

ОТЗЫВ

Официального оппонента

на диссертационную работу Мельникова Антона Дмитриевича

«Исследование вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом на оксид-содержащих материалах и многокомпонентных смесях для задачи плазменной сепарации ОЯТ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Актуальность темы работы

В диссертационной работе представлены результаты исследования диффузного вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом. Особенность рассматриваемой схемы разряда состоит в наличии независимого источника подогрева тигля, который дает возможность поддерживать катод разряда при высокой средней температуре. Высокая средняя температура катода, в свою очередь, позволяет обеспечить условия для протекания тока на материалах, которые при нормальных условиях являются диэлектриками. Таким образом, на основе данного типа разряда возможно создать источник для перевода в плазменное состояние керамических материалов, при этом сохраняется высокая производительность характерная для дуговых разрядов. Исследование и развитие данного метода генерации плазмы может быть актуально для задач, связанных с нанесением покрытий.

Проведенные соискателем исследования, имеют конкретную цель, связанную с развитием метода плазменной переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Она состояла в определении возможности создать на основе диффузной вакуумной дуги источник плазмы потенциально способный переводить ОЯТ в состояние низкотемпературной плазмы. Задача переработки ОЯТ на сегодняшний день крайне важна, т.к. атомная энергетика стремится перейти к замкнутому ядерному топливному циклу, для осуществления которого необходимо повышение производительности и эффективности переработки ОЯТ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, рисунков и таблиц. Полный текст диссертации изложен на 140 страницах, библиография включает 143 наименования.

Во введении диссертационной работы отражены цель и задачи, которые ставил перед собой соискатель при выполнении диссертационной работы, обосновывается актуальность темы исследования. Отмечается в чем состоит научная новизна результатов, представленных в работе, их практическая и теоретическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту. В конце заключения отражен личный вклад соискателя, приведены список докладов на конференциях, где были апробированы результаты работы, и перечень основных публикаций по материалам диссертации.

Первая глава содержит обзор литературы по нескольким темам. Более подробно раскрывается актуальность темы диссертационной работы, как с общезначимой точки зрения, так и конкретного практического приложения работы – метода плазменной переработки ОЯТ. Приводится обзор работ, в которых исследовался диффузный

вакуумный разряд с различными материалами катодов. Затрагивается вопрос влияния внешнего магнитного поля на параметры разряда.

Вторая глава посвящена созданному соискателем времяпролетному масс-спектрометру. Рассматриваются уже существующие подходы к исследованию плазмы при помощи времяпролетной масс-спектрометрии. Обосновывается необходимость создания собственного прибора. Описаны результаты испытаний прибора и достигнутые характеристики.

В третьей главе представлены результаты исследования вакуумного дугового разряда с керамическим катодом. Материалом катода, моделирующим диоксид урана выступал диоксид церия. Описаны схема эксперимента и применяемые методы диагностики вакуумного дугового разряда. Приведены результаты исследования условий стационарного горения разряда и реализации диффузной формы привязки тока на катод. Установлено время длительности стационарного горения при определенной массе катода. Показано, что в таких режимах температура катода слабо влияет на ионный состав плазмы. При повышении тока разряда обнаружено снижение доли молекулярных ионов. Кроме того, представлен расчет равновесного состава пара над катодом, в котором учитывалась неконгруэнтность фазового перехода диоксида церия, по результатам которого показана большая доля кислорода в плазмообразующей среде. Проведена экспериментальная проверка и обнаружено незначительное содержание отрицательных ионов кислорода в ионном составе плазмы.

В четвертой главе излагаются результаты экспериментов, в которых в качестве материала катода использовалась смесь оксида и металла. Подобный мультикомпонентный катод позволяет лучше моделировать ОЯТ. Использовались смеси диоксида церия и хрома, и диоксида титана и хрома. Варьировалось массовое соотношение и показано как от него зависят характеристики разряда. В случае смеси диоксида церия с хромом, соискателем был реализован диффузный тип привязки тока на катод разряда, и показано что диоксид церия выступал источником термоэлектронов, а хром источником пара. Изучены параметры генерируемой плазмы, в том числе: ионный состав, концентрация и температура электронов, средний заряд. Показано, что в случае не термоэмиссионного оксида TiO_2 на катоде разряда наблюдается контрагирование тока и при этом в ионном составе заметно увеличивается доля оксида, в сравнении с термоэмиссионным оксидом CeO_2 . В главе обсуждается влияние теплофизических свойств используемых материалов катодов на тип катодной привязки, реализующейся в разряде и, как следствие, на возможность варьировать напряжение разряда изменяя мощность подогрева тигля.

Пятая глава затрагивает вопрос влияния внешнего магнитного поля на параметры диффузного вакуумного дугового разряда и генерируемой плазмы. Для проведения исследования была создана экспериментальная установка, состоящая из вакуумной системы, магнитных катушек Гельмгольца и источника плазмы. Источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом, применявшийся в данной части работы, был специально разработан и создан с целью улучшения его характеристик, в сравнении со использовавшимся ранее источником плазмы. Показана возможность осуществить диффузную форму вакуумного дугового разряда на металлическом катоде из гадолиния во внешнем аксиальном магнитном поле.

В заключении к диссертационной работе сформулированы наиболее важные полученные результаты.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

Получены новые экспериментальные результаты об ионном составе плазмы диффузного вакуумного дугового разряда с керамическим катодом. Установлены зависимости состава плазмы от температуры катода и тока разряда. Показано, что при использовании оксид-содержащих катодов возможно присутствие отрицательных ионов кислорода в составе плазмы в режимах с низким током.

Разработан новый источник плазмы на основе вакуумного дугового разряда с подогреваемым катодом и впервые проведены исследования диффузного типа вакуумной дуги во внешнем магнитном поле.

Ценность работы соискателя состоит в возможности практического применения полученных результатов в задаче плазменной переработки ОЯТ, предложенных схем масс-спектрометра и источника плазмы. Результаты о реализации диффузного и контрагированного типа дуги, параметры наблюдавшихся катодных пятен, полученные зависимости параметров плазмы от режимов источника и типа катода могут быть полезны при теоретическом рассмотрении физических процессов вакуумного дугового разряда. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Объединенном институте высоких температур РАН, Иркутском государственном техническом университете, Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт», в Институте сильноточной электроники СО РАН, Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ (НИЯУ МИФИ), Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Институте прикладной физики РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Материалы диссертации достаточно полно представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Публикации. По теме работы (кроме трудов конференций) автор имеет 7 статей в журналах из перечня ВАК, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора отражен в основных положениях, выносимых на защиту и содержании диссертации.

По результатам представленной работы необходимо сделать несколько замечаний:

- 1) При исследовании многокомпонентного катода из смеси диоксида церия и хрома, показано, что в составе плазмы более 90% составляет хром. При этом для задачи сепарации в плазменное состояние необходимо перевести весь катод, включая диоксид церия, который попадает в состав только в конце эксперимента. Как данный результат интерпретировать в контексте плазменной переработки?
- 2) Для случая многокомпонентного катода (глава 4) не приводятся оценки динамики горения разряда при существенном уходе одного из компонентов катода со смесью материалов (например, уход хрома)
- 3) В тексте отсутствует подробное описание схемы электропитания, характеристик используемых источников, схемы поджига разряда, а также зондовой диагностики (конструкция зонда, схема развертки и сбора данных). Из-за этого, например, сложно сделать вывод о причинах и характере разрушения анода в главе 5, а также о возможности обеспечения электрической изоляции разрабатываемого плазменного источника от заземленной камеры.
- 4) Результаты испытания масс-анализатора предшествуют разделу с описанием экспериментальной установки, что требует предварительного изучения более позднего раздела.

- 5) В тексте диссертации не показано какая доля материала осаждается на аноде и прилегающих к электродной системе конструктивных элементах. Этот вопрос важен для обоснования эффективности преобразования в плазму, а также ресурса предлагаемого устройства.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Мельников А.Д. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, и.о. зав. кафедрой физики плазмы, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Эл. почта: YMGasparyan@mephi.ru, тел.: 8(495)7885699 доб.9983

Юрий Микаэлович Гаспарян

30 ноября 2023 г.



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

В.М. Саморев