

**Минобрнауки России**  
**Федеральное государственное**  
**бюджетное учреждение науки**  
**Институт сильноточной электроники**

**Сибирского отделения**  
**Российской академии наук**  
**(ИСЭ СО РАН)**

пр-кт Академический, д. 2/3,  
г. Томск, 634055

тел. (3822) 491-544, факс (3822) 492-410

e-mail: [contact@hcei.tsc.ru](mailto:contact@hcei.tsc.ru)

<http://www.hcei.tsc.ru>

ОКПО 05160369; ОГРН 1027000871666

ИНН 7021001375; КПП 701701001

**"УТВЕРЖДАЮ»**

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт  
сильноточной электроники  
Сибирского отделения  
Российской академии наук,  
академик РАН

 Н.А.Ратахин

от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

« 20 » октября 2020 г.



### **ОТЗЫВ**

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу СИНЦОВА Сергея Владиславовича «Разряд атмосферного давления, поддерживаемый в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

#### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа С.В. Синцова посвящена исследованию неравновесных разрядов атмосферного давления, поддерживаемых в потоке газа в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения. Актуальность проведенных исследований, в первую очередь, обусловлена такими современными промышленными плазмохимическими задачами, как разработка источников озона и окислов азота, утилизация углекислого газа до монооксида углерода, очистка воздуха от ядовитых и органических примесей, разложение соединений фтора и хлора для получения высокочистых или изотопно-обогащенных веществ и ряд других. Реализация таких плазмохимических процессов в неравновесной плазме при атмосферном

давлении в промышленных масштабах позволит повысить производительность и рентабельность производства. Основной проблемой создания источника неравновесной плазмы атмосферного давления является выравнивание температур электронов, ионов и молекул в плазме разряда из-за высокой частоты их столкновений, что приводит к ограничению конверсии продукта реакции и снижает эффективность его получения. Перспективным направлением является изучение возможности организации неравновесных плазмохимических процессов в микроволновых разрядах высокого давления. Особенности механизмов передачи энергии от СВЧ поля газовому разряду атмосферного давления обуславливают ряд важных физических эффектов, которые позволяют выйти за рамки равновесного баланса плазменных параметров и реализовать существенно неравновесное распределение частиц в плазме. С конструктивной точки зрения создание разрядов в сфокусированных пучках СВЧ излучения позволяет локализовать пространственную область функционирования разряда, что важно при проведении процессов с химически активными летучими соединениями. В рамках диссертационной работы С.В. Синцова было проведено исследование возможности использования мощных источников миллиметрового излучения для поддержания плазмы в потоке газа при атмосферном давлении в непрерывном режиме с существенно неравновесными температурными характеристиками. Для этого были определены основные плазменные параметры разрядов атмосферного давления, поддерживаемых в потоке газа в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения гиротронов с частотами 24 ГГц и 263 ГГц. Для определения температурных характеристик и электронной плотности в плазме был использован широкий спектр диагностических методов, в том числе методы оптической эмиссионной спектроскопии. В работе подробно обсуждаются пределы применимости использованных методик и точность определяемых значений. Было показано, что исследуемые разряды атмосферного давления, поддерживаемые в потоке газа в сфокусированных пучках миллиметрового излучения, обладают существенной неравновесностью, причем температура электронов на порядок превышает температуру газа.

#### **Научная новизна**

В рамках диссертационной работы С.В. Синцова были впервые исследованы особенности развития ионизационно-перегревной неустойчивости в микроволновом разряде в потоке газа при атмосферном давлении. Показано, что

нитевидные плазменные каналы, формирование которых обусловлено развитием такой неустойчивости, вытянуты вдоль направления потока газа независимо от ориентации электрического поля волны СВЧ излучения. Формирование неравновесного плазменного ореола вокруг каналов обусловлено диффузионным турбулентным выносом плазмы из них. В работе впервые исследованы свойства и параметры разряда атмосферного давления, поддерживаемого в потоке газа в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного мощного субтерагерцового излучения с частотой 0.263 ТГц. Методами оптической эмиссионной спектроскопии были продемонстрированы существенная неравновесность температурных характеристик данного типа разряда и превышение электронной плотности критического значения для частоты греющего поля, более чем в 2 раза. В работе показано, что такие разряды имеют большой потенциал для решения современных промышленных плазмохимических задач. Впервые для плазменного разрушения молекул углекислого газа при атмосферном давлении был использован микроволновой разряд в потоке аргона с углекислым газом, поддерживаемый в сфокусированном квазиоптическом пучке непрерывного миллиметрового излучения с частотой 24 ГГц. Были достигнуты рекордные значения конверсии (до 30%) и энергоэффективности (до 15%) разложения углекислого газа до монооксида углерода для бескатализаторных разрядов при атмосферном давлении. Показано, что содержание монооксида углерода в газоразрядной камере в 3 раза превышает равновесный предел при реализованной температуре газа, что говорит о наличии селективного энерговклада в данный канал реакции и существенной неравновесности проводимых процессов.

#### **Практическая значимость**

Результаты диссертационного исследования могут иметь практическое применение в широком спектре задач неравновесной плазмохимии. Эффективность разрушения молекулярных соединений в исследованном неравновесном микроволновом разряде атмосферного давления была продемонстрирована на примере разложения углекислого газа до монооксида углерода, достигнуты рекордные значения конверсии и энергоэффективности процесса.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты диссертации рекомендуются для использования в организациях, ведущих исследования по использованию неравновесной плазмы: в Институте

нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте электрофизики и электроэнергетики РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Петрозаводском государственном университете и ряде других, а также в производственных организациях, занимающихся этой тематикой.

#### **Замечания по диссертации:**

1. Использование выражений "более, чем в 10 раз", "свыше 30%", "более 10%", без указания полученных конкретных значений достигнутых величин не представляется правильным подходом при формулировании первого и второго научных положений, поскольку, например, выражению "свыше 30%", соответствует диапазон значений от 31% и выше.

2. В работе недостаточно детально рассмотрен механизм нагрева плазмы в ярких нитевидных структурах, в так называемых филаментах, которые экранированы от греющего поля ореолом с "закрытой" плотностью плазмы.

3. В главе 3 при рассмотрении плазмохимических приложений результатов диссертации использование параметра "степень конверсии", имеющего относительную величину, не вполне обосновано. Поясним на примере. На рис. 3.8.а) степень конверсии углекислого газа в монооксид углерода для смеси  $\text{CO}_2/\text{Ar}$  с соотношением компонентов в потоке 1:5 при мощности уровня 3 кВт составляет 26%, а для смеси с соотношением компонентов 1:1 всего 18%. Казалось бы, именно первую смесь нужно использовать для конверсии на практике. Но это не совсем так. Поскольку доля атомов  $\text{CO}_2$  во второй смеси больше, то абсолютное количество его атомов, подвергнутых конверсии, для этой смеси в два раза выше. Таким образом, именно использование смеси с более низкой степенью конверсии, но с более высоким содержанием  $\text{CO}_2$ , обеспечивает большую производительность процесса. Использование в работе вместо относительного параметра "степень конверсии" абсолютного параметра, определяющего количество вещества, подвергнутого конверсии, было бы более правильным подходом.

#### **Общая оценка работы**

Сделанные замечания не изменяют положительной оценки работы. Работа выполнена на высоком научном уровне, с использованием различных диагностических методов физики плазмы. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и международных журналах, были представлены на российских и международных конференциях по физике плазмы. Исследованные в

работе неравновесные микроволновые разряды атмосферного давления могут быть использованы для решения широкого спектра промышленных плазмохимических задач. В работе описаны особенности развития ионизационно-перегревной неустойчивости в микроволновом разряде в потоке газа при атмосферном давлении, что открывает широкие возможности для построения новых принципов организации неравновесных плазмохимических процессов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации опубликовано 20 работ автора, из которых 6 статей опубликовано в рецензируемых российских и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, и 14 работ в сборниках и трудах материалов конференций.

### **Вывод**

Диссертационная работа Синцова Сергея Владиславовича «Разряд атмосферного давления, поддерживаемый в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения» соответствует требованиям пунктов 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории плазменный источников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, протокол № 02 от «19» октября 2020 года.

Отзыв подготовил ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных источников, доктор технических наук

Визирь Алексей Вадимович

«Подпись сотрудника Института сильноточной электроники СО РАН Визиря А.В. удостоверяю».

Ученый секретарь Института сильноточной электроники СО РАН, доктор физико-математических наук



Пегель И.В.

Контактные данные института:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Адрес: 634055 г. Томск, пр. Академический, 2/3.

Тел.: +7 (3822) 491-776

Электронная почта: [contact@hcei.tsc.ru](mailto:contact@hcei.tsc.ru)

Сайт: <https://www.hcei.tsc.ru>