

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института химической физики  
им. П.Н. Семенова  
Российской академии наук  
д.х.н., проф. В.А.Надточенко



17 мая 2018 года

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Михайлова Дмитрия Владимировича «Тлеющий разряд в смеси паров воды с инертными газами как источник оптического излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы

Диссертационная работа Михайлова Дмитрия Владимировича посвящена исследованию тлеющего разряда в смеси паров воды с инертными газами. Тематика работы связана с созданием эффективных экологически безопасных источников оптического излучения.

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время наиболее широко распространенными и эффективными являются ртутные люминесцентные лампы, которые, однако, содержат ртуть и поэтому опасны с экологической точки зрения. Создание экологически чистых источников оптического излучения (источников света) представляет собой сложную проблему, потому что, с одной стороны, создаваемый новый источник излучения не должен содержать вредных составляющих (в частности, ртуть), а с другой стороны, должен иметь эффективность излучения (светоотдачу), сравнимую или лучше, чем имеют ртутные источники излучения.

Разряды в смеси паров металлов с инертными газами и в других газовых смесях, содержащих атомарные системы, к настоящему времени изучены достаточно хорошо. По этой причине прогресс в решении проблемы, скорее всего, связан с разработкой новых источников оптического излучения на основе использования плазмы разрядов в молекулярных газах. Одним из таких объектов является тлеющий разряд в смеси паров воды с инертными газами.



Последние исследования показали перспективность данного разряда как источника оптического излучения. В частности, была достигнута световая отдача источников света на основе смеси паров воды с инертными газами, достигающая 50% светоотдачи ртутных люминесцентных ламп. Очевидно, что дальнейшие исследования по совершенствованию данных источников оптического излучения весьма актуальны и имеют хорошие перспективы.

**Содержание работы.** Диссертационная работа Михайлова Дмитрия Владимировича состоит из введения, четырех глав и заключения, где сформулированы основные результаты и выводы. Работа изложена на 100 страницах, содержит 26 рисунков и библиографию из 79 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность научной проблемы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показаны научная новизна и практическая значимость результатов, подробно описаны методы исследования, приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен литературный обзор, посвященный исследованию тлеющих разрядов с легкоионизируемыми добавками. Такие разряды широко используются в качестве источников оптического излучения (источников света). Описаны современные источники оптического излучения низкого давления, созданные на основе разрядов в смесях паров металлов с инертными газами, с эксимерными молекулами, в чистых инертных газах и их смесях, разрядов с молекулярными добавками, в частности, с молекулами воды. Показано, что разряд в смеси паров воды с инертными газами может быть эффективным источником ультрафиолетового излучения 306.4 нм молекул гидроксила. На основе моделирования и с учетом экспериментальных данных определены цели работы — исследование путей повышения эффективности генерации УФ излучения молекул гидроксила и, таким образом, повышения эффективности источников оптического излучения на основе разрядов с парами воды.

**Вторая глава** посвящена изучению возможности увеличения эффективности генерации УФ излучения гидроксила за счет добавки к смеси паров воды с аргоном более легкого инертного газа – гелия и/или неона. С этой целью модифицирована модель плазмы, предложенная для положительного столба разряда в смеси паров воды с аргоном. Показано, что добавление более легкого инертного газа может увеличить эффективность генерации УФ излучения гидроксила в 2-2.5 раза. Проанализировано влияние добавки более легкого инертного газа на изменение ионизационного и энергетического баланса плазмы. Показано, что концентрация добавляемого инертного газа



может быть существенно больше концентрации аргона.

**В третьей главе** исследуется возможность повышения эффективности УФ излучения молекул гидроксила за счет каталитического разрушения молекул воды с использованием диоксида титана  $TiO_2$ . Построена модель плазмы рассматриваемого разряда, учитывающая влияние катализатора  $TiO_2$  на разрушение молекул воды. Показано, что каталитическое разрушение (добавочное разрушение) действительно может заметно увеличить концентрацию молекул гидроксила в плазме, что при определенных условиях может увеличить эффективность генерации излучения 306.4 нм до двух раз. Экспериментально исследован разряд в смеси паров воды с аргоном в разрядных трубках, на внутреннюю поверхность которых был нанесен слой диоксида титана при различных условиях разряда. Измерены спектральные характеристики плазмы, рассеиваемая в плазме электрическая мощность и эффективность генерации УФ излучения гидроксила. Обнаружено заметное влияние диоксида титана на свойства плазмы, и прежде всего, на скорость появления молекул гидроксила в разряде, что свидетельствует о существенном влиянии на свойства плазмы дополнительного механизма разрушения молекул воды на гидроксил и атомарный водород.

**Четвертая глава** посвящена описанию результатов исследования импульсно-периодического разряда в смеси паров воды с аргоном. Измерены напряженность продольного электрического поля, напряжение на электродах, изменение тока в импульсе при различной температуре стенок разрядной трубки, световая отдача положительного столба и разряда как целого при изменении температуры стенок и параметров импульсно-периодического разряда (частота повторения импульсов, скважность). Показано, что введение молекул воды в разряд с аргоном существенно изменяет временные зависимости электрических характеристик разряда. Однако в исследуемом диапазоне разрядных условий не удается достичь заметного увеличения световой отдачи. В качестве причины полученного отрицательного результата приводится возможное образование отрицательных ионов в послесвечении импульсно-периодического разряда. В заключение главы рассмотрена возможность получения инверсной заселенности в плазме разряда в смеси паров воды с инертными газами.

**В Заключении** кратко изложены основные полученные результаты. К наиболее значимым результатам, полученным в диссертации и имеющим несомненную научную новизну, можно отнести следующие:



- проведен анализ возможности увеличения эффективности генерации УФ излучения молекул гидроксила плазмой разряда в смеси паров воды с инертными газами;

- исследована плазма разряда в смеси паров воды с несколькими инертными газами с целью увеличения эффективности генерации ультрафиолетового излучения молекул гидроксила; показано, что использование более легких по отношению к аргону инертных газов (Ne, He) может дать возможность увеличения концентрации молекул гидроксила в исследуемой плазме и повысить эффективность генерации УФ-излучения;

- исследовано воздействие каталитического разрушения молекул воды (в качестве катализатора использовалась двуокись титана  $TiO_2$ ) на свойства плазмы разряда в смеси паров воды с инертными газами; экспериментально и на основе моделирования показано заметное влияние воздействия катализатора на свойства плазмы, которое может привести к росту интенсивности УФ-излучения плазмы;

- изучено влияние импульсно-периодического режима питания на характеристики разряда в смеси паров воды с инертными газами; выявлено сильное влияние формирования отрицательных ионов на характеристики плазмы; показано, что в исследованных разрядных условиях эффективность генерации УФ-излучения не превосходит значений, полученных в режиме постоянного тока;

- доказана возможность получения когерентного излучения с использованием плазмы тлеющего разряда в смеси паров воды с инертными газами.

Несомненным достижением автора, с нашей точки зрения, является широкая постановка задачи и всестороннее рассмотрение проблемы, включающее в себя и достаточно нетрадиционный подход — использование катализатора для влияния на плазмохимические процессы в тлеющем разряде.

При общей положительной оценке работы Михайлова Д.В. можно сформулировать несколько **вопросов** и **замечаний**:

1. Одной из важных характеристик исследуемого разряда является давление паров воды. Молекулы воды определяют процессы тушения возбужденных атомов инертных газов, в результате которых рождаются молекулы гидроксила. Однако из текста диссертации и автореферата не вполне ясно как определялось давление паров воды.
2. При исследовании разряда с диоксидом титана последний наносился поверх слоя люминофора. Как это влияло на свойства люминофора и какова была толщина слоя  $TiO_2$ ?



3. В диссертации разряд в смеси паров воды с аргоном рассматривается главным образом как источник света. Однако простые оценки показывают, что эффективность генерации УФ излучения гидроксила 306.4 нм в рассматриваемой плазме составляет 35-40%. Это весьма высокая величина, позволяющая рассматривать этот разряд как очень эффективный источник УФ излучения (например, эффективность генерации резонансной линии ртути 254 нм составляет ~60%, что, по-видимому, является рекордным). Проблемой может оказаться присутствие люминофора, который является источником молекул воды и который фактически не позволяет УФ излучению выходить из разряда. Можно ли предложить использование другого вещества в качестве «резервуара» молекул воды?

Отмеченные недостатки никоим образом не снижают ценности работы Михайлова Д.В., выполненной на высоком научном уровне. Полученные результаты сомнения не вызывают.

Результаты диссертационной работы Михайлова Д. В. могут быть использованы в научных учреждениях, где ведутся исследования по физике и химии плазмы, исследования газового разряда, светотехнике. Среди них можно отметить такие организации, как Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Казанский федеральный университет, Таджикский национальный университет (г. Душанбе), Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (г.Москва), Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва). Результаты работы могут быть использованы при чтении спецкурсов по физике и химии плазмы в высших учебных заведениях.

Результаты исследований полностью отражены в трех публикациях в ведущих российских и международных рецензируемых изданиях. Материалы диссертации прошли апробацию на достаточном числе Всероссийских и Международных конференций. Автореферат диссертации включает все разделы диссертации и хорошо передает ее основное содержание.

Доклад диссертанта был заслушан и одобрен на семинаре отдела кинетики и катализа ИХФ РАН 16 мая 2018 года.

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и



«Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №335 от 21 апреля 2016 года, и является научно-квалификационной работой, в которой рассмотрены и решены научные задачи, имеющие значение для физики низкотемпературной плазмы. Автор диссертации Михайлов Дмитрий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

ведущий научный сотрудник  
лаборатории химической  
физики наноструктур  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института химической физики  
им. Н.Н. Семенова  
Российской академии наук  
д.ф.-м.н.



М.Г.Голубков

*Почтовый адрес:* 119991 Москва, ул. Косыгина, д. 4, ИХФ РАН  
*Телефон:* +7-495-9397322  
*E-mail:* golubkov@chph.ras.ru

17 мая 2018 года