

Резюме НИР, выполняемой в рамках ФЦП

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»

Номер контракта: 11.519.11.6021

Тема: Исследование энергоёмкости полученных сильносвязанных кулоновских систем в конденсированном гелии.

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Ключевые слова: газовый разряд, диагностика, конденсированный гелий, криогенные температуры, пылевые частицы, нанокластеры, примесь-гелиевые конденсаты.

Цель исследования, разработки.

Объектом исследования являлись примесь-гелиевые конденсаты ПГК и пылевые структуры, образованные ионизированными примесными нанокластерами и заряженными микрочастицами в объеме конденсированного гелия.

Работы были направлены на разработку энергоёмких (с энергосодержанием > 1 кДж/г) систем в конденсированном гелии для накопления энергии. разработку энергоёмких (с энергосодержанием > 1 кДж/г) систем в конденсированном гелии для накопления энергии.

Основные результаты проекта.

В результате выполнения работ на этапе 1:

- Были разработаны и созданы экспериментальная установка и диагностический комплекс для визуализации и регистрации плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде постоянного тока при криогенных температурах. Созданная экспериментальная установка позволяет исследовать плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде постоянного тока при криогенных температурах в диапазоне 4.2-77 К. Проведенный с учетом ион-атомных столкновений кинетических процессов взаимодействия пылевых частиц с плазменной компонентой при криогенных температурах численный анализ позволил выделить основные механизмы, приводящие к наблюдаемому в экспериментах увеличению плотности плазменно-пылевых структур.

- Впервые спектры люминесценции при разрушении образцов ПГК, приготовленных из газовых смесей составов $[N_2]:[Ne]:[He]=1:20:500$ и $[N_2]:[Kr]:[He] = 1:50:10000$, зарегистрированы в динамике, с временным разрешением от 0.4 с. Показано, что основным каналом в обоих случаях является люминесценция атома кислорода на переходе ($^1S - ^1D$). Впервые в спектрах люминесценции при разрушении образцов ПГК, приготовленных из газовых смесей составов $[N_2]:[Ne]:[He]=1:20:500$, зарегистрирована γ -линия, что предпо-

лагает возможность существования в данных образцах стабилизированных ионов. Данные результаты были пролучены благодаря использованию экспериментальных методик зарубежного партнера (группы проф. Ли).

В результате выполнения работ на этапе 2:

- Проведены разработка, создание и отладка методов и систем инъекции и визуализации частиц микронных и нано размеров на поверхность и в объеме сверхтекучего гелия. Проведены разработка и создание метода регистрации пикоамперных токов при воздействии на образцы «замороженной» плазмы – примесь-гелиевые конденсаты, образованные ионизированными примесными нанокластерами и их разрушении. Создан метод регистрации пикоамперных токов с интегрированными в измерительную ячейку термометром и нагревателем. Проведены модернизация и отладка экспериментального стенда, а так же проведены тестовые эксперименты по формированию «замороженной» плазмы кулоновских микро- и наночастиц в том числе с высокой концентрацией (10^{16} - 10^{17} см⁻³) в объеме сверхтекучего гелия. Выполнены первые эксперименты по стабилизации заряженных нанокластеров молекулярного азота в сверхтекучем гелии. Модернизирован метод формирования примесь-гелиевых конденсатов, содержащих ионизированные нанокластеры.

В результате выполнения работ на этапе №3:

- Проведены экспериментальные исследования по определению наиболее эффективного способа зарядки микрочастиц при использовании различных методов ионизации (электрический разряд или фотоионизация) над поверхностью и в объеме сверхтекучего гелия. Экспериментально определены эффективности формирования ионов в нанокластерах при использовании электрического разряда и фотоионизации над поверхностью сверхтекучего гелия. Было установлено, что для создания стационарных систем в макроскопическом масштабе оптимальной является методика конденсации газовой струи, прошедшей зону радиочастотного разряда. Успешно проведены измерения токов на стадии разрушения примесь-гелиевых конденсатов, образованных примесными (в том числе ионизированными) нанокластерами для определения наиболее эффективного способа ионизации нанокластеров.

- Исследованы стабильности наиболее энергоёмких систем в конденсированном гелии и вне жидкого гелия – проведено определение температурной зависимости концентраций атомов, стабилизированных в образцах ПГК, методом непрерывного ЭПР. Таким образом результаты выполненной экспериментальной работы показали, что добавление атомов криптона в газовую смесь, используемую для приготовления образцов ПГК, позволяет получить примерно в 3 раза более высокие среднюю $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и локальную $2 \cdot 10^{21}$ см⁻³ концентрации атомов азота. Данные результаты были пролучены благодаря использованию экспериментальных методов зарубежного партнера.

В результате выполнения работ на этапе №4:

- Проведены теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия заряженных микро- и наночастиц в объёме сверхтекучего гелия и формирования упорядоченных структур. В результате показано, что взаимодействие заряженных микро- и наночастиц в объёме сверхтекучего гелия носит существенно анизотропный характер. При этом наблюдается формирование объемных упорядоченных структур, имеющих выделенное направление, таких как, например, цепочечные структуры. Рассмотрены условия формирования цепочечных структур заряженных частиц, для широкого круга изотропных парных потенциалов, которые наиболее часто используются для моделирования взаимодействия в кинетике взаимодействующих частиц.

- Определены оптимальные условия накопления максимальных концентраций ионов в примесных нанокластерах с положительными и отрицательными величинами энергии сродства к электрону (Kr, H₂, O₂ и Ne, Ar, N₂, соответственно) комбинацией методов оптической спектроскопии и детектированием токов ионов на стадиях исследования и разрушения изучаемых образцов. Было установлено, что при содержании в конденсируемой смеси кислорода в количестве, превышающем количество азота, формирование примесью-гелиевых конденсатов происходит только в случае выключенного радиочастотного разряда. «Холодная» (попадающая в криостат без воздействия разряда) газовая смесь [O₂]/[Ne] = 1/100 при конденсации в сверхтекучем гелии быстро и эффективно образует кислород-гелиевый конденсат.

- Экспериментально определены максимальные плотности заряда, накапливаемого в конденсированном гелии на частицах микронного и нанометрового размеров в зависимости от условий ионизации частиц и материала, из которого они образованы. Предложенный метод позволяет накопить в жидкости концентрации положительно заряженных примесных нанокластеров, достаточные для проведения их исследований.

- Проведено изучение основных каналов выделения энергии при разрушении энергоёмких систем на основе радикалов. Изменение спектров при разогреве азот-неон-гелиевых образцов позволило установить процессы, происходящие при разрушении образцов ПГК, образованных двух- либо трёхслойными примесными нанокластерами. Нанокластеры формируются из примесных частиц в конденсируемой гелиевой газовой струе и образованы ядром молекулярного азота и оболочкой неона, допированных атомами азота. Данные результаты были пролучены благодаря использованию экспериментальных методов зарубежного партнера.

- Проведены обобщение и оценка результатов, полученных в ходе всего периода выполнения НИР, в том числе оценка эффективности способов создания энергоёмких криогенных материалов на основе примесных систем в конденсированном гелии. Достигнутая величина локальной концентрации позволяет оценить теоретически верхнюю границу плотности энергии, которой можно было бы достичь прессованием образца без ре-

комбинационных потерь среди стабилизированных атомов 3.2 кДж/см^3 вполне соответствует заявленным в контракте задачам.

Таким образом, экспериментально определены условия формирования примесь-гелиевых конденсатов с рекордно высокими локальными плотностями стабилизированных атомов азота (до $2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) и определены возможные способы достижения в этих конденсатах удельной энергоёмкости 4-6 кДж/г; определены важные условия выполнения которых необходимо для стабилизации заявленных плотностей зарядов в конденсированном гелии: создание металлических примесных структур в конденсированном гелии при помощи лазерной абляции; на основании свойств жидкого гелия рассчитаны оптимальные условия хранения энергоёмких примесь-гелиевых конденсатов – в объёме сверхтекучего гелия при температуре $\approx 1.9 \text{ К}$.

Полученные результаты показывают, что наличие значительного количества жидкого гелия в криогенных материалах не ухудшает свойства, например, возможного ракетного топлива на основе таких материалов, но благодаря наличию жидкого гелия, ожидается упрощение системы подачи топлива в камеру сгорания; малая масса атома гелия и эффективная трансформация всей тепловой энергии, получаемой атомами гелия в камере сгорания, в кинетическую (без потерь на возбуждение колебаний и вращений, имеющих место в молекулах) являются положительными моментами для его применения в ракетных топливах для повышения удельного импульса, пропорционального обратной величине от квадратного корня от средней массы продуктов сгорания топлива.