

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

**«Разряд атмосферного давления, поддерживаемый в сфокусированных квазиоптических
пучках непрерывного миллиметрового излучения»**

Аспирант: Синцов Сергей Владиславович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Водопьянов Александр
Валентинович, д.ф.-м.н., доцент, зав. Отделом №120

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.08 Физика плазмы

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2020

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время разряды атмосферного давления используются в широком спектре промышленных плазмохимических приложений. Разложение молекулярных газов в плазме позволяет получить целевой продукт реакции и его соединения в различных агрегатных состояниях. Например, одним из популярных современных направлений плазмохимии атмосферного давления является плазменное разложение летучих соединений хлора и фтора [1, 2]. Получают такие газовые сырьевые соединения с целью очистки целевого продукта или его изотопного обогащения. Высокоэффективное проведение таких процессов в промышленных масштабах актуально на сегодняшний день в широком спектре таких технологических приложений. Например, высокочистые соединения кремния, германия, индия могут быть использованы в разработке и создании новых эффективных полупроводниковых соединений для микроэлектроники [1]. Получение высокочистых изотопно-обогащенных соединений бора, молибдена, циркония и урана требуется для изготовления функциональных элементов ядерных реакторов [2].

Другой актуальной на сегодняшний день задачей плазмохимии является утилизация углекислого газа, что обусловлено динамичным увеличением его содержания в атмосфере Земли [3-6]. Одним из путей решения этой задачи является организация замкнутого цикла использования углекислого газа в технологических процессах с его плазменным разложением до монооксида углерода [7]. Нарбатываемый монооксид углерода далее может быть использован в производстве дизельного топлива и метанола [8].

Учитывая масштабы потенциальных промышленных плазмохимических приложений, такие процессы должны проводиться при атмосферном давлении. В плазмотронах атмосферного давления возможна реализация режимов работы с высоким энерговыделением и большой скоростью прокачки сырьевых газов, что позволяет удовлетворить требованиям на промышленные объемы производства [A2]. С другой стороны, реализация таких процессов при атмосферном давлении приводит к термализации плазмы, что существенно снижает скорость разложения высокостабильных молекул [A10]. Поскольку активация плазмохимических процессов зачастую имеет пороговый энергетический характер, на сегодняшний день существует проблема создания мощных и надежных источников плазмы атмосферного давления с существенно неравновесными температурными характеристиками. В неравновесной плазме возможна реализация режима селективного вклада энергии в целевой канал реакции. Создание низкотемпературных

источников плазмы атмосферного давления важно с точки зрения процессов закалки продуктов плазмохимической реакции и снижения скорости обратных реакций, что также влияет на производительность.

Одним из наиболее популярных способов поддержания химически активной плазмы атмосферного давления является микроволновый нагрев, что обусловлено возможностью локализации энерговклада и зоны поддержания разряда. Чаще всего при этом используются простые и доступные источники сантиметрового диапазона длин волн (0.915 и 2.45 ГГц). В микроволновых разрядах атмосферного давления могут быть реализованы особые режимы поддержания плазмы с неравновесными температурными характеристиками и неоднородной пространственной структурой [9].

В данной работе исследуется возможность использования мощных источников непрерывного миллиметрового излучения – гиротронов, для создания плазмы атмосферного давления с неравновесными температурными характеристиками. В современных плазмохимических приложениях нагрев плазмы миллиметровыми волнами является перспективным направлением исследований, поскольку позволяет получить высокую плотность электронов, близкую к критической плотности для частоты греющего поля. Преимуществом разрядов атмосферного давления, исследованных в данной работе, является возможность применения квазиоптической фокусировки миллиметрового излучения использованных источников. Это позволяет добиться высокого удельного энерговклада в разряд и пространственной локализации области поддержания плазмы с характерным масштабом, порядка длины волны греющего поля. Было показано, что электронная температура в исследованных разрядах может превышать температуру газа более чем на порядок [А3-А6]. Нагрев плазмы атмосферного давления в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения способствует развитию в ней филаментарных нитевидных структур, которые играют важную роль в поддержании неравновесных температурных характеристик. С точки зрения плазмохимических приложений, локализация разряда сфокусированным квазиоптическим пучком миллиметрового излучения позволяет организовать динамический режим подмешивания в плазменный факел газов окружающей его атмосферы. Это приводит к эффективной активации молекулярных газов на поверхности локализованного плазменного факела, имеющего существенно неравновесные температурные характеристики. Эффективность представленного способа организации неравновесных плазмохимических процессов была подтверждена в рамках данной работы на примере задачи разложения углекислого газа. В работе приведены результаты экспериментального исследования параметров плазмы разрядов, поддерживаемых в сфокусированных квазиоптических пучках

миллиметрового излучения. Были использованы источники непрерывного миллиметрового излучения с частотами 24 и 263 ГГц. На основании полученных результатов были сделаны выводы об эффективности использования мощных источников миллиметрового излучения для поддержания неравновесной плазмы атмосферного давления.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования мощных источников непрерывного миллиметрового излучения для поддержания плазмы атмосферного давления с существенно неравновесными температурными характеристиками.

Для этого были решены следующие **задачи**:

- 1) Исследование температурных характеристик плазмы атмосферного давления, поддерживаемой в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения, демонстрация факта их существенной неравновесности.
- 2) Изучение динамики электронной плотности в разрядах атмосферного давления, поддерживаемых в сфокусированных квазиоптических пучках миллиметрового излучения. Проверка предположения о близости величины электронной плотности к критической для частоты греющего поля.
- 3) Исследование возможности использования неравновесного разряда атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения, для решения современных плазмохимических промышленных задач на примере разложения углекислого газа до монооксида углерода.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) Впервые исследованы свойства и параметры плазмы непрерывного газового разряда атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке мощного субтерагерцового излучения. В качестве источника был использован гиротрон с частотой излучения 0.263 ТГц. Продемонстрированы существенная неравновесность температурных характеристик разряда данного типа и близость электронной плотности к критическому значению для частоты греющего поля.
- 2) Впервые для решения задачи плазменного разложения углекислого газа при атмосферном давлении был использован разряд, локализованный в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного миллиметрового излучения К-диапазона. В качестве источника был использован гиротрон с частотой излучения 24 ГГц. Продемонстрированы многообещающие результаты конверсии углекислого газа (до 31%) и энергоэффективности процессов (до 16%), превышающие

многие современные рекордные значения для бескатализаторных разрядов атмосферного давления.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) В разрядах атмосферного давления, локализованных в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения, электронная плотность близка к критическому значению для частоты греющего поля.
- 2) В сфокусированных квазиоптических пучках мощного непрерывного миллиметрового излучения возможно поддержание разряда при атмосферном давлении с существенно неравновесными температурными характеристиками плазмы.
- 3) В разряде атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке мощного непрерывного миллиметрового излучения К-диапазона, продемонстрировано разложение углекислого газа до монооксида углерода со степенью конверсии свыше 30%.

Практическая значимость работы

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, могут иметь практическое применение в задачах промышленного плазмохимического разложения газовых молекулярных соединений при атмосферном давлении. Применение для нагрева плазмы атмосферного давления мощных и надежных источников непрерывного миллиметрового излучения – гиротронов, имеющих меньшую длину волны в сравнении с часто используемыми источниками сантиметрового диапазона, позволяет пространственно локализовать область поддержания разряда. Нагрев плазмы в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения позволяет организовать интересный режим подмешивания молекулярных газов с высокой энергией связи атомов из окружающей атмосферы в объем плазмы с существенно неравновесными температурными характеристиками и создать область закалки продуктов реакции, вынесенных из него. В рамках данной работы была продемонстрирована эффективность разложения углекислого газа в плазме, поддерживаемой непрерывным миллиметровым излучением К-диапазона. В качестве источника был использован гиротрон с частотой излучения 24 ГГц. Полученные результаты конверсии углекислого газа и энергоэффективности процессов являются многообещающими на мировом уровне.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации было опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах из списка, рекомендованных ВАК. Также опубликованы 11 тезисов конференций, 3 публикации в трудах

конференций. Основные результаты, изложенные в данной работе, представлялись автором на следующих конференциях:

- 1) 23-я нижегородская сессия молодых ученых, ННГУ, г. Нижний Новгород, 23-24 мая 2018, устный доклад.
- 2) 30th Joint Russian-German Meeting on ECRH and Gyrotrons (ECRH-2020), IAP RAS, Nizhny Novgorod, 17-24 June, 2018, устный доклад.
- 3) 15th High Technology Plasma Processes conference (HTTP15), Toulouse, France, 2-6 July 2018, устный доклад.
- 4) VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии.- ИГХТУ, г. Иваново, 10-15 Сентября 2018г., устный доклад.
- 5) 24-я нижегородская сессия молодых ученых, г. Нижний Новгород, 21-24 мая 2019, устный доклад.
- 6) 24th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC24), Naples, Italy (9-14 June 2019), стендовый доклад.
- 7) International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, Japan, (1 -2 September 2018), стендовый доклад.
- 8) 11th International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy, Montegrotto Terme, Italy, (July 1-5, 2018), стендовый доклад.
- 9) X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики- 2018», Санкт-Петербург, (15-19 октября 2018), стендовый доклад.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в работе, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Участвовал в постановке целей и задач исследования, принимал непосредственное участие во всех экспериментах, описанных в работе, пусконаладочных работах, настройке диагностического оборудования. Все результаты обработки экспериментальных данных, представленных в работе, получены и интерпретированы автором.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 156 страниц, включая 53 рисунка и 4 таблицы, список литературы из 101 наименования.

Содержание диссертации

Во введении обсуждается актуальность темы исследования, сформулированы основные цели диссертации, кратко описаны основные полученные результаты, новизна работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты исследования плазменных параметров разряда атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. Представлены описание постановки эксперимента и методов диагностики плазменных параметров, обсуждаются полученные результаты. Обсуждаются структура разряда, механизмы его поддержания [A3, A4].

В разделе 1.1 настоящей работы представлено описание экспериментального стенда. Структурно установку можно разделить на источник миллиметрового излучения и газоразрядную камеру. В качестве источника миллиметрового излучения был использован технологический гиротрон с частотой излучения в непрерывном режиме 24 ГГц и максимальной выходной мощностью 5 кВт. Линейно поляризованное излучение вводилось в газоразрядную камеру (рисунок 1), где с помощью параболического зеркала фокусировалось [A12].

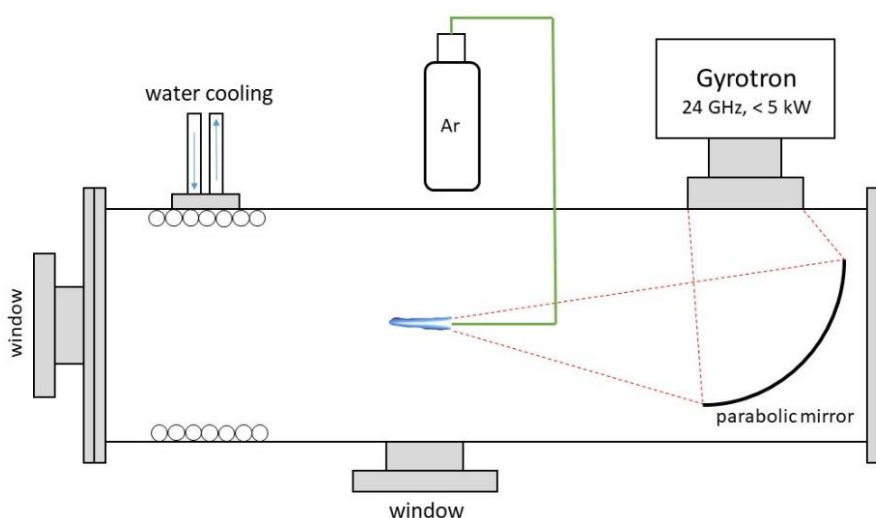


Рисунок 1. Схема газоразрядной камеры

В области перетяжки пучка миллиметрового излучения располагалась металлическая трубка напуска газа, по которой осуществлялась подача аргона. Разряд инициировался на срезе трубки напуска газа в потоке вытекающего из нее аргона. Он представляет собой плазменный факел, привязанный к газовой трубке с шириной, равной ее диаметру (4 мм) и длиной до 4 см. Факел вытянут вдоль направления волнового вектора электромагнитной волны, перпендикулярно линейно поляризованному полю (рисунок 2).

В данном разделе представлены результаты исследования пространственно – временной динамики плазменного факела. По фотографиям разряда с временем экспозиции 4-100 мкс, полученным с помощью фотокамеры с высокочувствительной CCD матрицей, была описана структура плазменного факела, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. В спектральном диапазоне 450-650 нм в структуре факела были обнаружены нитевидные филаментарные структуры, заполненные термической плазмой. Методами лазерной интерферометрии было исследовано распределение газовой температуры в самом плазменном факеле и в области вокруг него [А16]. Показано, что температура газа в таких филаментах увеличивается с ростом поглощенной мощности и по величине превышает 1400 К.



Рисунок 2. Фотография плазменного факела, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. Мощность нагрева 1500 Вт, скорость потока аргона 15 л/мин. Время экспозиции 1 мс

При этом объем плазмы, окружающий эти нитевидные структуры – плазменный ореол, остается холодным. Описана динамика филамент в зависимости от мощности нагрева плазмы. На основании проведенных оценок было показано, что наличие филаментарных образований в

исследуемом плазменном факеле обеспечивает основное поглощение микроволновой мощности, вводимой в плазму. Эти нитевидные филаментарные являются «источниками» электронов и заряженных частиц для всего плазменного ореола и играют важную роль в динамике разряда.

В разделе 1.2 приведены результаты исследования параметров плазмы разряда, поддерживаемого в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. Методами оптической эмиссионной спектроскопии были определены температура возбуждения атомов аргона, колебательная и вращательная температуры (для молекул азота, подмешиваемых в плазменный объем из окружающей факел атмосферы) в плазменном ореоле разряда [A3, A4, A12]. Температура возбуждения атомов аргона описывает распределение возбужденных электронных энергетических уровней и в неравновесных разрядах является оценкой снизу для температуры электронов. На рисунке 1.3 представлены результаты измерения вышеперечисленных температурных характеристик в плазменном ореоле.

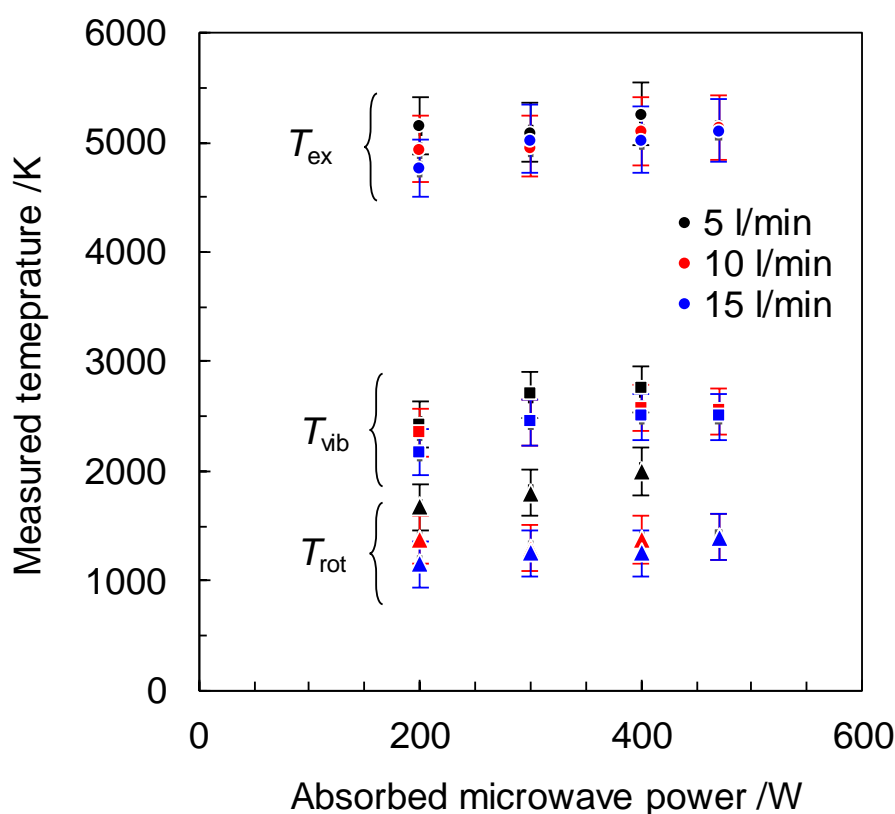


Рисунок 3. Зависимости интегральных значений температуры возбуждения атомов аргона, колебательной и вращательной температур молекул азота в плазменном ореоле разряда в зависимости от поглощенной мощности при различных потоках аргона

Можно видеть, что определённые температурные характеристики в разряде имеют существенно неравновесное распределение и не изменяются в пределах погрешности с ростом поглощенной

мощности. На основании проведенных измерений можно утверждать, что степень неравновесности разряда, то есть отношение температуры электронов к газовой температуре, превышает 3 [A4].

С помощью электрического зонда было проведено измерение электронной температуры в плазменном факеле [A3, A13, A18]. Было показано, что температура электронов не изменяется с ростом поглощенной мощности и составляет 1 эВ, что примерно в 2 раза больше температуры возбуждения атомов аргона и более чем в 7 раз больше температуры газа факела. В работе приведено объяснение полученной динамики температурных характеристик разряда, определена роль молекулярных газов, подмешиваемых в плазменный объем из окружающей атмосферы.

Методами СВЧ зондирования было проведено измерение электронной плотности в разряде атмосферного давления, поддерживаемом в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц [A8]. С учетом частоты электрон-нейтральных столкновений, электронная плотность близка к критическому значению для частоты греющего поля, не изменяется с ростом поглощенной мощности и составляет $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ [A18].

Во второй главе представлены результаты исследования параметров разряда атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного субтерагерцового излучения с частотой 263 ГГц.

В разделе 2.1 данной главы описаны источник субтерагерцового излучения и экспериментальная установка. Исследованы форма и размер пучка субтерагерцового излучения в области перетяжки, обсуждаются режимы поддержания плазменного факела.

В разделе 2.2 представлены результаты исследования пространственно-временной динамики плазменного факела атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке субтерагерцового излучения. По фотографиям разряда с временем экспозиции 20 – 1000 нс (рисунок 4), полученным с помощью фотокамеры со скоростным электронным затвором, были исследованы структура плазменного факела и характер его распространения. Было показано, что в газовом разряде такого типа существует структура, положение, размер и форма которой не изменяются с ростом поглощенной разрядом мощности. Плазменный ореол, окружающий такую структуру, является нестационарным и распространяется навстречу падающему пучку субтерагерцового излучения. При этом неоднородная структура плазменного ореола обусловлена распределением стоячей структуры в области поддержания разряда [A5].

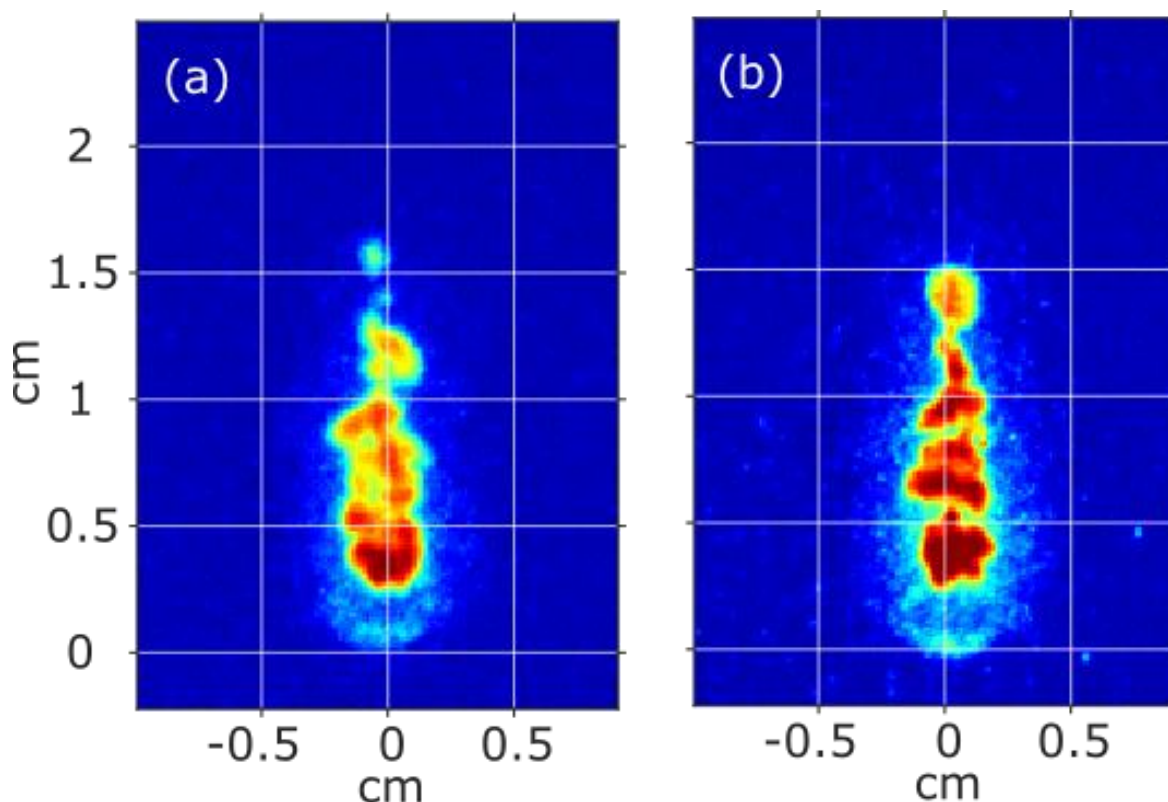


Рисунок 4. Фотографии разряда на скоростную камеру. Левая фотография - мощность нагрева 1 кВт, поток аргона 10 л/мин, время экспозиции 20 нс. Правая фотография - мощность нагрева 0.78 кВт, поток аргона 10 л/мин, время экспозиции 20 нс

В разделе 2.3 представлены результаты исследования параметров плазмы разряда, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке субтерагерцового излучения. Аналогично исследованиям, проведенным в разделе 1.2, методами оптической спектроскопии были определены температура возбуждения атомов аргона, колебательная и вращательная температуры молекул азота, подмешиваемых в плазменный объем из окружающей факел атмосферы воздуха. Определённые температурные характеристики имеют существенно неравновесное распределение и слабо выраженную зависимость от поглощенной мощности. Температура возбуждения атомов аргона более чем в 11 раз превышает температуру газа в плазменном факеле и составляет 1.5 – 1.7 эВ [A5, A7, A9, A19]. Эта величина примерно в 3 раза больше температуры возбуждения атомов аргона в разряде, поддерживаемом в сфокусированном квазиоптическом пучке миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. В разделе представлены оценки электронной температуры, приведено объяснение динамики плазменных параметров в зависимости от поглощенной разрядом мощности. Также в данном разделе представлены результаты измерения электронной плотности в плазменном факеле, поддерживаемом в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного субтерагерцового излучения гиротрона с частотой 263 ГГц (рисунок 5). Концентрация электронов была определена по штарковскому

уширению линий водорода H_α и H_β серии Бальмера. Водород в небольшом количестве был подмешан в плазмообразующий газ. С помощью фильтра H_α с полосой пропускания 650 – 660 нм было показано, что подмешанный водород равномерно возбуждается во всем плазменном объеме. В итоге электронная плотность составила $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что близко к критической для частоты греющего поля [A5, A7].

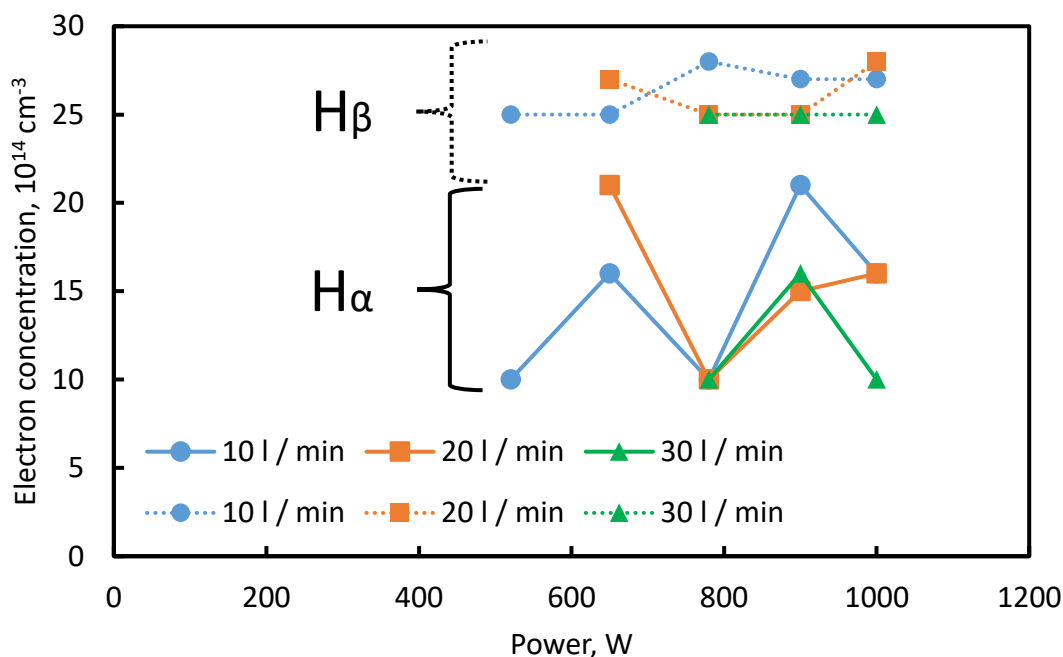


Рисунок 5. Зависимость электронной плотности от мощности при различных потоках плазмообразующего газа. Результаты приведены для оценок по линиям H_α (сплошные линии) и H_β (пунктирные линии)

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментов по разложению углекислого газа в разряде атмосферного давления, локализованного электродинамической структурой и поддерживаемого непрерывным сфокусированным излучением с частотой 24 ГГц.

В разделе 3.1 представлен обзор современных плазменных методов утилизации углекислого газа путем его разложения до монооксида углерода. Подробно обсуждаются преимущества и недостатки разрядов атмосферного давления, поддерживаемых источниками непрерывного сантиметрового излучения.

В разделе 3.2 описаны экспериментальная установка и локализирующая металлическая электродинамическая структура, приведены результаты численного расчета распределения напряженности электрического поля внутри нее. Применение металлической электродинамической структуры позволило не только локализовать плазменный факел, но и увеличить долю мощности, поглощенной разрядом до 60% от введенной (рисунок 6). В данной

главе разряд, поддерживаемый в сфокусированном пучке миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц, инициируется в потоке аргона в окружающей атмосфере углекислого газа, который по отдельной трубке газового напуска вводится внутрь локализирующей электродинамической структуры.

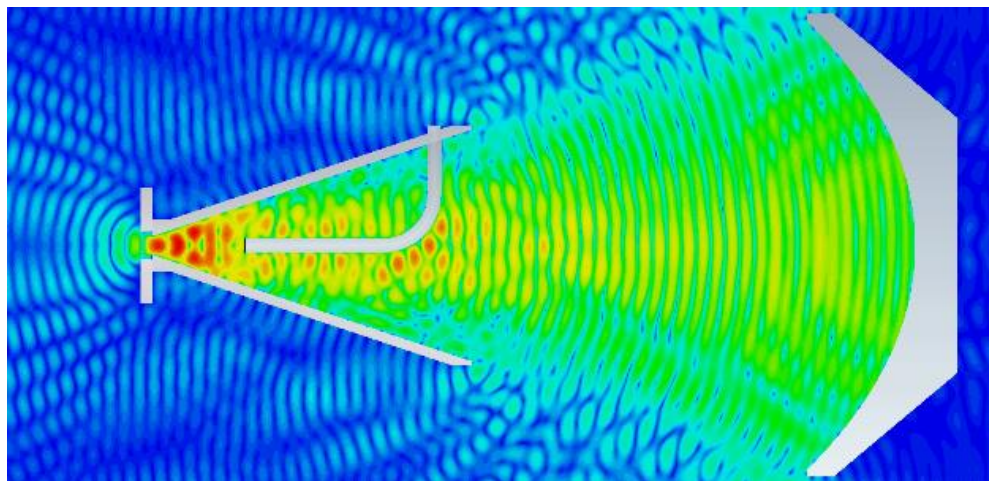
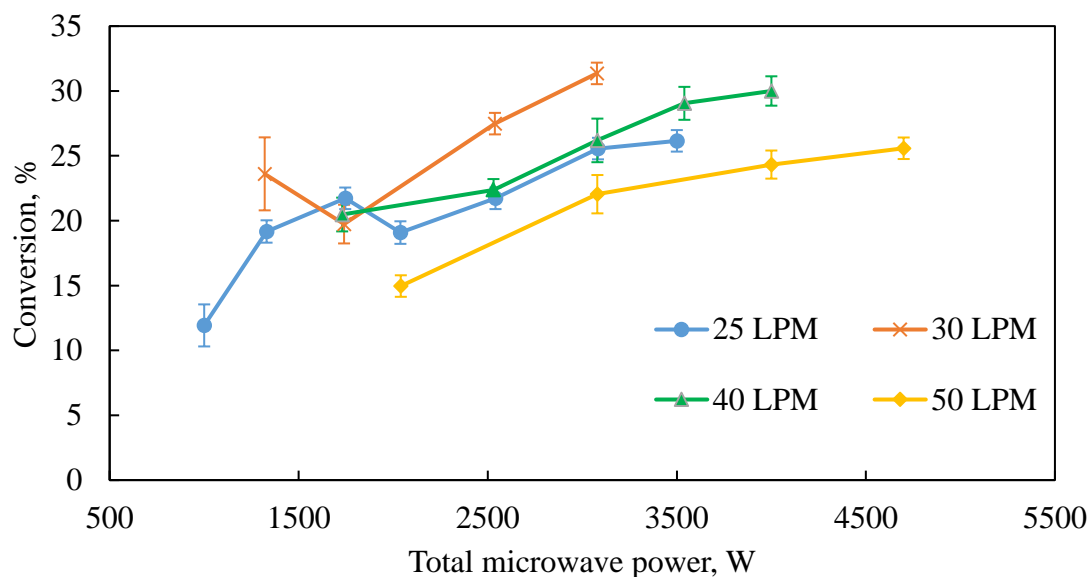


Рисунок 6. Пространственное распределение электрического поля в области перетяжки пучка миллиметрового излучения с локализирующей электродинамической структурой

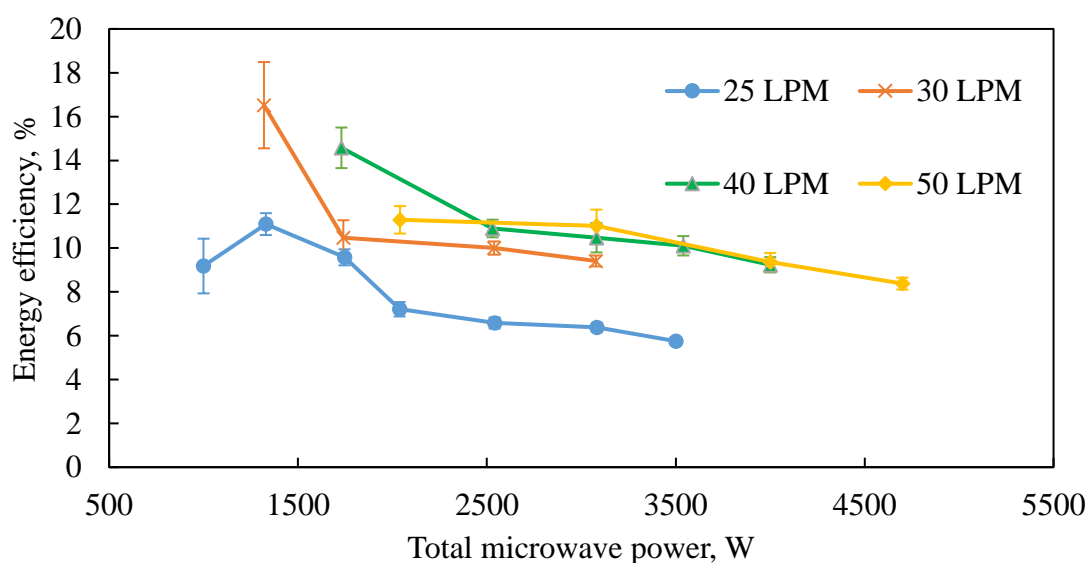
В разделе 3.3, аналогично разделам 1.2 и 2.3, представлены результаты спектрометрического исследования температурных характеристик плазменного факела, поддерживаемого в сфокусированном пучке непрерывного излучения с частотой 24 ГГц. Было показано, что температура возбуждения атомов аргона в 2-3 раза превышает газовую температуру и составляет 0.5 – 0.8 эВ [А6].

В разделе 3.4 представлены результаты экспериментов по разложению углекислого газа в неравновесном плазменном факеле атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном пучке непрерывного миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц и локализованного металлической электродинамической структурой. В разделе обсуждается динамика величин конверсии углекислого газа и энергоэффективности в зависимости от поглощенной мощности и потока плазмообразующей смеси аргон – углекислый газ. Экспериментально было определено оптимальное соотношение компонент газовой смеси аргон – углекислый газа как 5:1. Было показано, что увеличение мощности нагрева приводит к термализации плазмы и увеличению степени конверсии углекислого газа с одновременным уменьшением энергоэффективности. Максимальное полученное значение конверсии углекислого газа составило 31,2% при энергоэффективности 9,5% (мощность нагрева 3 кВт и потоке газовой смеси Ar/CO₂ в соотношении 5:1 40 л/мин). Максимальная энергоэффективность

была достигнута при том же значении скорости потока плазмообразующей смеси и мощности нагрева 1300 Вт на уровне 16,5% при степени конверсии 23.5% (рисунок 7) [А6, А20].



А



Б

Рисунок 7. График зависимости степени конверсии (а) и энергоэффективности (б) от мощности нагрева при фиксированном суммарном потоке 25 л/мин и различных соотношениях Ar/CO_2

Полученные результаты выглядят многообещающе на мировом уровне и превышают многие современные рекордные значения для разрядов атмосферного давления без использования катализаторов (рисунок 8). В работе также обсуждаются методы увеличения достигнутых значений конверсии и энергоэффективности.

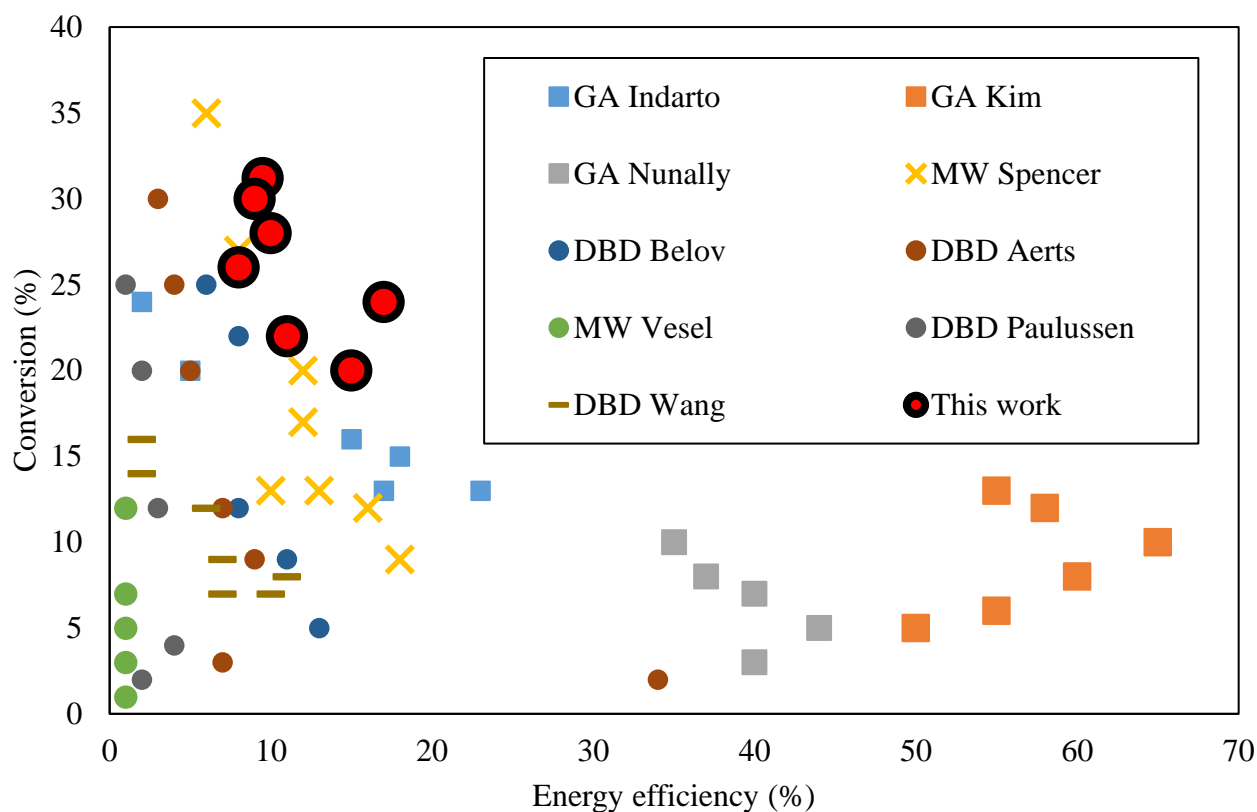


Рисунок 8. Мировые рекордные значения конверсии и энергоэффективности разложения углекислого газа в различных типах разрядов атмосферного давления без использования катализаторов

В заключении сформулированы основные выводы по результатам экспериментов, представленных в диссертации. В конце работы приведен список цитируемой литературы.

В работе проведено исследование параметров разрядов, поддерживаемых в непрерывных сфокусированных квазиоптических пучках миллиметрового излучения. В качестве источников миллиметрового излучения были использованы гиротроны с частотой 24 ГГц (мощность до 5 кВт) и 263 ГГц (мощность до 1.1 кВт). Для разрядов, поддерживаемых излучением таких источников, были определены основные плазменные температурные характеристики: температура возбуждения верхних уровней атомов аргона, колебательная и вращательная температуры азота. На основании полученных зависимостей температурных характеристик плазмы в зависимости от режимов поддержания разряда, были сформулированы основные выводы о свойствах и динамике плазменных факелов, поддерживаемых в квазиоптических пучках миллиметрового излучения. Было показано, что исследуемые разряды атмосферного давления имеют существенно неравновесные температурные характеристики, температура электронов на порядок превышает температуру газа. В рамках данной работы также было проведено измерение электронной плотности. Для разряда, поддерживаемого в

непрерывном сфокусированном пучке излучения с частотой 24 ГГц, такие измерения были проведены методами СВЧ зондирования. Для плазменного факела, поддержание которого осуществлялось в квазиоптическом пучке субтерагерцового излучения, оценка электронной плотности производилась по уширению линий водорода серии Бальмера за счет эффекта Штарка. Было показано, что для обоих типов разрядов электронная плотность близка к критическому значению для частоты греющего поля. Причем увеличение частоты нагрева в 11 раз привело к увеличению электронной плотности более чем на два порядка. В разряде, поддерживаемом в непрерывном сфокусированном квазиоптическом пучке миллиметрового излучения и локализованного электродинамической структурой конической формы, были проведены эксперименты по разложению углекислого газа до монооксида углерода. Полученные результаты конверсии и энергоэффективности существенно превышают расчетный предел конверсии для термической плазмы с имеющейся газовой температурой и выглядят многообещающе на общем мировом уровне.

На основании проведенных исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1. В разряде атмосферного давления, поддерживаемом в непрерывном сфокусированном квазиоптическом пучке миллиметрового излучения К-диапазона, существуют нитевидные филаментарные образования, вытянутные вдоль длины плазменного факела. Эти филаменты являются термической плазмой ($T_{\text{газ}} > 1400 \text{ K}$) и обеспечивают основное поглощение вводимой СВЧ мощности.
2. В исследованных типах разрядов атмосферного давления, поддерживаемых в непрерывных сфокусированных квазиоптических пучках миллиметрового излучения, был продемонстрирован факт существенной неравновесности в распределении температурных характеристик плазмы, температура электронов на порядок превышает температуру газа.
3. В исследованных типах разрядов атмосферного давления, поддерживаемых в непрерывных сфокусированных квазиоптических пучках миллиметрового излучения, электронная плотность близка к критической для частоты греющего поля. Увеличение частоты нагрева плазмы в 11 раз привело к увеличению значения электронной плотности в плазменном факеле более чем на два порядка.
4. В разряде атмосферного давления, поддерживаемого в сфокусированном квазиоптическом пучке мощного непрерывного миллиметрового излучения К-диапазона, продемонстрировано разложение углекислого газа до монооксида углерода со степенью конверсии свыше 30%.

Публикации по теме работы:

Статьи

- [A1]. Kornev, R. A., Sennikov, P. G., Sintsov, S. V., & Vodopyanov, A. V. (2017). Microwave Interferometry of Chemically Active Plasma of RF Discharge in Mixtures Based on Fluorides of Silicon and Germanium. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 37(6), 1655–1661. <https://doi.org/10.1007/s11090-017-9846-2>
- [A2]. Kornev, R. A., Sennikov, P. G., Shabarova, L. V., Shishkin, A. I., Drozdova, T. A., & Sintsov, S. V. (2019). Reduction of Boron Trichloride in Atmospheric-Pressure Argon–Hydrogen Radiofrequency Induction Plasma. *High Energy Chemistry*, 53(3), 246–253. Doi: 10.1134/S001814391903010
- [A3]. Sintsov, S., Vodopyanov, A., & Mansfeld, D. (2019). Measurement of electron temperature in a non-equilibrium discharge of atmospheric pressure supported by focused microwave radiation from a 24 GHz gyrotron. *AIP Advances*, 9(10), 1–8. doi:10.1063/1.5115326
- [A4]. Sergey Sintsov, Kuniyoshi Tabata, Dmitry Mansfeld, Alexander Vodopyanov, Kimiya Komurasaki (2020) Optical emission spectroscopy of non-equilibrium microwave plasma torch sustained by focused radiation of gyrotron at 24 GHz, *Journal of Physics D Applied Physics*, DOI: 10.1088/1361-6463/ab8999.
- [A5]. S.V. Sintsov, A.V. Vodopyanov, M.E. Viktorov, M. V. Morozkin, M. Yu. Glyavin (2020) Non-equilibrium Atmospheric-Pressure Plasma Torch Sustained in a Quasi-optical Beam of Subterahertz Radiation, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* <https://doi.org/10.1007/s10762-020-00694-2>.
- [A6]. D. Mansfeld, S. Sintsov, N. Chekmarev and A. Vodopyanov (2020) Conversion of carbon dioxide in microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at frequency of 24 GHz at atmospheric pressure, *Journal of CO2 Utilization*, DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101197.

Труды конференций

- [A7]. Vodopyanov, A. V., Sidorov, A. V., Razin, S. V., Dubinov, I. D., Sintsov, S. V., Proyavin, M. D., Glyavin, M. Y. (2018). Parameters of a CW Plasma Torch of Atmospheric Pressure Sustained by Focused Sub-Terahertz Gyrotron Radiation. *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2018-September*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2018.8510395>

[A8]. Vodopyanov, A., Mansfeld, D., Sintsov, S., Viktorov, M. (2019). Method for determining plasma density in a magnetic field. *Journal of Physics: Conference Series*, 1400 (2019) 077022. doi:10.1088/1742-6596/1400/7/077022.

[A9]. Sidorov, A., Glyavin, M., Golubev, S., Razin, S., Sintsov, S., Veselov, A. and Vodopyanov, A. (2019). Applications of the gas discharge sustained by the powerful radiation of THz gyrotrons. *Journal of Physics: Conference Series*, 1400 (2019) 077032. doi:10.1088/1742-6596/1400/7/077032.

Тезисы конференций

[A10]. Синцов С.В., Водопьянов А. В., Корнев Р. А., Шишкин А.Н. // Степень равновесности аргон-водородной и аргон-азотной плазмы атмосферного давления // Тез. докл. «VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии».- ИГХТУ, г. Иваново (10-15 Сентября 2018г.) С.132.

[A11]. Корнев Р.А., Сенников П.Г., Синцов С.В., Водопьянов А.В. // Диагностика химически активной плазмы ВЧЕ разряда в смесях летучих галогенидов с водородом // Тез. докл. «VIII Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии».- ИГХТУ, г. Иваново (10-15 Сентября 2018г.) С.124.

[A12]. Синцов С.В., Водопьянов А. В. // Параметры стационарного СВЧ разряда атмосферного давления, поддерживаемого сфокусированным излучением гиротрона // Тез. докл. «23-я нижегородская сессия молодых ученых», ННГУ, г. Нижний Новгород, (23-24 мая 2018) т.2 с. 48.

[A13]. Sintsov S.V., Vodopyanov A.V., Mansfeld D.A., Viktorov M.E. // Parameters of the atmospheric pressure CW microwave discharge sustained by focused gyrotron radiation. // 15th HTTP, Toulouse, France (2-6 july 2018) – P. 19.

[A14]. R. Kornev, P. Sennikov, S. Sintsov, A. Vodopyanov // Diagnostics of Chemically Active Plasma of RFCC Discharge in H₂ + SiCl₄, H₂ + GeCl₄, and H₂ + BCl₃ mixtures // 11th International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy. Book of abstracts. Montegrotto Terme, Italy, July 1-5, 2018. P.111.

[A15]. R. Kornev, P. Sennikov, L. Shabarova, S. Sintsov // RF-IC Plasmatron with Tangential Stabilization of the Gas Flow: Diagnostics of Chemically Active Plasma and Application //11th

International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology and Sustainable Energy. Book of abstracts. Montegrotto Terme, Italy, July 1-5, 2018. P.112.

[A16]. Мурзанев А.А., Водопьянов А.В., Ромашкин А.В., Синцов С.В., Степанов А.Н. // Интерферометрический контроль параметров плазмы при непрерывном СВЧ разряде в аргоне, поддерживаемом гиротроном // X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики- 2018», Санкт-Петербург, (15-19 октября 2018), стр. 86-87.

[A17]. Синцов С.В., Водопьянов А. В. // Неравновесный разряд атмосферного давления, поддерживаемый непрерывным излучением субтерагерцового гиротрона // Тез. докл. «24-я нижегородская сессия молодых ученых», г. Нижний Новгород, (21-24 мая 2019) т.1 с. 110.

[A18]. Sintsov, S., Vodopyanov, A., Mansfeld, D., Viktorov, M. (2019) Non-equilibrium atmospheric pressure discharge, sustained by focused CW gyrotron radiation with a frequency of 24 GHz. Conference paper ISPC24, Naples, Italy (9-14 june 2019).

[A19]. Vodopyanov, A., Sintsov, S., Viktorov, Sidorov, A., M., Mansfeld, D., Morozkin, M., Fokin, A., Glyavin. M. (2019) Features of the atmospheric pressure CW discharge, sustained by the 263 GHz gyrotron radiation. Conference paper ISPC24, Naples, Italy (9-14 june 2019).

[A20]. Mansfeld, D., Vodopyanov, A., Sintsov, S. (2019) Disintegration of carbon dioxide in a microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at a frequency of 24 GHz at atmospheric pressure. Conference paper ISPC24, Naples, Italy (9-14 june 2019).

Список литературы

[1] Sennikov PG, Kornev RA, Mochalov LA, Golubev SV (2014) J Phys 514:012002–012009

[2] Kornev R, Sennikov P (2016) Eur Phys J Appl Phys 75:24718–24723

[3] E Tatarova et al 2014 J. Phys. D: Appl. Phys. 47 385501

[4] M Moisan et al 1994 Plasma Sources Sci. Technol. 3 584

[5] Michel Moisan and Helena Nowakowska 2018 Plasma Sources Sci. Technol. 27 073001

[6] T Fleisch et al 2007 Plasma Sources Sci. Technol. 16 173.

[7] Yu. P. Raizer, Gas Discharge Physics (Springer, New York, 1991).

[8] L.F. Spencer, A.D. Gallimore, Plasma Sources Sci. Technol. 22 (2012) 015019.

[9] Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Зорин В.Г., Косый И.А. Экспериментальное исследование неравновесного СВЧ разряда при атмосферном давлении в воздухе //Письма в ЖТФ. -1984. -Т.10, Вып.3. - С.187-190.