АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060500 – Ядерная физика»

МОЛДАБЕКОВ ЖАНГАЛИ МУСЫРМАНКУЛОВИЧ

ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА И ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАНОВКАХ «ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС»

Общая характеристика работы

В диссертационной работе исследуются параметры выхода нейтронов, образующихся в результате DD реакций ядерного синтеза в установке плазменного фокуса, а также механизмы, влияющие на их генерацию. Кроме того, изучены радиационная эрозия и повреждения, возникающие при ядерном взаимодействии нейтронов и ионов с пластинами вольфрама (^{182}W) и молибдена (^{92}Mo).

Актуальность темы

В настоящее время проблема осуществления управляемого термоядерного синтеза является одним из фундаментальных направлений ядерной физики. Исследования в этой области связаны не только с энергетическими задачами, но и тесно сопряжены с изучением кинетики высокоэнергетических ядерных реакций, продуктов синтеза, механизмов генерации нейтронов и особенностей их взаимодействия с веществом. Для реализации подобных исследований в последние годы наблюдается значительный рост интереса к импульсным плазменным установкам, позволяющим непосредственно управлять энергией частиц. Одной из таких установок является система плазменного фокуса (ПФ). Она позволяет за короткое время (~10-50 нс) формировать плазму с плотностью порядка ~10^{19}-10^{24} см$^{-3}$ и ионы с энергией, достаточной для инициирования реакций синтеза. В установках плазменного фокуса в результате DD-реакций синтеза генерируются нейтроны с энергией 2,45 МэВ, а также потоки высокоэнергетических ионов и источники жёсткого рентгеновского излучения. Такой поток нейтронов является важным экспериментальным инструментом для исследования кинетики ядерных реакций, определения механизмов синтеза и анализа воздействия ядерного излучения на материалы. Однако проблема повышения стабильности и эффективности нейтронной эмиссии в установках ПФ до настоящего времени остаётся нерешённой и требует углублённого изучения DD ядерно-физической природы процессов термоядерного синтеза.

Одним из современных направлений научных исследований в области ядерной физики является установление механизмов генерации высокоэнергетических нейтронов и изучение особенностей их взаимодействия с веществом в конденсированных средах. Параметры выхода нейтронов в установках плазменного фокуса (ПФ) носят сложный многофакторный характер и зависят от условий протекания реакций синтеза,

энергетического спектра ионов, а также энергетической зависимости сечения ядерных реакций. Взаимодействие этих факторов приводит к временной нестабильности нейтронной эмиссии и импульсным флуктуациям. Для устранения подобных недостатков важной задачей ядерной физики является исследование ядерной кинетики термоядерных реакций и оптимизация параметров выхода нейтронов. Кроме того, известно, что генерация нейтронов осуществляется за счёт как термоядерных, так и ускорительных механизмов. Однако вопрос о том, какой из механизмов вносит доминирующий вклад и от каких параметров он зависит, до сих пор остаётся предметом дискуссий. В связи с этим исследование механизмов генерации нейтронов и их экспериментальное моделирование является одной из актуальных задач современной ядерной физики.

В настоящее время продукты термоядерных реакций в установках плазменного фокуса (ПФ), в том числе взаимодействие потоков ионов и нейтронов с материалами, приводящее к радиационной эрозии и повреждениям, имеют особое значение для испытания радиационной стойкости материалов, обеспечения ядерной безопасности и развития прикладной ядерной физики в мирных целях. В результате радиационного воздействия на пластины из вольфрама (^{182}W) и молибдена (^{92}Mo), а также протекания ядерных реакций типа (n,γ), в кристаллической решётке материалов возникают радиационные дефекты в виде дислокаций и вакансий. Вследствие накопления атомов изотопов He и H формируются радиационные блистеры и микротрещины, что представляет серьёзную угрозу для будущих термоядерных реакторов (ТЯР) и приводит к снижению их эксплуатационного ресурса и энергетической эффективности. В связи с этим исследование повреждений материалов после радиационного воздействия и их радиационной стойкости является одной из важнейших задач современной ядерной физики.

С учётом вышеизложенных проблем, определение параметров генерации термоядерных нейтронов с энергией в диапазоне 2,5-3 МэВ, исследование их связи с кинетикой реакций синтеза, а также комплексный экспериментальный анализ радиационного взаимодействия нейтронов с материалами представляют собой научно значимую задачу, направленную на решение фундаментальных и прикладных проблем ядерной физики, и обуславливают актуальность данной диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является определение основных ядерно-физических параметров, влияющих на интенсивность генерации термоядерных нейтронов при DD-реакции синтеза в разряде плазменного фокуса (ПФ), а также исследование радиационно-индуцированных структурных изменений и эрозии материалов, возникающих в результате их взаимодействия с нейтронами.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

– определение физических условий реализации DD термоядерной реакции синтеза в зависимости от параметров плазменного фокуса и исследование возможности генерации быстрых нейтронов в МэВ диапазоне;

– экспериментальное исследование влияния физических и энергетических параметров установки ПФ-4 на DD термоядерную реакцию синтеза и ядерные механизмы генерации нейтронов;

– определение степени радиационных повреждений и эрозии, возникающих в пластинах из ^{182}W и ^{92}Mo после воздействия нейтронного и ионного излучения в термоядерной экспериментальной установке ПФ-4, а также их зависимости от плотности потока.

Объект исследования

Параметры выхода нейтронов, возникающих в результате DD-реакции синтеза в разряде установки ПФ-4, а также процессы их ядерного взаимодействия с материалами ^{182}W и ^{92}Mo.

Предмет исследования

Влияние физических и энергетических параметров установки плазменного фокуса (ПФ) на кинетические параметры DD термоядерной реакции синтеза и генерацию нейтронов. Процессы смещения атомов и радиационной эрозии, возникающие в результате взаимодействия нейтронов с материалами ^{182}W и ^{92}Mo.

Методы исследования

Для достижения поставленных в диссертационной работе результатов были использованы следующие диагностические методы исследования: Для регистрации жёсткого рентгеновского излучения, исходящего из области синтеза, применялись сцинтилляционные детекторы ФЭК и СППД11-04; Для регистрации абсолютного выхода нейтронов при DD термоядерной реакции синтеза использовался детектор на основе активированной серебряной фольги со счётчиком СТС-5; для наблюдения формирования плазменной оболочки применялась камера Videoscan-415-2001 на базе ПЗС-матрицы; для регистрации сигналов использовался осциллограф марки LeCroy; для расчётного моделирования применялась программа SRIM; для исследования изменений после радиационного воздействия использовались: оптический микроскоп DM 6000M (Leica), сканирующие электронные микроскопы Hitachi High-Technologies Corporation (SU8200 FE SEM) и ZEISS (Crossbeam 540), а также атомно-силовой микроскоп (АСМ), применяемый для изучения структуры поверхности и её шероховатости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В установке плазменного фокуса ПФ-4 изменение параметров разряда приводит к увеличению энергии дейтериевых ионов в фазе сжатия, что обуславливает рост сечения реакции σ(E) с увеличением энергии. В результате скорость реакции синтеза возрастает до значений $R \sim 10^{16}$-10^{17} см$^{-3}$с$^{-1}$. Изменение времени ядерного взаимодействия приводит к снижению скорости реакции и формированию интенсивности генерации нейтронов в диапазоне $Y_n = 6 \cdot 10^7$-$2 \cdot 10^8$ нейтрон/разряд.

2. Изменение коэффициента анизотропии углового распределения нейтронов в диапазоне 2,32-2,9 свидетельствует о том, что в условиях разряда плазменного фокуса при DD термоядерной реакции синтеза вклад ускорительного механизма в генерацию нейтронов играет доминирующую роль по сравнению с термоядерным механизмом.

3. При уровне повреждений, начиная с 0,3 dpa (смещений на атом), в вольфраме в результате накопления дейтериевых ионов в вакансионных кластерах формируются плотные блистерные структуры. В диапазоне 0,6-0,9 dpa за счёт слияния блистеров малых размеров их плотность уменьшается примерно на ~65%, тогда как доля крупных блистеров увеличивается примерно на ~55%. Для молибдена при уровне повреждений в диапазоне 0,2-0,6 dpa поверхностные эрозионные изменения возрастают на 15-20%.

Новизна работы:

Новизна и оригинальность работы заключается в том, что в ней впервые:

1. В термоядерной плазме установлено влияние физических и энергетических параметров установки плазменного фокуса на параметры DD термоядерной реакции синтеза, и впервые экспериментально зарегистрирован выход нейтронов на уровне 10^6-10^8 нейтронов за разряд.

2. В экспериментальной установке ПФ-4 для оптимальных параметров, при которых наблюдается максимальный поток нейтронов, определён механизм, доминирующий в генерации термоядерных нейтронов.

3. Установлено экспериментально, что при увеличении радиационного взаимодействия нейтронных и ионных потоков в материале ^{182}W, начиная с уровня 0,6 dpa (смещения атомов), уменьшается количество плотных блистеров, образующихся вследствие накопления дейтериевых ионов в дислокационных решётках, вакансиях и межузельных дефектах. В то время как в материале ^{92}Mo при 0,4 dpa (смещения атомов) наблюдается увеличение ширины микротрещин.

Научно-практическая значимость работы

Полученные в диссертационной работе результаты имеют важное значение для ядерных исследований, разработки нейтронных источников, определения параметров, необходимых для глубокого понимания кинетики DD ядерных реакций, а также для выяснения механизмов генерации нейтронов. Кроме того, они обладают значительной научно-практической ценностью при экспериментальном моделировании радиационных повреждений и эрозии кристаллических решёток после ядерного взаимодействия нейтронов с веществом, а также при оценке радиационной стойкости материалов, применяемых в высокоэнергетических ядерных технологиях.

Личный вклад автора заключается в том, что весь объем выполненной диссертационной работы, выбор методики проведения исследований, решения задач, модернизация экспериментальной установки проделаны автором единолично. Постановка задач и обсуждение полученных

экспериментальных результатов проводились совместно с научными консультантами.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались: Proceedings of the International Conference on Advances and Applications in plasma physics (AAPP-2019), г.Санкт-Петербург, Россия 18-21 сентября 2019 г. 20th International conference on Radiation Effects in Insulators. Нурсултан, Казахстан 19-23 август 2019 г. Международная конференция студентов и молодых ученых «Фараби әлемі», Алматы, Казахстан, 6-9 апреля 2020 г. «The 2nd International Conference on High energy Physics, Material Science and Nanotechnology» - Международная научная конференция, Алматы, Казахстан, 15-16 февраля 2024 г., Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации: Республика Казахстан и международные тенденции». Нур-Султан, Казахстан, 2-4 июня 2020 г.

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ: 9 в журналах из Перечня КОКСНВО МНВО РК для опубликования основных результатов диссертации на соискание степени PhD и 2 статьи в журналах дальнего зарубежья с не нулевым импакт-фактором, входящих в базу международных информационных ресурсов Web of Science и Scopus, 5 работ в материалах Международных научных конференций.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 124 наименований, содержит 101 страницы основного компьютерного текста, включая 49 рисунок, 89 формулы и 8 таблиц.