющего

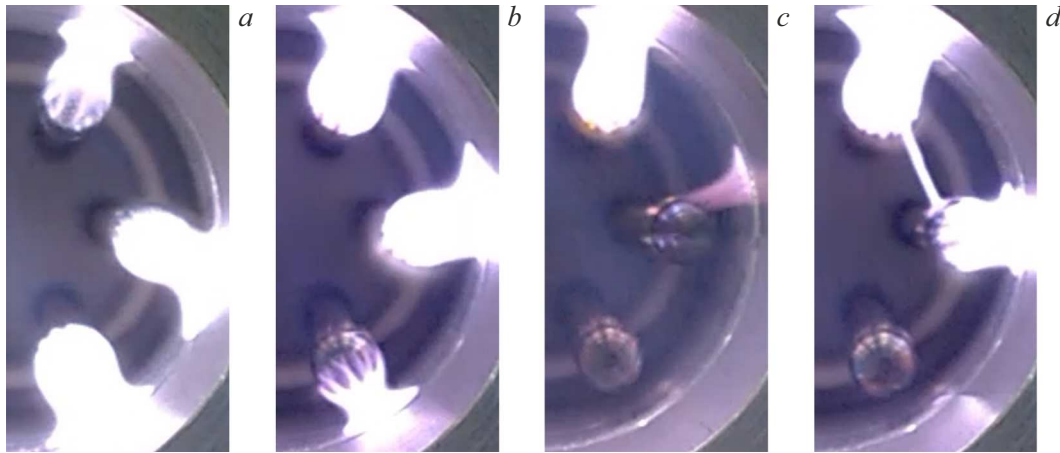


Рис. 4. СВЧ разряд в многоэлектродной плазменной горелке (вид со стороны выходного отверстия).

типа для получения холодных плазменных струй широкого диаметра, что представляет значительный интерес для разработки технологий плазменной модификации различных материалов.

#### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научно-фонда (проект № 21-79-30062).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] В.А. Трубников. *Физическая энциклопедия* (Большая Российская энциклопедия, М., 1992), т. 3, с. 327.
- [2] А.М. Кутепов, А.Г. Захаров, А.И. Максимов. *Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов* (Наука, М., 2004)
- [3] S. Vepřek, C. Eckmann, J.T. Elmer. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **8**, 445 (1988). DOI: 10.1007/BF01016059
- [4] P. Favia, R. d'Agostino. *Surf. Coat. Technol.*, **98** (1–3), 1102 (1998). DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00285-5
- [5] M. Dhayal, M.R. Alexander, J.W. Bradley. *Appl. Surf. Sci.*, **252** (22), 7957 (2006). DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.10.005
- [6] Y. Deslandes, G. Pleizier, E. Poiré, S. Sapieha, M.R. Wertheimer, E. Sacher. *Plasma Polym.*, **3**, 61 (1998). DOI: 10.1023/B:PAPO.0000005939.84830.44
- [7] N. Puač, Z.L. Petrović, M. Radetić, A. Djordjević. In *Materials Science Forum* (Trans. Tech. Publications Ltd, 2005), v. 494, p. 291. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.494.291
- [8] A.I. Al-Shamma'a, S.R. Wylie, J. Lucas, J.D. Yan. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **30** (5), 1863 (2002). DOI: 10.1109/TPS.2002.805371
- [9] J. Hnilica, L. Potočňáková, M. Stupavsk., V. Kudrle. *Appl. Surf. Sci.*, **288**, 251 (2014). DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.10.016
- [10] N. Srivastava, W. Chuji. *Plasma Sci. Technol.*, **21** (11), 115401 (2019). DOI: 10.1088/2058-6272/ab3248
- [11] J. Zhao, L. Nie. *Phys. Plasmas*, **26** (7), 073503 (2019). DOI: 10.1063/1.5092840
- [12] M. Narimisa, F. Krčma, Y. Onyshchenko, Z. Kozáková, R. Morent, N. De Geyter. *Polymers*, **12** (2), 354 (2020). DOI: 10.3390/polym12020354
- [13] S. Tiwari, A. Caiola, X. Bai, A. Lalsare, J. Hu. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **40**, 1 (2020). DOI: 10.1007/s11090-019-10040-7
- [14] J. Batur, Z. Duan, M. Jiang, R. Li, Y. Xie, X.F. Yu, J.R. Li. *Chem. Mater.*, **35** (10), 3867 (2023). DOI: 10.1021/acs.chemmater.2c03551
- [15] X.P. Lu, Z.H. Jiang, Q. Xiong, Z.Y. Tang, X.W. Hu, Y. Pan. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (8), 081502 (2008). DOI: 10.1063/1.2883945
- [16] R. Wang, H. Sun, W. Zhu, C. Zhang, S. Zhang, T. Shao. *Phys. Plasmas*, **24** (9), 093507 (2017). DOI: 10.1063/1.4998469
- [17] M. Laroussi. *Front. Phys.*, **8**, 74 (2020). DOI: 10.3389/fphy.2020.00074
- [18] Y. Yu, K. Huang, L. Wu. *Phys. Rev. E*, **102** (3), 031201 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevE.102.031201
- [19] H.Y. Kim, S.K. Kang, S.M. Park, H.Y. Jung, B.H. Choi, J.Y. Sim, J.K. Lee. *Plasma Process. Polym.*, **12** (12), 1423 (2015). DOI: 10.1002/ppap.201500017
- [20] G. Xia, Z. Chen, A.I. Saifutdinov, S. Eliseev, Y. Hu, A.A. Kudryavtsev. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **42** (10), 2768 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2329899
- [21] M. Laroussi, T. Akan. *Plasma Process. Polym.*, **4** (9), 777 (2007). DOI: 10.1002/ppap.200700066
- [22] M. Laroussi, X. Lu. *Appl. Phys. Lett.*, **87** (11), 113902 (2005). DOI: 10.1063/1.2045549
- [23] K. Yambe, S. Satou. *Phys. Plasmas*, **23** (2), 023509 (2016). DOI: 10.1063/1.4942170
- [24] Q.Y. Nie, Z. Cao, C.S. Ren, D.Z. Wang, M.G. Kong. *New J. Phys.*, **11** (11), 115015 (2009). DOI: 10.1088/1367-2630/11/11/115015
- [25] J.Y. Kim, J. Ballato, S.O. Kim. *Plasma Process. Polym.*, **9** (3), 253 (2012). DOI: 10.1002/ppap.201100190
- [26] M. Ghasemi, P. Olszewski, J.W. Bradley, J.L. Walsh. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46** (5), 052001 (2013). DOI: 10.1088/0022-3727/46/5/052001

- [27] R. Wang, H. Xu, Y. Zhao, W. Zhu, C. Zhang, T. Shao. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **39**, 187 (2019). DOI: 10.1007/s11090-018-9929-8
- [28] T. Shimizu, B. Steffes, R. Pompl, F. Jamitzky, W. Bunk, K. Ramrath, M. Georgi, W. Stolz, H.U. Schmidt, T. Urayama, S. Fujii, G.E. Morfill. *Plasma Process. Polym.*, **5** (6), 577 (2008). DOI: 10.1002/ppap.200800021
- [29] G. Isbary, J.L. Zimmermann, T. Shimizu, Y.F. Li, G.E. Morfill, H.M. Thomas, B. Steffes, J. Heinlin, S. Karrer, W. Stolz. *Clin. Plasma Med.*, **1** (1), 19 (2013). DOI: 10.1016/j.cpme.2012.11.001
- [30] T. Shimizu, Y. Ikehara. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (50), 503001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa945e
- [31] S. Arndt, A. Schmidt, S. Karrer, T. von Woedtke. *Clin. Plasma Med.*, **9**, 24 (2018). DOI: 10.1016/j.cpme.2018.01.002
- [32] T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59** (12), 120501 (2020). DOI: 10.35848/1347-4065/abc3a0
- [33] V.M. Chepelev, A.V. Chistolinov, M.A. Khromov, S.N. Antipov, M.K. Gadzhiev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1556** (1), 012091 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1556/1/012091
- [34] S.N. Antipov, M.A. Sargsyan, M.K. Gadzhiev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1698** (1), 012029 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1698/1/012029
- [35] S.N. Antipov, M.Kh. Gadzhiev, M.A. Sargsyan, D.V. Tereshonok, A.S. Tyuftyaev, D.I. Yusupov, A.V. Chistolinov, A.G. Abramov, A.V. Ugryumov. *Phys. Scr.*, **98** (2), 025604 (2023). DOI: 10.1088/1402-4896/acae65
- [36] S.N. Antipov, V.M. Chepelev, M.K. Gadzhiev, A.G. Abramov, A.V. Ugryumov. *Plasma Phys. Rep.*, **49** (5), 559 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23600299 (С.Н. Антипов, В.М. Чепелев, М.Х. Гаджиев, А.Г. Абрамов, А.В. Угрюмов. *Физика плазмы*, **49** (5), 407 (2023). DOI: 10.31857/S0367292122601382
- [37] Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, С.В. Синцов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, М.Е. Виктор. *Письма в ЖТФ*, **49** (1), 39 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.01.54057.19384 [D.A. Mansfeld, A.V. Vodoryanov, S.V. Sintsov, N.V. Chekmarev, E.I. Preobrazhensky, M.E. Viktorov. *Tech. Phys. Lett.*, **49** (1), 36 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55345.19384]
- [38] I.A. Ivanov, V.N. Tikhonov, A.V. Tikhonov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1393** (1), 012042 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012042
- [39] A.V. Chistolinov, R.V. Yakushin, M.A. Sargsyan, M.A. Khromov, A.S. Tyuftyaev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1394** (1), 012006 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1394/1/012006