

04.1

## Разряд атмосферного давления, поддерживаемый миллиметровым излучением в волноводном плазмотроне

© Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, С.В. Синцов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, М.Е. Виктор

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород, Россия  
E-mail: Mda1981@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 5 октября 2022 г.

В окончательной редакции 7 ноября 2022 г.

Принято к публикации 7 ноября 2022 г.

В разработанном волноводном плазмотроне с комбинированным напуском газа впервые получен и исследован неравновесный разряд, поддерживаемый при атмосферном давлении непрерывным СВЧ-излучением гиротрона с частотой 24 GHz. Показано, что в режиме стабилизации разряда в аргоне потоком углекислого газа температура электронов составляет 0.2–0.3 eV при температуре газа 1200–1500 K, а концентрация электронов не превышает критического значения для частоты нагрева в широком диапазоне мощности.

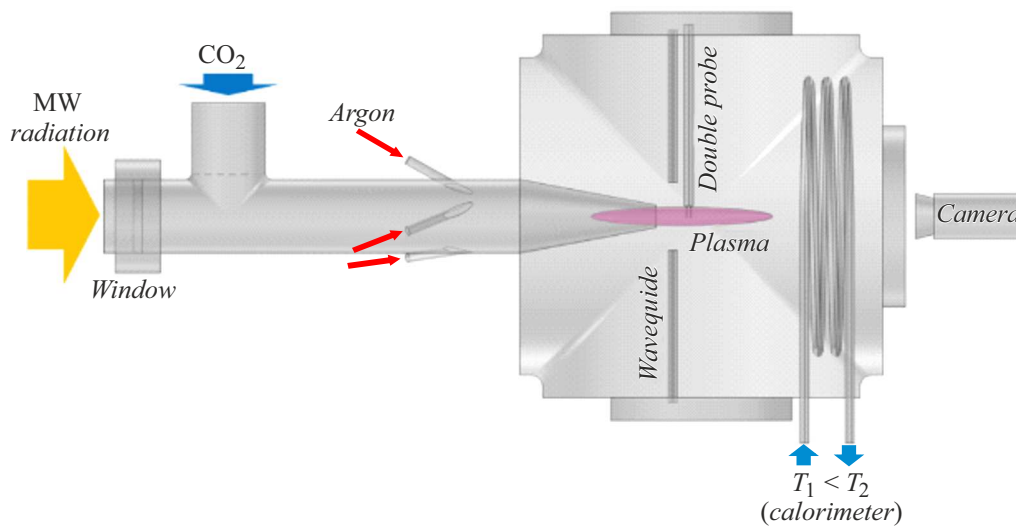
**Ключевые слова:** СВЧ-нагрев, разряд атмосферного давления, неравновесная плазма, гиротрон.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.01.54057.19384

В последнее время неравновесная плазма СВЧ-разрядов при атмосферном давлении все активнее находит применение в таких приложениях, как неразрушающая модификация и обработка потоками плазмы поверхностей полимерных и органических материалов, а также нанесение тонких органических пленок [1]. Не менее перспективное применение плазмы СВЧ-разрядов атмосферного давления связано с реализацией процессов разложения углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) [2,3], сухого риформинга метана [4] и фиксации азота (получение атомарного азота) [5]. За последние полвека было предложено множество видов СВЧ-разрядов атмосферного давления, в том числе разряды на поверхностной волне (сурфатрон), разряды с аксиальной инжекцией газа (ТИА, ТИAGO), СВЧ-разряды факельного типа [6]. В абсолютном большинстве разрядов в качестве источников СВЧ-излучения используются магнетроны с частотой 2.45 GHz и уровнем мощности от десятков ватт до нескольких киловатт. Основная проблема упомянутых разрядов заключается в том, что увеличение мощности нагрева приводит лишь к увеличению температуры газа и расширению области разряда, при этом температура и концентрация электронов практически не меняются: плазма становится равновесной. Одним из способов поддержания плазмы в неравновесных условиях является использование мощного электромагнитного излучения гиротронов на более высоких частотах по сравнению с традиционным излучением магнетронов на частоте 2.45 GHz. Использование коротковолнового излучения позволяет существенно увеличить удельный энергозатрат и тем самым реализовать неравновесные условия горения разряда, при которых температура электронов превышает температуру тяжелых частиц (молекул и атомов газа, возбужденных частиц). Кроме того, более

высокая частота нагрева позволяет существенно увеличить плотность плазмы, что в свою очередь увеличивает скорость протекания плазмохимических реакций [1].

В работе [7] нами был продемонстрирован и изучен неравновесный (температура электронов существенно превышала вращательную температуру молекул газа) режим горения СВЧ-разряда, поддерживаемого в квазиоптическом пучке микроволнового излучения гиротрона с частотой 24 GHz. В области перетяжки СВЧ-пучка размещалась металлическая трубка газового напуска диаметром 6 mm, по которой осуществлялась подача плазмообразующего газа. На срезе трубки газового напуска инициировался микроволновый разряд, представлявший собой плазменный факел с диаметром, равным диаметру трубки, и длиной до 5 cm. Одним из недостатков такого свободно локализованного разряда являлся низкий коэффициент поглощения СВЧ-излучения в плазме, не превышающий 10%. В работе [8] коэффициент поглощения удалось увеличить до 30–40% за счет размещения вблизи трубки напуска газа электродинамической структуры в виде усеченного металлического конуса. Использование подобной конической структуры позволяет не только увеличить плотность мощности излучения вблизи области перетяжки пучка, но и локализовать поток газа в замкнутой области энерговыделения, что приводит к повышению эффективности нагрева плазмы. Тем не менее основными недостатками конического плазматрона с квазиоптическим вводом излучения являются сравнительно большие потери мощности на узлах ввода и фокусировки СВЧ-излучения, высокие требования к точности юстировки электродинамической системы, а также необходимость размещения всех элементов электродинамической системы в металлической герметичной камере. В настоящей работе представлена конструкция



**Рис. 1.** Схема волноводного плазмотрона с комбинированной подачей газа и расширительной диагностической камерой.

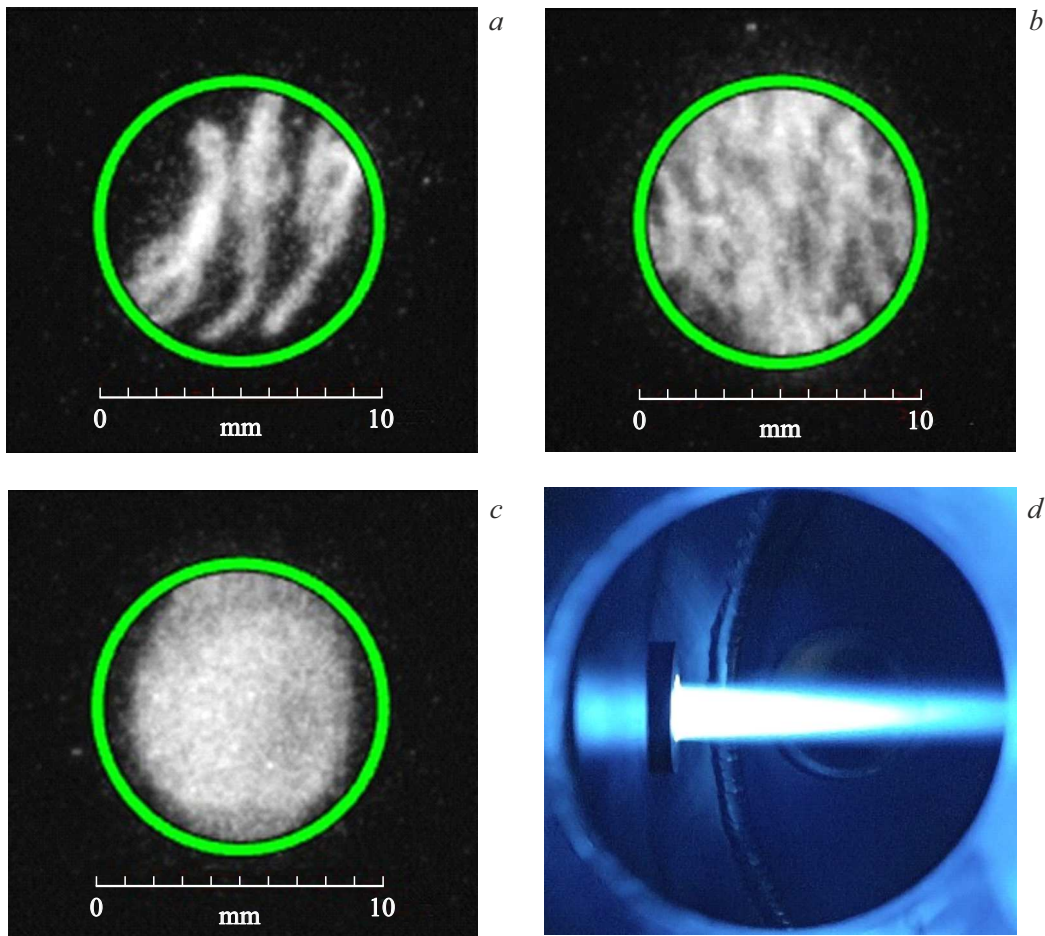
СВЧ-плазмотрона волноводного типа, в которой удалось преодолеть указанные недостатки.

Схема разработанного плазмотрона волноводного типа с комбинированной подачей газа приведена на рис. 1. СВЧ-нагрев осуществлялся с помощью непрерывного электромагнитного излучения технологического гиротрона с частотой 24 GHz и мощностью 20–5000 W. Плазмотрон является продолжением сверхразмерного волноводного тракта гиротрона с внутренним диаметром 32.6 mm, к которому он присоединен через вакуумное окно из нитрида бора. Волноводный плазмотрон структурно состоит из блока водяного охлаждения и узла подачи газа. С целью увеличения плотности мощности излучения волноводный тракт имеет плавное сужение в виде конического рупора длиной 60 mm с диаметром выходного отверстия 10 mm. Плазмотрон через стандартное вакуумное соединение CF160 подсоединен к расширительной камере, выполненной в виде стандартного шестипроходного креста. Внутри камеры расположен проточный калориметр, позволяющий проводить измерения мощности СВЧ-излучения, не поглощенной разрядом, с точностью 0.5 W.

Плазмообразующий газ (аргон) поступает в плазмотрон через три симметрично расположенные трубки, составляющие угол  $30^\circ$  с образующей цилиндра плазмотрона. Тангенциальный ввод газа позволяет формировать закрученные газовые потоки, тем самым ограничивая область контакта горячей плазмы со стенками волновода. Также в конструкции плазмотрона предусмотрен ввод защитного газа ( $\text{CO}_2$ ) через волноводный тройник со стороны входного СВЧ-окна. Необходимость подачи защитного газа обусловлена тем, что с ростом мощности возрастает вероятность возникновения разряда на поверхности СВЧ-окна.

Инициация разряда происходит кратковременным вводом в рупор тонкой металлической проволоки при мощ-

ности гиротрона около 190 W, что, согласно расчетам, соответствует величине электрического поля 480 V/cm. Закрученный поток аргона при атмосферном давлении подается через узел подачи газа с помощью регуляторов расхода Bronkhorst. Оптимальный диапазон потока аргона для зажигания разряда составляет 2–5 l/min. После зажигания разряда возможно уменьшение мощности нагрева — так называемое затягивание разряда (вплоть до  $\sim 20$  W). На рис. 2, a и b приведены фотографии оптического свечения плазмы аргона, сделанные с помощью высокочувствительной камеры Наногейт-24 с временем экспозиции 100 ns, расположенной вдоль оси системы и направленной на открытый конец рупора. При минимально возможной мощности гиротрона 22 W разряд находится целиком внутри конуса и представляет собой несколько вытянутых в поперечном направлении короткоживущих нитевидных плазменных образований (рис. 2, a). Коэффициент поглощения СВЧ-излучения плазмой составляет 30–35%, что объясняется малым размером нитей. С увеличением мощности вплоть до 190 W количество плазменных каналов увеличивается (рис. 2, b), и они практически полностью заполняют объем конуса. Плазменный факел при этом начинает выходить из конуса на несколько миллиметров, а коэффициент поглощения СВЧ-излучения увеличивается вплоть до 80%. При дальнейшем увеличении мощности разряд смещается в направлении навстречу СВЧ-излучению и загорается вблизи входного окна, после чего гаснет. Поэтому начиная со значений мощности 200–210 W стабильное горение разряда возможно при добавлении небольшого потока защитного газа со стороны СВЧ-окна. При добавлении минимально возможного потока  $\text{CO}_2$  (0.3 l/min) нитевидные структуры внутри конуса „размываются“: разряд приобретает диффузный вид (рис. 2, c). Как видно из фотографии, снятой с бокового направления обычным фотоаппаратом (рис. 2, d), разряд



**Рис. 2.** Фотографии разряда в аргоне при мощности  $\sim 20$  (a) и 190 W (b). c и d — фотографии с разных ракурсов разряда в аргоне и углекислом газе при мощности 210 W.

на выходе из рупора представляет собой плазменный факел длиной около 70 mm и диаметром 10–15 mm, состоящий из яркой горячей центральной части, окруженной областью возбужденного газа. Геометрические размеры плазменного факела полностью определяются соотношением потоков плазмообразующего и защитного газов, а также мощностью нагрева. Коэффициент поглощения уменьшается до 70–75%, что может быть связано с уменьшением концентрации плазмы из-за дополнительных потерь энергии на возбуждение молекул  $\text{CO}_2$ . Увеличение потока аргона слабо влияет на характер горения разряда, а добавление  $\text{CO}_2$  увеличивает диапазон допустимой мощности вплоть до 1 kW при потоке  $\text{CO}_2$ , равном 2 l/min.

В режиме стабильного горения разряда при потоке аргона 4.25 l/min и углекислого газа 0.4 l/min в плазменном факеле на расстоянии 6 mm от выхода плазмотрона были проведены измерения температуры и концентрации электронов. Измерения температуры проводились с помощью кратковременного (не более 10 s) внесения в плазменный факел двойного ленгмюровского зонда, закрепленного на подвижном манипуляторе. Измеря-

емая в эксперименте вольт-амперная характеристика в окрестности нуля с высокой точностью аппроксимируется экспонентой, что является подтверждением максвелл-болцмановского распределения. Исследования показали, что температура электронов на выходе из медного конуса практически не зависит от мощности нагрева и в диапазоне мощности 190–500 W составляет 0.2–0.3 eV при абсолютной погрешности измерений 0.05 eV. Похожая ситуация наблюдалась и в неравновесном факеле [7], что, по всей видимости, объясняется быстрой термализацией плазмы на выходе из-за высокой частоты столкновений электронов с нейтральными частицами. Температура газа оценивалась по измеряемой пирометром АКПП 9311 температуре помещаемой в плазменный факел проволоки из фехраля. Температура газа составляла 1200–1500 K, что меньше температуры электронов и свидетельствует о неравновесном характере поддержания разряда.

Определение концентрации плазмы проводилось методом прямого измерения набега фазы зондирующего излучения с частотой 58 GHz через слой плазмы. Данная схема хорошо себя зарекомендовала при измерении кон-

центрации химически активной плазмы и подробно описана в работе [9]. При мощности нагрева 200 W измеренный набег фазы составил  $1.5-2^\circ$ , что при характерном поперечном размере плазмы 10 mm соответствует концентрации электронов  $(1.9-2.5) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Суммарная погрешность измерения концентрации составляет не более  $0.7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . С повышением мощности концентрация электронов в плазменном факеле растет слабо и остается существенно меньше критического значения плотности  $7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  для частоты нагрева 24 GHz.

Таким образом, в разработанном плазмотроне получен разряд, поддерживаемый в неравновесном режиме СВЧ-излучением гиротрона с частотой 24 GHz при атмосферном давлении. Измеренные параметры плазмы позволяют говорить о перспективности применения плазменного факела для решения современных плазмохимических задач.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-12-00376).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M. Narimisa, F. Krčma, Y. Onyshchenko, Z. Kozáková, R. Morent, N. De Geyter, *Polymers*, **12**, 354 (2020). DOI: 10.3390/polym12020354
- [2] Y. Qin, G. Niu, X. Wang, D. Luo, Y. Duan, *J. CO<sub>2</sub> Util.*, **28**, 283 (2018). DOI: 10.1016/j.jcou.2018.10.003
- [3] M.Y. Ong, S. Nomanbhay, F. Kusumo, P.L. Show, *J. Clean. Prod.*, **336**, 130447 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130447
- [4] F. Zhang, X. Zhang, Z. Song, X. Li, X. Zhao, J. Sun, Y. Mao, X. Wang, W. Wang, *Fuel*, **331**, 125914 (2023). DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125914
- [5] S. Kelly, A. Bogaerts, *Joule*, **5**, 3006 (2021). DOI: 10.1016/j.joule.2021.09.009
- [6] J. Winter, R. Brandenburg, K.-D. Weltmann, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24**, 064001 (2015). DOI: 10.1088/0963-0252/24/6/064001
- [7] S. Sintsov, K. Tabata, D. Mansfeld, A. Vodopyanov, K. Komurasaki, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 305203 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/ab8999
- [8] D. Mansfeld, S. Sintsov, N. Chekmarev, A. Vodopyanov, *J. CO<sub>2</sub> Util.*, **40**, 101197 (2020). DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101197
- [9] S. Sintsov, D. Mansfeld, E. Preobrazhensky, R. Kornev, N. Chekmarev, M. Viktorov, A. Ermakov, A. Vodopyanov, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **42**, 1237 (2022). DOI: 10.1007/s11090-022-10280-0