

04

Особенности формирования нитевидной структуры микроволнового разряда в потоке аргона

© С.В. Синцов, А.В. Водопьянов, А.Н. Степанов, Д.А. Мансфельд, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, А.А. Мурзанев, А.В. Ромашкин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: sins@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 24 октября 2022 г.

Принято к публикации 25 октября 2022 г.

Представлены результаты экспериментального исследования пространственной структуры микроволнового разряда, поддерживаемого в потоке аргона излучением гиротрона в непрерывном режиме с частотой 24 GHz при атмосферном давлении. В структуре плазменного факела наблюдаются стационарные нитевидные каналы, вытянутые вдоль направления потока аргона, независимо от ориентации внешнего электрического поля волны, окруженные диффузионным ореолом. Проведены измерения электронной плотности, колебательной и вращательной температуры молекул газа в плазменных нитях. Обсуждена роль газодинамических механизмов, ответственных за формирование неоднородной статической структуры плазменного факела и поддержание в разряде существенно неравновесного распределения температурных характеристик.

Ключевые слова: микроволновый разряд высокого давления, плазменный факел, аргон, нитевидные плазменные каналы, филаменты.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54068.226-22

Введение

Изучение неравновесных микроволновых разрядов высокого давления является важной прикладной задачей. Актуальность исследований в этой области физики плазмы обусловлена в первую очередь потенциальными промышленными приложениями в задачах неравновесной плазмохимии [1–14]. Микроволновые разряды имеют высокую степень локализации энергии в области поддержания, ограниченную геометрией СВЧ пучка или волноведущей структуры, с характерным пространственным масштабом порядка длины волны греющего поля. Это обуславливает высокую плотность мощности в зоне поддержания разряда и возможность ее удаления от стенок камеры, что важно при проведении высокотемпературных процессов и работе с химически активными соединениями [2,4,8]. Микроволновые разряды широкого диапазона давлений характеризуются высокой электронной плотностью, близкой к критическому значению для частоты греющего поля, что также важно с точки зрения повышения эффективности и скорости процессов плазмохимического синтеза [10–14].

Микроволновые разряды высокого давления имеют неоднородную пространственную структуру [15–25]. Зачастую она определяется наличием в плазменном объеме тонких нитевидных каналов, ориентированных преимущественно вдоль электрического поля волны. Механизм возникновения таких нитей связывают с развитием ионизационно-перегретых неустойчивостей (ИПН) на флуктуациях плазменных параметров в разряде [15–25].

Ранее нашей научной группой было проведено исследование стационарного неравновесного плазменного факела, поддерживаемого в струе аргона, проникающей в окружающий воздух атмосферного давления, непрерывным миллиметровым излучением [10,26,27]. Разряд поддерживался в потоке аргона в области перетяжки СВЧ пучка с частотой 24 GHz и мощностью до 5 kW в непрерывном режиме. Было показано, что температура электронов в плазменном факеле в 5–7 раз превышает температуру газа. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования пространственной структуры такого подпорогового микроволнового разряда. Оказалось, что в нем наблюдаются стационарные нитевидные плазменные каналы, вытянутые вдоль направления потока аргона, температура газа в которых значительно превышает среднее значение для плазменного факела. Ориентация нитевидных каналов не зависит от направления электрического поля волны, что ранее в микроволновых разрядах не наблюдалось [4,9,15–20]. В настоящей работе обсуждается роль газодинамических механизмов, ответственных за формирование стационарной нитевидной структуры плазменного факела и поддержание в разряде существенно неравновесного распределения температурных характеристик.

1. Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В качестве источника СВЧ излучения в

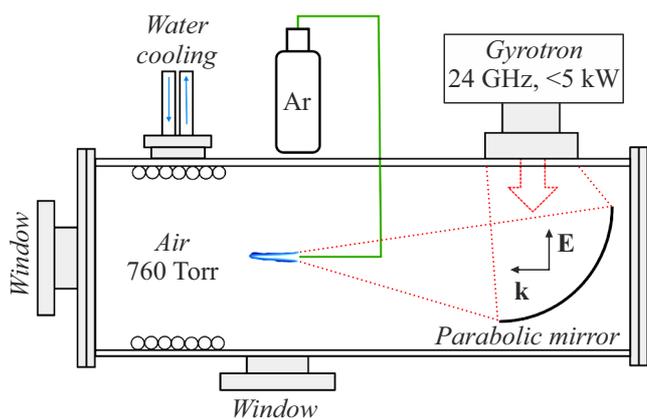


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

непрерывном режиме был использован технологический гиротрон с частотой излучения 24 GHz и мощностью до 5 kW [26,27]. Выходной гауссов пучок с линейной поляризацией вводился в цилиндрическую газоразрядную камеру, где фокусировался с помощью параболического зеркала на расстоянии 32 см от него по оси камеры. Длина перетяжки пучка составляет 11 см, максимальная плотность мощности в этой области до 3.4 kW/cm^2 , среднеквадратичное значение поля 1.1 kV/cm [26,27].

По оси симметрии пучка в области его перетяжки размещалась металлическая трубка с внешним диаметром 4 мм и внутренним 2 мм, по которой осуществлялась подача аргона. Положение среза трубки газового напуска соответствовало центру области перетяжки квазиоптического пучка. Расход аргона варьировался в пределах от 3 до 50 l/min. Непрерывный разряд инициировался в потоке аргона, истекающего в воздух атмосферного давления, с помощью высоковольтного искрового разряда. Возникающий плазменный факел был „привязан“ к срезу трубки газового напуска и вытянут вдоль направления истечения аргона, параллельно волновому вектору СВЧ пучка. Диаметр плазменного факела равен внешнему диаметру металлической трубки газового напуска. Площадь поперечного сечения плазменного факела была примерно в 10 раз меньше площади поперечного сечения пучка в области перетяжки.

На боковой поверхности цилиндрической газоразрядной камеры примерно в области перетяжки СВЧ пучка располагалось окно, через которое осуществлялась диагностика разряда. Внутри камеры также располагался калиброванный водоохлаждаемый калориметр, с помощью которого можно было измерить долю мощности, не поглощенную разрядом. Мощность, поглощенная разрядом, вычислялась как разница между выходной мощностью СВЧ источника и мощностью, поглощенной калиброванным калориметром. Для всех режимов поддержания поглощенная разрядом мощность была примерно в 10 раз меньше введенной в газоразрядную камеру СВЧ мощности, что примерно соответствовало

отношению площадей поперечных сечений плазменного факела и квазиоптического пучка в области перетяжки.

2. Структура плазменного факела

На рис. 2 представлена фотография микроволнового разряда атмосферного давления, поддерживаемого непрерывным излучением с частотой 24 GHz. Разряд удавалось инициировать при минимальной выходной мощности СВЧ излучения на уровне 0.9 kW, что соответствует среднеквадратичному электрическому полю в фокусе примерно 0.6 kV/cm . Увеличение мощности нагрева до 5 kW приводило к линейному увеличению светящейся плазменной области до 42 мм без изменения ее структуры и диаметра. Изменение потока аргона в пределах от 5 до 20 l/min не влияло на форму и размер разряда [26]. Плазменный факел состоял из нитевидных каналов (филамент) и окружающего их диффузионного ореола (рис. 2). Филаменты были вытянуты вдоль направления потока газа и „привязаны“ к срезу трубки газового напуска. При минимальной мощности поддержания разряда в факеле наблюдалась 1 нить, а при максимальной мощности их количество возрастало до 10–12. С увеличением мощности нагрева длина филамента увеличивалась вместе с длиной самого плазменного факела, а их диаметр не изменялся. Положение плазменных нитей оказалось фиксированным на срезе трубки газового напуска. Ее вращение вокруг своей оси приводило к соответствующему сдвигу положения каждой из филамент. Это говорит о том, что место возникновения плазменных нитей на срезе металлической трубки газового напуска обусловлено скорее всего наличием неровностей, характерный размер которых не превышает $100 \mu\text{m}$.

Действительно, в момент инициирования разряда при минимальной мощности нагрева, равной 0.9 kW, электрическое поле в области разряда примерно в 3 раза

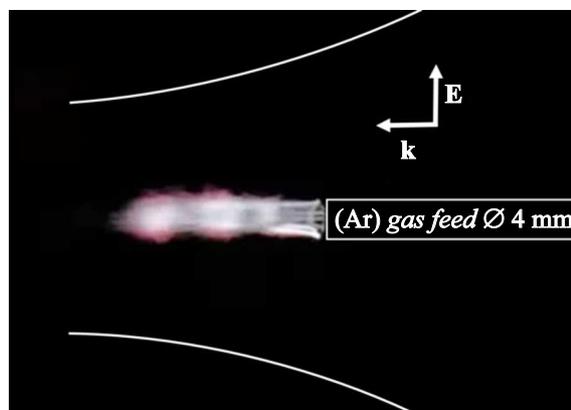


Рис. 2. Фотография плазменного факела, поддерживаемого в потоке аргона непрерывным микроволновым излучением с частотой 24 GHz в воздухе при атмосферном давлении. Поток аргона 15 l/min, мощность СВЧ излучения 4 kW.

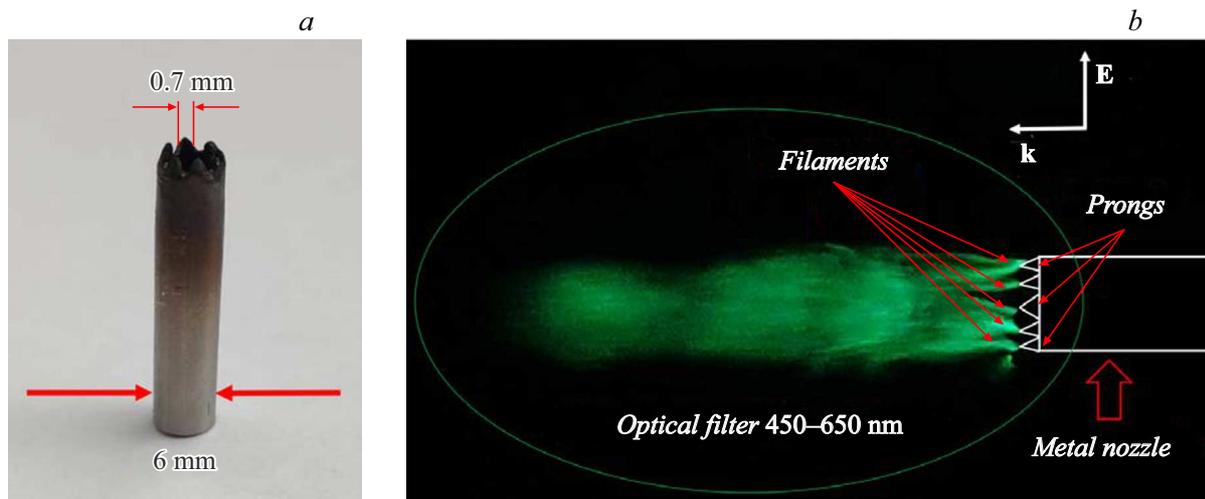


Рис. 3. *a* — фотография трубки-насадки с шестью зубьями; *b* — фотография плазменного факела, поддерживаемого на срезе трубки-насадки.

меньше пробойного уровня для аргона при нормальных условиях [28]. Усиление поля на острие в несколько раз локально приводило к выполнению условия существования области поддержания самостоятельного разряда. При увеличении внешнего электрического поля СВЧ волны пробойные условия начинают выполняться и на других неровностях среза трубки газового напуска, что приводит к увеличению областей существования самостоятельного разряда, и, следовательно, к увеличению количества плазменных нитей.

Для проверки этой гипотезы были изготовлены специальные металлические трубки-насадки с внешним диаметром 6 mm и внутренним 4 mm, которые надевались на исходную трубку газового напуска (рис. 3, *a*). На срезе трубки-насадки были сделаны 6 зубьев треугольной формы с характерным размером 0.7 mm. На рис. 3, *b* представлена фотография плазменного факела, инициированного в потоке аргона на срезе трубки-насадки с шестью зубьями. Фотография сделана через оптический фильтр с полосой пропускания 450–650 nm для наилучшей демонстрации контура плазменных нитей. При мощности нагрева более 2 kW в плазменном факеле наблюдались филаменты, количество которых равно количеству зубьев на металлической трубке-насадке.

Таким образом, возникновение филамент было однозначно привязано к каждому из имеющихся зубьев на трубке-насадке. Дальнейшее увеличение мощности нагрева не приводило к появлению новых филамент. Стоит отметить, что в отличие от эксперимента с ровным срезом трубки газового напуска (размер неровностей менее 100 μm), филаменты имеют меньшую длину и немного искривляются относительно основного направления потока аргона. Это связано с тем, что поток плазмообразующего газа (аргона) искажается при обтекании металлических зубьев. Кроме того, вместе с

газовым потоком на неровностях среза трубки газового напуска искажает свою ориентацию и электрическое поле, которое в свою очередь также могло внести вклад в искривление филамент. Чтобы выяснить роль ориентации электрического поля СВЧ волны в формировании филамент была проведена дополнительная серия экспериментов.

Ориентация среза трубки газового напуска (без насадки, с внешним диаметром 4 mm) изменялась относительно направления распространения волны и направления вектора напряженности электрического поля. На рис. 4 представлены фотографии разряда при различных ориентациях волнового вектора и электрического поля волны относительно направления потока плазмообразующего газа. Рис. 4, *a* — исходная ориентация, исследованная в прошлых работах, где поток аргона ориентирован вдоль направления распространения СВЧ поля и перпендикулярен электрическому полю. Рис. 4, *b* — поток аргона подавался под углом 40° относительно направления распространения волны и под углом 50° относительно электрического поля волны. Рис. 4, *c* — направление потока газа перпендикулярно и волновому вектору, и вектору электрического поля (фото сделано через окно с торца камеры). Рис. 4, *d* — направление потока газа параллельно вектору напряженности электрического поля и перпендикулярно волновому вектору волны. Во всех случаях пространственное положение среза трубки газового напуска подбиралось таким образом, чтобы плазменный факел находился целиком в области перетяжки пучка. Можно видеть, что яркие нитевидные каналы появляются в плазменном факеле независимо от ориентации направления потока газа относительно СВЧ пучка. Филаменты при любой ориентации трубки газового напуска возникали на ее срезе и были вытянуты вдоль направления потока газа. Это говорит о том, что механизм формирования неоднородной ста-

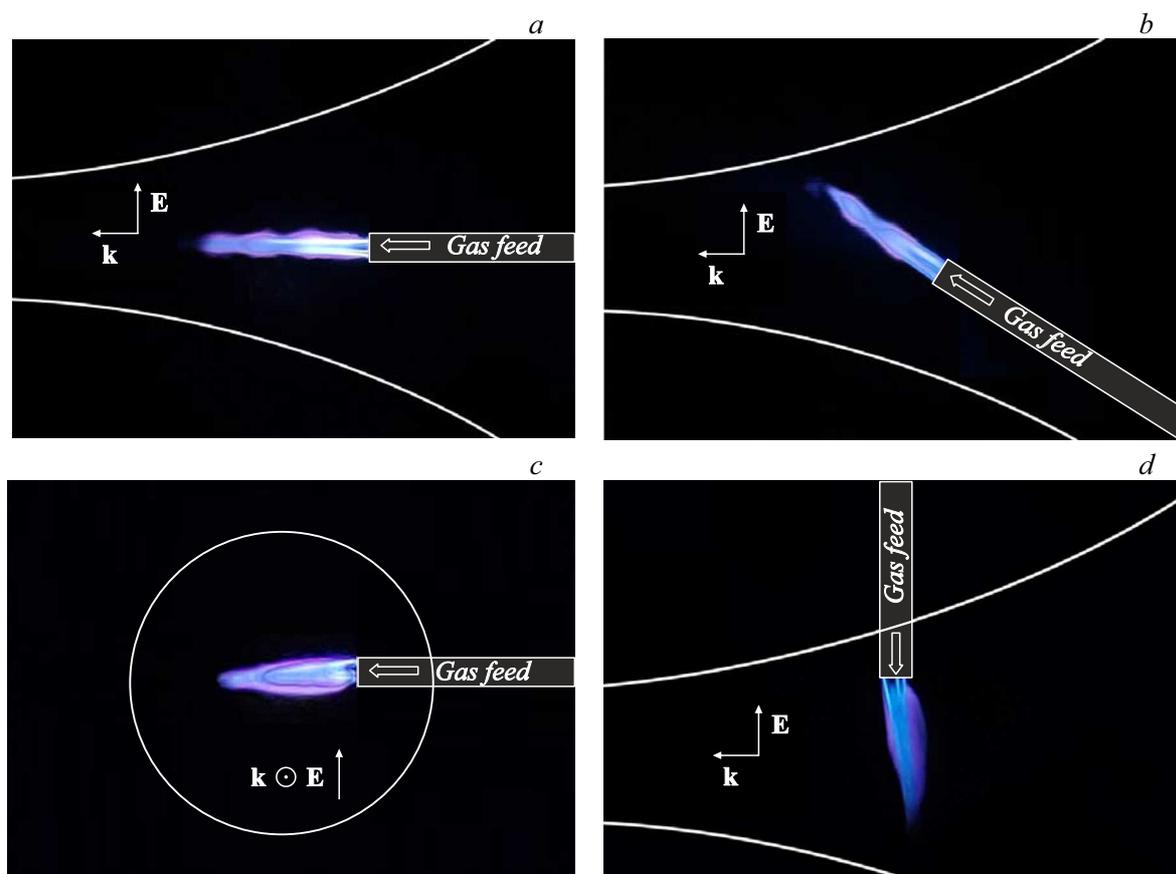


Рис. 4. Фотографии плазменного факела при различных ориентациях волнового вектора и электрического поля волны относительно направления потока аргона.

ционарной структуры разряда в потоке газа определяется в основном протекающими газодинамическими процессами.

3. Оптическая интерферометрия плазменного факела

С помощью лазерной оптической интерферометрии было проведено исследование пространственного распределения показателя преломления газа в области поддержания плазменного факела. Суть данного метода заключается в определении дополнительного набега фазы зондирующего лазерного луча, приобретаемого при прохождении через область, содержащую плазменный факел. Поскольку при концентрации плазмы в разряде $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ вклад электронной компоненты в изменение показателя преломления много меньше, чем его изменение, связанное с уменьшением плотности газа за счет нагрева, то интерферометрические данные позволяют получить в изобарическом приближении распределение температуры газа в области поддержания разряда [29].

В эксперименте была использована схема интерферометра Майкельсона. В качестве источника зондирующе-

го излучения использовался непрерывный полупроводниковый лазер с длиной волны 532 nm и мощностью 10 mW. Зондирующий лазерный пучок большого диаметра проходил через область, в которой возникала плазма. Часть пучка, проходившая мимо разряда, являлась опорным сигналом в схеме интерферометра.

Для численной обработки полученных интерферограмм был использован программный пакет IDEA 1.7 [30]. На рис. 5 приведена картина распределения набега фазы зондирующего излучения в области поддержания разряда, время экспозиции 3 s, мощность СВЧ излучения 0.9 kW. Синий прямоугольник, расположенный слева, соответствует положению среза трубки газового напуска. Однотонная синяя область в правом верхнем углу показывает границу видимости зондирующего пучка.

На рисунке отчетливо видно пространственное распределение фазы, вызванное единственным филаментом, возникающим в разряде в данном режиме. При большей мощности нагрева, когда в факеле присутствует несколько филаментов, картина распределения фазы становится более сложной для интерпретации из-за наложения таких фазовых распределений от нескольких плазменных нитей.

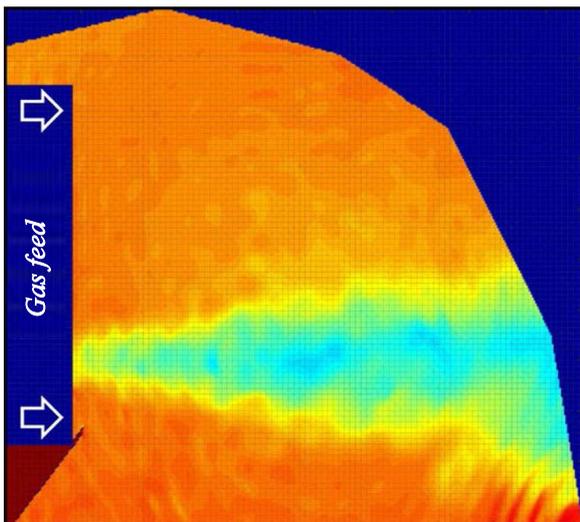


Рис. 5. Интерференционная картина распределения набега фазы зондирующего излучения в области поддержания разряда.

Оценка температуры газа по полученной картине распределения фазы зондирующего излучения была выполнена с использованием преобразования Абеля в предположении цилиндрической симметрии плазменного факела. Чувствительность проведенных интерферометрических измерений не позволила определить плотность газа, соответствующую температуре более 1400 К. В результате проведенных оценок было получено, что температура газа в рамках конического контура филаменты превышает 1400 К, а в окружающей его области плазменного ореола составляет величину не более 600 К. Цветовая гамма картины в рамках конической области наиболее искаженного набега фазы не изменяется, поскольку находится в насыщении по чувствительности. Внутри области насыщения есть более высокотемпературная нитевидная область, соответствующая контуру визуально наблюдаемого в оптическом диапазоне филамента. На полученной картине распределения фазы зондирующего излучения можно видеть, как горячий газ из филамента расширяется по мере удаления от среза трубки, формируя на удалении 4–5 мм от среза трубки газового напуска высокотемпературную зону разряда. Можно предположить, что разлет возбужденных частиц газа и свободная диффузия носителей заряда из филамент улучшают пробойные условия в окружающей их ореоле, который является областью несамостоятельного разряда. Излучение филамент в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн и механизм газодинамического выноса плазмы из высокотемпературной зоны плазменных каналов могут определять существенно неравновесное распределение температурных характеристик, реализованное в плазменном ореоле в соответствии с проведенными ранее измерениями [10,26,27].

4. Оптическая эмиссионная спектроскопия плазменного факела

При скорости расхода аргона из трубки газового напуска более 30 л/мин был реализован специфический режим поддержания разряда, в котором удалось выделить плазменные нити из плазменного ореола. На рис. 6 представлена фотография плазменного факела в режиме с большой скоростью подачи аргона. Можно видеть, что в области около среза трубки газового напуска наблюдаются „оголенные“ филаменты. На расстоянии 6 мм от среза трубки газового напуска плазменные нити окружены ореолом, как это было и при меньших потоках аргона (рис. 2).

Эмиссионные спектры были получены с помощью спектрометра-монокроматора схемы Черни–Тернера MS5204i фирмы SOL Instruments с высокочувствительной CCD-матрицей. Спектры записывались в диапазоне 300–000 нм с дискретизацией 0.028 нм. Ширина аппаратной функции спектрометра была определена по излучению калибровочной неоновой лампы и составила 0.15 нм [31,32]. Эмиссионные спектры были сняты через кварцевое окно, расположенное сбоку газоразрядной камеры, напротив области фокусировки СВЧ пучка (рис. 1). С помощью системы кварцевых линз было сформировано изображение факела, что позволило получить отдельно эмиссионные спектры как области перед срезом трубки газового напуска с „оголенными“ филаментами, так и удаленной области разряда — плазменного факела, который состоит из филамент и окружающих их диффузионного ореола. По электронно-колебательно-вращательным спектрам второй положительной системы азота, подмешиваемого в плазменный факел из окружающей атмосферы воздуха, были определены колебательная и вращательная температуры в филаментах и в плазменном факеле. Методика оценки широко известна и подробно описана в [33–36]. Вращательная температура ввиду высокой скорости столкновений при атмосферном давлении в условиях эксперимен-



Рис. 6. Фотография плазменного факела, поддерживаемого в потоке аргона непрерывным излучением с частотой 24 ГГц в воздухе при атмосферном давлении. Поток аргона 40 л/мин, мощность СВЧ излучения 3 кВт.

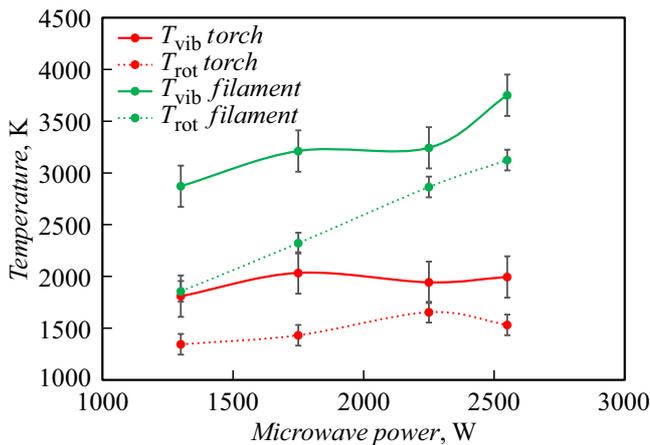


Рис. 7. Зависимости колебательной и вращательной температур азота в плазменном факеле (красный (в онлайн версии)) и в филаментах (зеленый (в онлайн версии)). T_{vib} — колебательная температура; T_{rot} — вращательная температура.

та примерно равна температуре газа, что в дальнейшем будет использоваться для оценок.

На рис. 7 представлены результаты измерения вышеуказанных температурных характеристик. Можно видеть, что колебательная и вращательная температуры азота в филаментах на 1000–1500 К выше, чем соответствующие температуры в плазменном факеле. Вращательная температура молекул азота увеличивается с ростом вводимой мощности от 2000 до 3000 К.

При температуре газа на уровне 3000 К эффективное давление газа (давление газа окружающей среды, умноженное на отношение температур окружающей среды и плазмы) в филаментах равно примерно 80 Torr, что близко к минимуму пробойной кривой аргона для электромагнитного излучения с частотой 24 GHz и диффузионной длины 0.4 mm [28]. При таком эффективном давлении внешнее электрическое поле СВЧ волны является пробойным, а разряд в филаментах — самостоятельным. Температурные характеристики самого плазменного факела, состоящего из филамент и ореола, соответствуют примерно среднему значению температур филамент и плазменного ореола, измеренным в прошлых работах [26,27]. Можно видеть, что увеличение мощности нагрева, которое приводит к увеличению длины факела, не влечет за собой увеличение интегральных температурных характеристик плазменного факела, что свидетельствует о большом числе неупругих столкновительных процессов с молекулами.

С другой стороны, колебательная и вращательная температуры азота в филаментах заметно растут с увеличением мощности нагрева, поскольку доля подмешиваемых молекулярных газов в них существенно меньше.

Измерение электронной плотности было проведено по уширению водородных линий H_α и H_β серии Бальмера за счет линейного эффекта Штарка. Водород исходно

подмешивался в плазмообразующий газ, его концентрация составляла не более 5%. Методика подсчета электронной плотности таким способом подробно описана в [37–41]. В результате было получено, что уширение вышеуказанных линий в плазменном факеле не превышает величину, близкую к ширине аппаратной функции спектрометра. С учетом доступной точности измерений эмиссионных спектров, уширение водородных линий в факеле соответствует электронной плотности, меньшей 10^{14} cm^{-3} . Уширение водородных линий серии Бальмера в филаментах заметно превышает ширину аппаратной функции спектрометра и величину уширения, обусловленную доплеровским и вандерваальсовским механизмами. Пересчет величины уширения водородных линий в филаментах, обусловленной линейным эффектом Штарка, позволяет оценить электронную плотность на уровне $(7 \pm 3) \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$. Электронная плотность в пределах доверительного интервала не зависела от мощности нагрева (поток аргона фиксирован и превышает 30 l/min). Полученная оценка электронной плотности в филаментах на два порядка превышает критическое значение для частоты внешнего поля, которое составляет $7 \cdot 10^{12}\text{ cm}^{-3}$. Стоит отметить, что вращательная температура в плазменных нитях измерена по эмиссионному излучению азота, который подмешивается из окружающей атмосферы. Поэтому полученные по этому методу оценки температуры газа по большей части характеризуют температуру внешней оболочки оголенных филамент. Электронная плотность, измеренная по уширению эмиссионных линий водорода, несет информацию о внутренних областях филамент, где температура может быть выше. Филаменты являются областью самостоятельного разряда, поэтому температурные характеристики внутри нитей имеют равновесное распределение, а электронная плотность напрямую связана с температурой газа по соотношению Саха [28]. Тогда измеренной электронной плотности внутри филамент соответствует температура газа, приблизительно равная 7000 К. Однако экспериментально подтвердить такую оценку не удалось.

5. Обсуждение

Результаты выполненных экспериментов свидетельствуют, что структура непрерывного микроволнового разряда в потоке аргона при атмосферном давлении является существенно неоднородной. Наблюдаются нитевидные плазменные каналы, ориентированные вдоль направления потока аргона, независимо от направления внешнего электрического поля волны. Это означает, что механизм формирования таких филамент напрямую обусловлен газодинамическими стационарными процессами, протекающими в области поддержания разряда. В момент инициирования разряда в потоке газа пробойные условия выполняются только в областях усиления поля на неровностях среза трубки газового

напуска, что приводит к формированию сильно локализованной области самостоятельного разряда, „обдуваемой“ холодным плазмообразующим газом. Именно такая точка „привязывает“ возникающие стационарные филаменты к срезу трубки газового напуска. Дальнейшее вытягивание филамент из локализованной области самостоятельного разряда не может быть обусловлено развитием ионизационно-перегревными неустойчивостями, поскольку в допробойных условиях поддержания разряда рост частоты ионизации на флуктуациях плазменных параметров ограничен. Тогда вытягивание плазменных каналов может быть связано с теплопроводностным нагревом газа на переднем фронте точечной области самостоятельного разряда. Направление вытягивания филамент определяется направлением потока газа, а их поперечный рост ограничен потоком „холодного“ плазмообразующего газа, обтекающего филаменты. Постепенный теплопроводностный прогрев в формируемом плазменном канале снижает плотность газа до тех пор, пока внешнее электрическое поле волны не станет пробойным, а разряд самостоятельным в непрерывном режиме.

Такой механизм формирования стационарных филамент в подпороговом разряде в потоке газа хорошо согласуется с полученными экспериментальными оценками плазменных параметров. Было надежно продемонстрировано, что температура газа в филаментах значительно превышает температуру газа в плазменном ореоле и составляет 2000–3000 К в зависимости от мощности нагрева. При температуре газа на уровне 3000 К эффективное давление газа в филаментах равно примерно 80 Torr, что близко к минимуму пробойной кривой аргона для электромагнитного излучения с частотой 24 GHz. При температуре 2000 К эффективное давление примерно равно 120 Torr, а величина напряженности электрического поля волны в области поддержания разряда достигает пробойного значения [28].

Совместная эволюция электромагнитного поля и плазмы в условиях непрерывного СВЧ разряда в потоке газа приводит к эффективному нагреву стационарных плазменных каналов. Экспериментально было показано, что электронная плотность в нитевидных каналах на 2 порядка превышает критическую для частоты греющего поля и составляет $(7 \pm 3) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Это свидетельствует о возможной трансформации СВЧ поля в поверхностную волну, обеспечивающей самосогласованный нагрев за критической плазмы вдоль всей длины нитевидных каналов. Проведенные оценки показывают, что длина распространения такой поверхностной волны, направляемой филаментами, может быть много больше диаметра плазменного канала и глубины скин-слоя, и ограничена размерами области сильного поля в области перетяжки СВЧ пучка. С другой стороны, формирование филамент происходит независимо от ориентации электрического поля волны, поэтому однозначно утверждать о существовании механизма трансформации СВЧ

излучения в поверхностную волну на данном этапе исследований нельзя.

УФ излучение филамент и газодинамический вынос возбужденных частиц из нитевидной области самостоятельного разряда приводит к эффективному поглощению СВЧ поля в области несамостоятельного разряда — плазменного ореола, который визуально составляет основной объем плазменного факела. По всей видимости, такой неравновесный механизм возбуждения газа в области несамостоятельного разряда позволяет реализовать в плазменном ореоле существенно неравновесное распределение температурных характеристик, измерение которых было проведено в прошлых работах [26,27]. Такой тип неравновесного непрерывного разряда атмосферного давления может быть использован для решения ряда задач современной промышленной плазмохимии [1–14]. Эффективность его использования для разрушения молекулярных соединений с высокой энергией связи продемонстрирована на примере задачи утилизации углекислого газа [10].

Выводы

В результате проведенного экспериментального исследования непрерывного микроволнового разряда в потоке аргона при атмосферном давлении было показано, что формируемые нитевидные плазменные каналы ориентированы вдоль направления потока плазмообразующего газа, независимо от направления внешнего электрического поля волны. Это означает, что механизм формирования таких филамент напрямую обусловлен газодинамическими стационарными процессами, протекающими в области поддержания разряда. Температурные характеристики плазменных каналов значительно превышают соответствующие средние значения для плазменного факела, а электронная плотность на 2 порядка превышает критическую для частоты греющего поля. УФ излучение филамент и газодинамический вынос возбужденных частиц из нитевидной области самостоятельного разряда приводит к эффективному поглощению СВЧ поля в области несамостоятельного разряда — плазменного ореола, где реализовано существенно неравновесное распределение температурных характеристик.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность С.В. Голубеву и В.Б. Гильденбургу за проявленный интерес к работе и ценные замечания.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00376).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Yu.A. Lebedev. *Polymers*, **13** (11), 1678 (2021). DOI: 10.3390/polym13111678
- [2] N.S. Akhmadullina, N.N. Skvortsova, E.A. Obraztsova, V.D. Stepakhin, E.M. Konchekov, A.A. Letunov, A.A. Kononov, Yu.F. Kargin, O.N. Shishilov. *Chem. Phys.*, **516**, 63 (2019). DOI: 10.1016/j.chemphys.2018.08.023
- [3] Y. Hong, J. Niu, J. Pan, Z. Bi, W. Ni, D. Liu, J. Li, Y. Wu. *Vacuum*, **130**, 130 (2016). DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.012
- [4] К.В. Артемьев, Г.М. Батанов, Н.К. Бережечкая, В.Д. Борзосек, С.И. Грицинин, А.М. Давыдов, Л.В. Колик, Е.М. Кончечков, И.А. Косский, Ю.А. Лебедев, И.В. Моряков, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, В.Д. Степахин, Н.К. Харчев, В.А. Шахатов. *Физика плазмы*, **46** (3), 264 (2020). DOI: 10.31857/S0367292120030014 [K.V. Artem'ev, G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, V.D. Borzosekov, S.I. Gritsinin, A.M. Davydov, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, I.A. Kossyi, Yu.A. Lebedev, I.V. Moryakov, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, V.A. Shakhmatov. *Plasma Phys. Reports*, **46** (3), 311 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20030010]
- [5] L.F. Spencer, A.D. Gallimore. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **22** (1), 015019 (2012). DOI: 10.1088/0963-0252/22/1/015019
- [6] K.V. Artem'ev, G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, A.M. Davydov, I.A. Kossyi, V.I. Nefedov, K.A. Sarksyian, N.K. Kharchev. *J. Physics: Conf. Series*, **907**, 012022 (2017). DOI: 10.1088/1742-6596/907/1/012022
- [7] P.G. Sennikov, R.A. Kornev, A.I. Shishkin. *Plasma Chem. Plasma Proces.*, **37** (4), 997 (2017). DOI: 10.1007/s11090-017-9821-y
- [8] A.V. Vodopyanov, S.V. Golubev, D.A. Mansfeld, P.G. Sennikov, Yu.N. Drozdov. *Rev. Sci. Instrum.*, **82** (6), 063503 (2011). DOI: 10.1063/1.3599618
- [9] А.Л. Вихарев, В.Б. Гильденбург, С.В. Голубев, Б.Г. Еремин, О.А. Иванов, А.Г. Литвак, А.Н. Степанов. *ЖЭТФ*, **94** (4), 136 (1988). [A.L. Vicharev, V.B. Gildenburg, S.V. Golubev, B.G. Eremin, O.A. Ivanov, A.G. Litvak, A.N. Stepanov, A.D. Yunakovskii. *Sov. Phys. JETP*, **67** (4), 724 (1988).]
- [10] D. Mansfeld, S. Sintsov, N. Chekmarev, A. Vodopyanov. *J. CO2 Utilization*, **40**, 101197 (2020). DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101197
- [11] С.В. Синцов, Е.И. Преображенский, Р.А. Корнев, А.В. Водопьянов, Д.А. Мансфельд. *Приборы и техника эксперимента*, **3**, 56 (2022). DOI: 10.31857/S0032816222030053 [S.V. Sintsov, E.I. Preobrazhensky, R.A. Kornev, A.V. Vodopyanov, D.A. Mansfeld. *Instrum. Experiment. Techniq.*, **65** (3), 419 (2022). DOI: 10.1134/S0020441222030058]
- [12] S. Sintsov, D. Mansfeld, E. Preobrazhensky, R. Kornev, N. Chekmarev, M. Viktorov, A. Ermakov, A. Vodopyanov. *Plasma Chem. Plasma Proces.*, **42** (6), 1237 (2022). DOI: 10.1007/s11090-022-10280-0
- [13] Р.А. Корнев, П.Г. Сенников, Л.В. Шабарова, А.И. Шихкин, Т.А. Дроздова, С.В. Синцов. *Химия высоких энергий*, **53** (3), 235 (2019). DOI: 10.1134/S0023119319030100 [R.A. Kornev, P.G. Sennikov, L.V. Shabarova, A.I. Shishkin, T.A. Drozdova, S.V. Sintsov. *High Energy Chem.*, **53** (3), 246 (2019). DOI: 10.1134/S001814391903010X]
- [14] R.A. Kornev, P.G. Sennikov, S.V. Sintsov, A.V. Vodopyanov. *Plasma Chem. Plasma Proces.*, **37** (6), 1655 (2017). DOI: 10.1007/s11090-017-9846-2
- [15] В.Б. Гильденбург, А.В. Ким. *Физика плазмы*, **6** (4), 904 (1980). [V.B. Gildenburg, A.V. Kim. *Phys. Plasmas*, **6** (4), 496 (1980).]
- [16] Ю.Я. Бродский, И.П. Венедиктов, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, И.А. Косский. *Письма в ЖТФ*, **10** (3), 187 (1984). [Y.Y. Brodskii, I.P. Venediktov, S.V. Golubev, V.G. Zorin, I.A. Kossyi. *Tech. Phys. Lett.*, **10** (2), 77 (1984).]
- [17] S.I. Gritsinin, I.A. Kossyi, V.P. Silakov, N.M. Tarasova. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29** (4), 1032 (1996). DOI: 10.1088/0022-3727/29/4/013
- [18] В.Г. Аветисов, С.И. Грицинин, А.В. Ким, И.А. Косский, А.Ю. Костянский, М.А. Мисакян, А.И. Надеждинский, Н.М. Тарасова, А.Н. Хуснутдинов. *Письма в ЖЭТФ*, **51** (6), 306 (1990). [V. Avetisov, S. Gritsinin, A. Kim, I. Kossyi, A. Kostinskii, M. Misakyan, A. Nadezhdinskii, N. Tarasova, A. Khunutdinov. *Sov. J. Experiment. Theor. Phys. Lett.*, **51**, 348 (1990).]
- [19] K.V. Aleksandrov, V.L. Bychkov, I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev, A.A. Ravaev, I.B. Matveev. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **37** (12), 2293 (2009). DOI: 10.1109/TPS.2009.2026175
- [20] К. Khodataev. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (Reno, Nevada, 2008), DOI: 10.2514/6.2008-1405
- [21] А.А. Скворода, А.В. Звонков. *ЖЭТФ*, **119**, 91 (2001). [A.A. Skovoroda, A.V. Zvonkov. *J. Experiment. Theor. Phys.*, **92** (1), 78 (2001). DOI: 10.1134/1.1348463]
- [22] Y.C. Hong, H.S. Uhm, S.C. Cho. *J. Korean Phys. Society*, **53** (6), 3220 (2008). DOI: 10.3938/jkps.53.3220
- [23] G.M. Batanov, S.I. Gritsinin, I.A. Kossyi. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35** (20), 2687 (2002). DOI: 10.1088/0022-3727/35/20/332
- [24] S.I. Gritsinin, I.A. Kossyi, V.P. Silakov, N.M. Tarasova. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29** (4), 1032 (1996). DOI: 10.1088/0022-3727/29/4/013
- [25] B. Chaudhury, J.-P. Boeuf, G.Q. Zhu. *Phys. Plasmas*, **17**(12), 123505 (2010). DOI: 10.1063/1.3517177
- [26] S. Sintsov, A. Vodopyanov, D. Mansfeld. *AIP Advances*, **9** (10), 105009 (2019). DOI: 10.1063/1.5115326
- [27] S. Sintsov, K. Tabata, D. Mansfeld, A. Vodopyanov, K. Komurasaki. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53** (30), 305203 (2020). DOI: 1361-6463/ab8999
- [28] М.Ю. Райзер. *Физика газового разряда* (Наука, М., 1992)
- [29] Т. Бармашова, А.В. Сидоров, А.В. Водопьянов, А. Лучинин, А. Мурзанев, С. Разин, А. Степанов, А. Веселов. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1–1 (2022). DOI: 10.1109/THZ.2022.3164546
- [30] Т. Бармашова, А. Лучинин, А. Мурзанев, А. Сидоров, А. Степанов, А. Веселов, А. Водопьянов. *J. Phys.: Conf. Series*, 1697 (1), 012220 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012220
- [31] S.V. Sintsov, A.V. Vodopyanov, M.E. Viktorov, M.V. Morozkin, M.Yu. Glyavin. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, **41** (6), 711 (2020). DOI: 10.1007/s10762-020-00694-2
- [32] A.V. Sidorov, M.Y. Glyavin, S.V. Golubev, S.V. Razin, S.V. Sintsov, A.P. Veselov, A.V. Vodopyanov. *J. Phys.: Conf. Series*, **1400** (7), 077032 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077032
- [33] J.S. Hummelt, M.A. Shapiro, R.J. Temkin. *Phys. Plasmas*, **19** (12), 123509 (2012). DOI: 10.1063/1.4773037
- [34] Y. Oda, K. Komurasaki, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto. *J. Appl. Phys.*, **100** (11), 113307 (2006). DOI: 10.1063/1.2399899

- [35] X.-M. Zhu, Y.-K. Pu. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43** (40), 403001 (2010). DOI: 10.1088/0022-3727/43/40/403001
- [36] K.P. Savkin, E.M. Oks, D.A. Sorokin, A.Y. Yushkov, G.Y. Yushkov, S.V. Sintsov, A.V. Vodopyanov. *Plasma Sourc. Sci. Technol.*, **31** (1), 015009 (2022). DOI: 10.1088/1361-6595/ac309a
- [37] M. Morháč, V. Matoušek. *Digital Signal Processing*, **19** (3), 372 (2009). DOI: 10.1016/j.dsp.2008.06.002
- [38] J. Borkowska-Burnecka, W. Żyrnicki, M. Wełna, P. Jamróz. *Intern. J. Spectroscopy*, **2016**, 1 (2016). DOI: 10.1155/2016/7521050
- [39] N. Konjević, M. Ivković, N. Sakan. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **76**, 16–26 (2012). DOI: 10.1016/j.sab.2012.06.026
- [40] L. Yang, X. Tan, X. Wan, L. Chen, D. Jin, M. Qian, G. Li. *J. Appl. Phys.*, **115** (16), 163106 (2014). DOI: 10.1063/1.4873960
- [41] M. Morháč. *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **559** (1), 119–123 (2006). DOI: 10.1016/j.nima.2005.11.129