

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D05301 – «Физика»

Самарханова Қуаныша Қанатұлы

Экспериментальное исследование процессов преобразования энергии продуктов ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ в энергию оптического излучения

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов преобразования кинетической энергии продуктов ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ в энергию оптического излучения. В работе установлены основные закономерности формирования излучающих состояний в низкотемпературной ядерно-возбуждаемой плазме инертных газов при возбуждении продуктами данной ядерной реакции.

Актуальность темы исследования. Исследование оптического (лазерного и спонтанного) излучения ядерно-возбуждаемой плазмы представляет интерес для разработки способа вывода энергии из ядерного реактора, а также для контроля и регулирования параметров ядерных реакторов. Непосредственная накачка активных сред осуществляется, как правило, продуктами ядерных реакций с тепловыми нейтронами ядерного реактора: ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, ${}^{235}\text{U}(n,f)\text{F}$ или другими. Рабочая среда должна содержать ${}^{235}\text{U}$, ${}^3\text{He}$ или ${}^{10}\text{B}$, либо соединение с этими изотопами наносится на стенки камеры. Менее исследованным было применение ядерной реакции с литием-6 с тепловыми нейтронами. Относительная большая длина пробега ядер трития в литии (130 мкм) и газовых средах (~35 см в гелии при атмосферном давлении) позволяет возбуждать значительные объёмы газов и обеспечивать большую величину вкладываемой в газ мощности в сравнении с продуктами реакции с ${}^{10}\text{B}$. Значительный интерес к исследованиям в этой области связан также с существенным отличием механизмов заселения энергетических уровней при накачке от процессов заселения в традиционных газоразрядных лазерах.

В данной диссертационной работе с целью изучения закономерностей формирования излучающих состояний в инертных газах при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ рассматриваются процессы распыления лития, взаимодействия его паров с буферным газом, а также параметры, определяющие возможность создания инверсии населенностей на $2p-1s$ -переходе. Актуальность диссертационной работы обусловлена решением научно-технической проблемы преобразования энергии ядерной реакции в энергию оптического излучения и необходимостью выявления закономерностей формирования излучающих состояний в ядерно-возбуждаемой плазме на основе инертных газов при накачке продуктами реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. Необходимо установить, будет ли достигнута достаточная плотность паров лития в газе для эффективного расселения $1s$ -уровня атома инертного газа и для создания инверсии населенностей на $2p-1s$ -переходе.

Решение данной задачи требует комплексного подхода, включающего исследование люминесценции инертных газов и процессов распыления лития при возбуждении наносекундным электронным пучком, а также проведение реакторных экспериментов на импульсном ядерном реакторе ИГР с потоком тепловых нейтронов $7 \cdot 10^{16}$ н/см²с при длительности импульса 0,12 с.

Для реализации этой цели необходимо разработать специальную экспериментальную установку, облучательное устройство с литиевым источником возбуждения газовых смесей и методику проведения внутриреакторных экспериментов на реакторе ИГР. Предварительные исследования проводятся на наносекундном ускорителе электронов, что позволяет в более удобных условиях исследовать процессы распыления лития в инертные газы под действием электронного пучка, определить отличия по сравнению с возбуждением ядерными частицами, и тем самым существенно сократить объем необходимых реакторных экспериментов.

Таким образом, тематика диссертационной работы обусловлена и обоснована необходимостью фундаментального изучения процессов в ядерно-возбуждаемой плазме газовых смесей. Работа направлена на получение новых экспериментальных данных по распылению лития в инертный газ при возбуждении электронным пучком и продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. Реализация поставленных задач требует проведения комплексных исследований с использованием как ускорительных, так и реакторных установок, что позволяет в полной мере использовать научный и технический потенциал Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Цель диссертационной работы – установить основные закономерности формирования излучающих состояний в смесях инертных газов при распылении лития продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) разработать и изготовить экспериментальную установку и облучательное устройство с литиевым источником возбуждения газовых сред для проведения исследований на импульсном ядерном реакторе ИГР;

2) разработать методику проведения внутриреакторных экспериментов по исследованию спектрально-временных характеристик оптического излучения газовых смесей, возбуждаемых продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$;

3) получить воспроизводимые экспериментальные данные по спектрально-временным характеристикам оптического излучения газовых сред, определить основные плазмохимические реакции, а также выявить механизмы заселения и дезактивации энергетических уровней на 2p-1s переходах атомов инертных газов при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

Объектом исследования является низкотемпературная ядерно-возбуждаемая плазма газовых сред, образованная при взаимодействии продуктов ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ с газовыми смесями инертных газов

(He-Ar, He-Xe) в условиях облучения в активной зоне импульсного реактора ИГР.

Предметом исследования является кинетика процессов заселения и дезактивации энергетических уровней на $2p-1s$ переходах атомов инертных газов при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

Методы исследования. В диссертационной работе для реализации экспериментальных исследований применялись спектральные, масс-спектрометрические и расчётно-теоретические методы.

Исследование спектрально-временных характеристик излучения газовых смесей (He-Ar, He-Xe) при их возбуждении ионизирующим излучением проводилось с использованием спектрального метода диагностики плазмы. Этот метод, в сочетании с измерением временной зависимости мощности импульсного реактора, позволил определить порог генерации, форму и длительность импульсов оптического излучения.

Для регистрации спектров использовался оптический спектрометр QE Pro-Abs фирмы *Ocean Insight*, работающий в диапазоне длин волн от 200 до 950 нм, с лицензионным программным обеспечением *OceanView*. Для регистрации сигналов с высокой временной точностью применялась линейка фотодиодов Thorlabs с различной спектральной чувствительностью, а также монохроматор МДР-204 с модулем ФЭУ PDM02-9113W-CN. Временные характеристики сигналов регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tektronix TBS2204B с лицензионным программным обеспечением. Масс-спектрометрия проводилась с использованием прибора RGA-100 для контроля качественного состава газовых смесей.

Дополнительно применялись методы численного моделирования – теплофизические и нейтронно-физические расчёты, лицензионные программные комплексы, такие как: ANSYS FLUENT и MCNP5, направленные на обоснование параметров облучательных устройств, а также на обеспечение безопасности проведения экспериментов в активной зоне импульсного реактора ИГР.

Также в работе использовался компактный наносекундный ускоритель электронов, выполненном на основе рентгеновского дефектоскопа Арина-2, что позволило предварительно исследовать процессы распыления лития в инертный газ в более контролируемых условиях вне активной зоны реактора.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- разработана и изготовлены экспериментальная установка и облучательное устройство с литиевым источником возбуждения газовых смесей для проведения внутриреакторных исследований на реакторе ИГР. Разработанное устройство защищено патентом на полезную модель «Облучательное устройство для проведения экспериментов на импульсном графитовом реакторе» (№ 7162, опуб. 03.06.2022 г.).

- предложена и апробирована методика проведения реакторных экспериментов в активной зоне реактора ИГР для исследования спектрально-временных характеристик оптического излучения газовых смесей, возбуждаемых продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$;

– получены новые экспериментальные данные по спектрально-временным характеристикам излучения газовых смесей (He-Ar, He-Xe), возбуждаемых продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ в условиях реакторного облучения;

– выявлены и установлены механизмы формирования и дезактивации излучающих состояний на $2p-1s$ переходах в смесях инертных газов при накачке продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная экспериментальная установка, облучательное устройство с литиевым источником возбуждения газовых смесей и методика проведения внутриреакторных экспериментов на импульсном реакторе ИГР. Впервые создана специализированная экспериментальная установка, предназначенная для исследования спектрально-временных характеристик оптического излучения, возникающего при возбуждении газовых смесей продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. Экспериментальная установка включает газо-вакуумную систему, информационно-измерительную систему (ИИС), и облучательное устройство (ОУ) с литиевым источником возбуждения газовых сред, размещаемое непосредственно в центральном экспериментальном канале реактора ИГР – в зоне максимального потока тепловых нейтронов. Газо-вакуумная часть реализована на базе поста TURBOLAB 90i 63ISO-K/SC7plus/F/N для создания и обеспечения необходимых условий в ОУ. ИИС включает три подсистемы: регулирования и стабилизации температуры корпуса ОУ; системы оптической регистрации; масс-спектрометрической диагностики газовой фазы. Для регистрации спектрально-временных характеристик оптического излучения газовых смесей применяются спектрометр QE Pro-Abs (Ocean Insight, Singapore) с лицензионным программным обеспечением *OceanView*, кремниевый DET100/AM и инди-галлиевый PDA10D2 фотодетекторы (Thorlabs, USA), осциллографы TBS2204B (Tektronix) с лицензионным программным обеспечением Keithley KickStart Software и TPS2012 (Tektronix), модуль фотоэлектронного умножителя PDM02-9113-CN (ET Enterprises, UK), сопряжённый с монохроматором МДР-204 («ЛОМО ФОТОНИКА плюс», РФ), что обеспечивает высокоточное измерение параметров оптического излучения. Разработана и апробирована методика проведения реакторных экспериментов в режиме «Вспышка», оформленная в виде регламентированной Программы. Методика включает пошаговые процедуры подготовки, запуска, синхронизации с импульсом реактора и обработки полученных данных, обеспечивая воспроизводимость и безопасность исследований.

2. Спектрально-временные характеристики оптического излучения при распылении лития в инертный газ под воздействием ионизирующего излучения.

С целью моделирования процессов возбуждения газовой среды продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ проведена серия экспериментов с облучением литиевого слоя пучком быстрых электронов энергией 150 кэВ и

длительностью 5 нс. Облучательная камера заполнялась аргоном, криптоном или ксеноном при давлениях от 10 до 60 кПа. При температуре литиевого слоя 650-680 К в спектре излучения появляются линии лития, интенсивность которых существенно возрастает с увеличением температуры. Световое излучение на переходах атома лития возникает одновременно с излучением на переходах атомов инертных газов и достигает максимума через 20-30 нс после импульса пучка электронов.

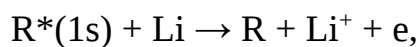
Проведена серия внутриреакторных экспериментов на импульсном реакторе ИГР, в ходе которых получены новые экспериментальные данные и зарегистрированы воспроизводимые спектрально-временные характеристики оптического излучения газовых смесей, возбуждаемых продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. В качестве исследуемых газовых смесей использовалась смесь He-Ar и He-Xe при давлениях 100 кПа и 99,4 кПа соответственно, в соотношении 100:1. Тепловая мощность реактора ИГР в данных экспериментах в режиме работы реактора «Вспышка» составляла 8,9 ГВт и 9,49 ГВт, соответственно. Зарегистрированы спектры излучения, а также осциллограммы излучения, настроенные на длины волн 750,4 нм для He-Ar смеси и 823 нм для He-Xe смеси, соответственно.

3. Кинетика плазменных процессов и механизмы заселения–дезактивации энергетических уровней на $2p-1s$ переходах атомов инертных газов при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

По результатам вне реакторных экспериментов установлено, что основным каналом заселения уровней лития за время, сравнимое с длительностью возбуждения электронным пучком, является поверхностная ионизация за счёт взаимодействия литиевого слоя с ионами и метастабильными атомами инертного газа. В последующем, световое излучение образуется в ходе плазмохимических реакций в объёме газа. При температурах слоя, соответствующих давлению насыщенного пара лития от 1 мПа до 130 мПа, необходимая плотность паров (≥ 1 Па) обеспечивается преимущественно за счёт распыления лития ядерными частицами.

На основе реакторных экспериментов определены основные плазмохимические реакции и рассчитаны скорости процессов, протекающих в ядерно-возбуждаемой плазме газовых смесей He-Ar и He-Xe при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. На основе результатов реакторных экспериментов установлены механизмы заселения и дезактивации энергетических уровней на $2p-1s$ переходах атомов инертных газов, а также проанализирована кинетика плазменных процессов.

Основным каналом, приводящим к заселению уровней лития, является процесс Пеннинга (R – атом инертного газа):



Возбуждение распыленных атомов лития происходит в результате дальнейших плазмохимических реакций в газе. Литий может селективно тушить нижний уровень на $2p-1s$ -переходах инертных газов.

Сопоставление результатов реакторных и вне реакторных экспериментов позволило выявить общие закономерности протекания плазменных процессов при различных типах ионизирующего воздействия.

Практическая значимость. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные и выявленные закономерности кинетики процессов заселения и дезактивации энергетических уровней в инертных газах при возбуждении продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ представляют практическую ценность для разработки новых подходов к выводу энергии из ядерного реактора в форме оптического излучения. Результаты могут быть использованы при создании ядерно-энергетических установок, способных генерировать когерентное (лазерное) или спонтанное оптическое излучение. Исследования также представляют интерес с точки зрения создания детекторов ионизирующего излучения, а также в системах контроля и диагностики параметров активной зоны ядерных реакторов. Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы в процедуру проведения прикладных научных исследований в области прямого преобразования кинетической энергии ядерных частиц в энергию оптического излучения в филиале ИАЭ НЯЦ РК.

Полученные результаты экспериментальных исследований также вошли в сборник трудов НЯЦ РК «Исследования в поддержку развития атомной энергетики в Республике Казахстан» / под общей редакцией Э.Г. Батырбекова, и В.В. Бакланова, Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК Министерства энергетики РК.– Курчатов, 2021.– 278 с.: ил.269. – ISBN 978-601-06-7963-4».

Личный вклад автора. Постановка цели и задач диссертационного исследования, обсуждение полученных результатов и формулировка основных выводов проведены совместно с научными консультантами. Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора литературных данных и патентного поиска, в непосредственном участии в формировании методических подходов к обеспечению проведения вне реакторных исследований и экспериментов на реакторах ИВГ.1М и ИГР, подготовке и проведении непосредственно самих экспериментальных работ, анализе и обработке полученных экспериментальных данных, в проведении расчетных работ, исследовании закономерностей формирования излучающих состояний в смесях инертных газов при распылении лития продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$, а также в подготовке основных публикаций по теме диссертационной работы. Все работы проводились в тесном сотрудничестве с ведущими учеными и специалистами филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК.

Связь темы диссертационной работы с планами научно-исследовательских программ. Значительная часть настоящей работы выполнена при финансовой поддержке Государственного учреждения «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» в рамках Договора №187 от 16.11.2020 года по теме «Исследование по созданию квазинепрерывного лазера на р-s-переходе атома инертного газа с возбуждением продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ » (AP08856017), а также

часть работы выполнена в рамках реализации научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (BR09158470) по теме: «Разработка физических основ вывода энергии из ядерного реактора в виде когерентного оптического излучения».

Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе, обеспечивается корректностью, точностью и оригинальностью поставленных задач, взаимосогласующимися результатами реакторных и вне реакторных экспериментов, масс-спектро스코пии, оптико-эмиссионной спектрометрии. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых зарубежных научных журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на десяти международных конференциях:

1. International online conference «Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021» (Ust-kamenogorsk, Kazakhstan, 2021, February 19);

2. IX международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (г. Курчатов, Казахстан, 07-09 сентября 2021 г.);

3. XV International conference on pulsed lasers and laser applications. – AMPL-2021 – Tomsk, October 12-17, 2021.;

4. 20th International Conference Laser Optics (ICLO 2022).– St.Petersburg, Russian Federation, June 20-24, 2022;

5. 10th International Conference on Nanomaterials and advanced energy storage systems (INESS-2022), (Astana, August 4–6, 2022);

6. 13th International Conference on Tritium Science and Technology - Tritium 2022. – Bucharest, Romania, October 16-21, 2022;

7. 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). – Tomsk, Russia, October 2-8, 2022;

8. VIII международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2022, посвященная 100-летию со дня рождения лауреата Нобелевской премии по физике Басова Николая Геннадиевича. – Москва, НИЯУ МИФИ, РФ, 22-25 марта, 2022;

9. XXIII International Symposium on Solid State Dosimetry – ISSSD-2023 – Monteria, Colombia. September 25-29, 2023;

10. X международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (г. Курчатов, Казахстан, 12–14 сентября 2023 г.).

На конференции-конкурсе:

1. XX Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК, Институт атомной энергии НЯЦ РК (г. Курчатов, Казахстан, 6–8 октября 2021 г.);

1. Третье ежегодное собрание Казахстанского физического общества (г. Курчатов, Казахстан, 7–11 июня 2023 г.).

Кроме того, основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры физики, на объединенных научных семинарах факультета естественных наук и технологий и Научно-техническом совете НАО ВКУ имени С. Аманжолова, а также на Научно-технических советах РГП НЯЦ РК и филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК, а также на семинарах PhD-докторантов.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 печатных работах, из них: 5 статей в журналах индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 1 патент на полезную модель Республики Казахстан, в сборниках трудов международных конференций – 14, и в других изданиях – 1.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 112 страницах, содержит 52 рисунков, 10 таблиц и список использованных источников из 102 наименований.