

На правах рукописи

Прима Артем



**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ДЛЯ
ИМИТАЦИОННОГО РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

ТОМСК – 2022

Работа выполнена в Отделении материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Пушкарев Александр Иванович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук Озур Григорий Евгеньевич Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск
	доктор технических наук, профессор Соковнин Сергей Юрьевич Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится 14 апреля 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.19 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова 7, 8 корпус ТПУ, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.19 к. т. н.



Ивашутенко А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие атомной промышленности, активное освоение космоса и изучение термоядерного синтеза требуют разработки конструкционных материалов (прежде всего металлов и сплавов) с высокой радиационной стойкостью. При работе ядерного реактора образуется поток нейтронов, который создает радиационные дефекты в конструкционных элементах реактора и снижает их механическую стойкость. При разработке новых материалов с высокой радиационной стойкостью необходим большой объем экспериментальных исследований. Облучение образцов в ядерном реакторе требует много времени для набора необходимого флюенса нейтронов и послереакторной выдержки материалов для спада радиационной активности. Одним из важнейших изменений свойств металлов, вызванных нейтронным облучением, является распухание (swelling). Распухание, деформация и разрушение корпуса тепловыделяющих элементов в ядерном реакторе является одним из основных факторов, ограничивающих степень выгорания ядерного топлива. При облучении нейтронами в ядерном реакторе требуется около года, чтобы достичь режима заметного распухания.

Процесс наработки радиационных дефектов протекает значительно быстрее при облучении заряженными частицами и поэтому в последние годы активно разрабатываются методы имитационного радиационного облучения конструкционных материалов с помощью электронных или ионных пучков, генерируемых при ускоряющем напряжении 1-5 МВ. Однако имитационное облучение пучками заряженных частиц существенно отличается от нейтронного облучения в ядерном реакторе. При облучении железной мишени нейтронами с энергией 1-5 МэВ около 80% первично выбитых атомов (ПВА) имеют энергию 30-60 кэВ. Образование радиационных дефектов в металлах ионами происходит при малоугловом рассеянии и более 90% ПВА имеют энергию менее 1 кэВ при энергии ионов 1-5 МэВ. Различие в спектре ПВА приводит к различию в микроструктуре радиационных дефектов в облучаемом образце.

Отличие процессов, протекающих при имитационном и реакторном облучениях, не позволяет делать точные прогнозы радиационной стойкости конструкционных материалов. Поэтому разработка имитационных методов исследования радиационной стойкости материалов, более полно соответствующих прямому облучению в ядерном реакторе, является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка стенда для исследования радиационной стойкости конструкционных материалов (металлов и сплавов), сочетающего формирование радиационных дефектов импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, генерируемых при ускоряющем напряжении 200-300 кВ и измерение их основных параметров непосредственно после радиационного облучения.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

1. Генерация импульсного пучка атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, генерируемых при ускоряющем напряжении 200-300 кВ, с параметрами, необходимыми для имитационного радиационного облучения конструкционных материалов. Энергетический спектр первично выбитых атомов в образце должен быть близок к спектру ПВА при облучении образца нейтронами, которые формируются в реакции деления ^{235}U в ядерном реакторе.

2. Измерение концентрации, пороговой энергии миграции и динамики аннигиляции радиационных дефектов, формируемых в металлах и сплавах при облучении импульсным пучком атомов.

3. Моделирование процесса формирования радиационных дефектов в металлах и сплавах при облучении быстрыми атомами, генерируемыми при ускоряющем напряжении 200-300 кВ, с помощью компьютерных программ SRIM (аппроксимация бинарными столкновениями) и LAMMPS (метод молекулярной динамики).

Научная новизна работы заключается в том, что:

Разработан новый метод генерации импульсного ионного пучка вакуумным диодом с пассивным анодом при ускоряющем напряжении 200-300 кВ и сдвоенной разнополярной форме импульса. Состав ионного пучка зависит от сорта газа в диодной камере, кратность ионизации - от режима работы ионного диода. Разработана феноменологическая модель процесса генерации пучка, включающая анализ различных физических и плазмохимических процессов в диоде.

Впервые показано, что использование металлической сетки в области дрейфа ионов обеспечивает их эффективную перезарядку и дополнительную фокусировку. Установлено, что использование металлической сетки в области дрейфа ионов, генерируемых при ускоряющем напряжении 200-300 кВ, увеличивает долю энергии атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, в полной энергии пучка с 15-30% до 90%.

Впервые показано, что при генерации радиационных дефектов атомами, полученными при перезарядке ускоренных ионов с энергией 200-600 кэВ, в металлических образцах формируются ПВА, энергетический спектр которых близок к спектру ПВА при облучении образца нейтронами, которые формируются в реакции деления ^{235}U в ядерном реакторе.

Разработана оригинальная калориметрическая диагностика радиационных дефектов, которая позволяет измерить концентрацию, пороговую энергию миграции и динамику их аннигиляции в реальном масштабе времени с высоким временным разрешением (0.01-0.1 с) непосредственно после формирования радиационных дефектов.

Обнаружен новый эффект перегрева металлической мишени при облучении импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, который обусловлен вкладом радиационных дефектов. Показано, что эффект перегрева мишени расширяет диапазон измерения плотности энергии пучка с помощью тепловизионной диагностики с 3 Дж/см² до 15 Дж/см².

Практическая значимость работы

Основным результатом диссертационной работы является новый метод исследования радиационной стойкости конструкционных материалов, включающий имитационное облучение импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, генерируемых при ускоряющем напряжении 200-300 кВ, и измерение концентрации, пороговой энергии миграции и динамики аннигиляции радиационных дефектов; стенд для реализации этой диагностики, предоставление научно-исследовательским организациям нового эффективного метода и средства разработки технологий мирового уровня в области исследования устойчивости конструкционных материалов к интенсивному радиационному облучению.

Практическая значимость работы заключается также в том, что ее результаты использованы при разработке технологического генератора импульсного пучка атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, с большим ресурсом работы, и высокой стабильностью полной энергии и плотности энергии пучка в серии импульсов. Генерация импульсного ионного пучка осуществляется вакуумным диодом с пассивным анодом при ускоряющем напряжении 200-300 кВ и сдвоенной разнополярной форме импульса.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Для обеспечения достоверности и обоснованности результатов по измерению параметров пучков заряженных частиц с высокой плотностью энергии применялись современные методики и оборудование.

Результаты и выводы по итогам проведенных исследований были получены на основе комплексных исследований, включающих:

- вольтамперные характеристики диода,
- плотность ионного тока,
- состав и энергетический спектр мощного ионного пучка (МИП¹),
- тепловизионную диагностику полной энергии МИП,
- распределения плотности энергии МИП по сечению.

Результаты работы подтверждаются литературными данными по механизмам генерации ионных пучков, перезарядки ионов и формировании

¹ В дальнейшем термином МИП будем обозначать комбинированный пучок, содержащий ионы и атомы, полученные при перезарядке ускоренных ионов.

радиационных дефектов. Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о механизмах генерации ионных пучков, перезарядки ионов, формирования радиационных дефектов.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является итогом комплексных исследований процессов генерации пучков атомов, полученных путем перезарядки ускоренных ионов и их применения в радиационном материаловедении, проводимых в Отделении материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Томского политехнического университета. При непосредственном участии автора были выполнены эксперименты и получены данные, которые позволили выявить основные закономерности генерации пучков атомов в диодах разных конструкций. Автор участвовал при постановке и проведении экспериментов, обработке полученных данных, а также в подготовке к публикации статей.

Автором самостоятельно разработана методика измерения параметров пучков атомов с помощью тепловизора. Данная диагностика впервые использовалась в лаборатории Даляньского технологического университета (Китай) и позволила исследовать многие процессы в диодах, а также оптимизировать режим работы ускорителя для более стабильной генерации импульсного пучка атомов. Была модернизирована времяпролетная диагностика, позволяющая с высокой точностью определять состав и энергетический спектр ионного пучка.

Автором самостоятельно сформулированы защищаемые научные положения, сделаны выводы. Обсуждение задач исследования, проведение экспериментов и анализ результатов проводилось совместно с научным руководителем и соавторами.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Вакуумный диод с пассивным анодом из нержавеющей стали при работе в двухимпульсном режиме (первый импульс отрицательной полярности амплитудой 150-250 кВ и длительностью 400-500 нс; второй импульс положительной полярности амплитудой 250-300 кВ и длительностью 100-120 нс), при магнитной самоизоляции электронов и формировании анодной плазмы при взрывной эмиссии электронов обеспечивает генерацию ионов N^+ или N^{2+} , N^{3+} , C^+ , C^{2+} с содержанием примесных ионов не более 15%.

2. Использование металлической сетки в области транспортировки ионов обеспечивает их эффективную перезарядку и дополнительную фокусировку. Количество энергии, переносимой атомами, увеличивается с 15-30% до 90% от полной энергии комбинированного пучка (ионы+атомы). Атомы формируются при зарядовом обмене между ионами и десорбированными молекулами в газовой оболочке, прилегающей к сетке.

3. Измерение радиационных дефектов, основанное на анализе охлаждения мишени после облучения импульсным пучком ионов или атомов, позволяет отдельно определить концентрацию быстрых и медленных радиационных дефектов в диапазоне более 10^{19} см⁻³, а также пороговую энергию их аннигиляции с погрешностью не больше 0.05 эВ.

Апробация. Результаты, полученные при выполнении работы, были представлены на следующих конференциях:

6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018). Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» Томск: 2018. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» 23 – 26 апреля 2019 г. II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии». Алматы: РГП ИЯФ, 2019. 24th International Conference on Ion-Surface Interactions. Moscow, Russia, 2019. 21st International conference on surface modification of materials by ion beams. Tomsk, Russia, 2019. 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP-2019: Tomsk: 2019. II Международный молодежный конгресс «Современные материалы и технологии новых поколений». Томск, 2019. XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа. Москва, 2019. 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, 2020. 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" Ekaterinburg, Russia, 2021.

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликована 1 монография, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК и 8 в сборниках материалов конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 148 стр., содержит 96 рисунков, 20 таблиц, 164 источника. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана краткая характеристика исследуемых проблем, сформулирована цель работы. Кратко изложено содержание, структура диссертации и перечислены основные результаты. Во введении также сформулированы выносимые на защиту научные положения.

В первой главе приведен литературный обзор методов исследования радиационных дефектов, методов генерации пучков атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, методов диагностики параметров этих пучков. Анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Широко используемое в настоящее время имитационное облучение пучками заряженных частиц, генерируемых при ускоряющем напряжении 1-10 МВ имеет существенные отличия от нейтронного облучения в ядерном

реакторе по энергетическому спектру первично выбитых атомов в мишени, эффективности формирования радиационных дефектов и их пространственному распределению в мишени. Отличие процессов, протекающих при имитационном и реакторном облучениях, не позволяет делать точные прогнозы радиационной стойкости конструкционных материалов в реакторе.

2. К моменту начала работ по диссертации в литературе отсутствуют данные по импульсным пучкам атомов, генерируемых при ускоряющем напряжении более 50 кВ. Для формирования спектра первично выбитых атомов в образце, близкого к спектру ПВА при облучении образца нейтронами, которые формируются в реакции деления ^{235}U в ядерном реакторе, нужны атомы с энергией 300-600 кэВ.

3. В настоящее время отсутствует оперативный метод исследования радиационных дефектов, обеспечивающий возможность исследовать миграцию и аннигиляцию радиационных дефектов в реальном масштабе времени. Миграция радиационных дефектов в металлах имеет малую энергию активации, что обеспечивает их высокую подвижность и аннигиляцию при комнатной температуре. Формирование стабильных радиационных дефектов и кластеров связано с миграцией медленных радиационных дефектов от области формирования и снижением вероятности их аннигиляции.

Во второй главе представлена экспериментальная установка и диагностическое оборудование для измерения параметров МИП. Фотография установки и характерные осциллограммы приведены на рис. 1.

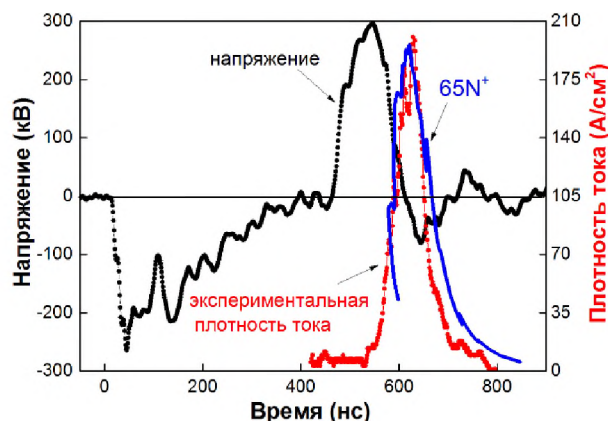


Рисунок 1. Фотография ускорителя ТЕМП-6 и осциллограммы ускоряющего напряжения и плотности ионного тока (точки), расчетная плотность ионов (линия)

Исследования выполнены в режиме формирования двух импульсов: первый (плазмообразующий) отрицательный (450-500 нс, 150–200 кВ) и второй (генерирующий) положительный (150 нс, 250–300 кВ).

Обнаружен новый эффект перегрева металлической мишени при облучении импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, который обусловлен вкладом радиационных дефектов.

Показано, что эффект перегрева мишени расширяет диапазон измерения плотности энергии пучка с помощью тепловизионной диагностики с 3 Дж/см² до 15 Дж/см².

В третьей главе представлены результаты исследования генерации МИП вакуумным диодом с металлическим пассивным анодом при работе в двухимпульсном режиме (первый 450-500 нс, 150–200 кВ и второй 150 нс, 250–300 кВ) и формировании анодной плазмы при взрывной эмиссии электронов. Представлены результаты исследования перезарядки и фокусировки ионного пучка. Разработана феноменологическая модель процесса генерации пучка атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, включающая анализ различных физических и плазмохимических процессов в диоде.

В первой части третьей главы представлены результаты исследования генерации ионного пучка при ускоряющем напряжении 250-300 кВ. На рисунке 2 показаны фотография диода и результаты тепловизионной диагностики МИП для режима работы диода см. рисунок 1.

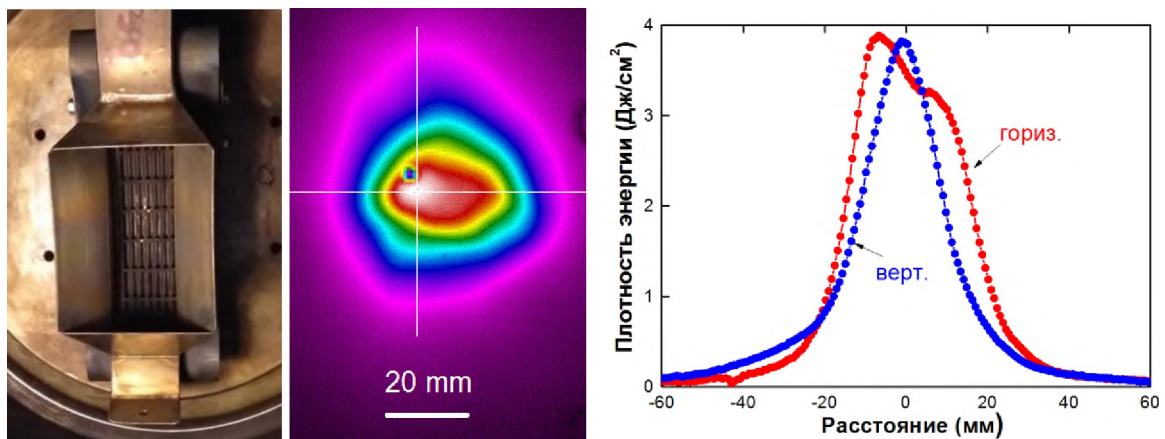


Рисунок 2. Фотография ионного диода фокусирующей геометрии, термограмма МИП и распределение плотности энергии в фокусе

Плотность энергии МИП равна интегралу произведения ускоряющего напряжения и расчетной плотности ионного тока:

$$q_{calc}(t) = \int_{t_0}^{\infty} U(t) \cdot j(t) dt = \frac{4K \varepsilon_0 \sqrt{2z}}{9\sqrt{m_i}} \int_{t_0}^{\infty} \frac{U^{5/2}(t) dt}{[d_0 - v(t-t_0)]^2}, \quad \text{Джс / см}^2 \quad (1)$$

где z – заряд иона, m_i – масса иона, d_0 – начальный зазор анод–катод, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, U – ускоряющее напряжение, v – скорость расширения плазмы, K – коэффициент усиления плотности ионного тока, t_0 – момент времени изменения полярности на аноде ($t_0 = 450$ нс на рисунке 1).

Для экспериментальных данных (см. рисунок 1) плотность энергии МИП, рассчитанная по соотношению (1) для ионов N⁺, составляет 3,3 Дж/см², что на 15-20% меньше результатов тепловизионной диагностики (см. рисунок 2). Это несоответствие вызвано вкладом атомов, полученных при

перезарядке ускоренных ионов, в тепловизионную диагностику пучка. Результаты исследования генерации МИП диодом с металлическим пассивным анодом при работе в двухимпульсном режиме (первый 450-500 нс, 150–200 кВ и второй 150 нс, 250–300 кВ) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия генерации МИП и его состав

№	Материал анода	Рабочий газ	Парциальное давление, мПа	Состав МИП
1	Графит	N ₂	от 3 до 80	0,9C ⁺ + 0,1H ⁺
2	Полиэтиленовое покрытие на аноде (C _n H _{2n+1})	N ₂	от 2 до 3	0,5C ⁺ + 0,5H ⁺
3	Графит	H ₂	от 5 до 18	C ⁺
		N ₂	от 2 до 3	
4	Нержавеющая сталь	N ₂	от 2 до 3	N ⁺ или N ²⁺
5	Нержавеющая сталь после азотирования	N ₂	от 5 до 7	N ²⁺ + N ³⁺
6	Нержавеющая сталь	Ar	от 40 до 100	N ⁺
		N ₂	от 2 до 3	
7	Нержавеющая сталь	H ₂	от 56 до 100	0,1H ⁺ + 0,9N ⁺
		N ₂	от 2 до 3	
8	Нержавеющая сталь	CH ₄	22	0,75C ⁺ + 0,25H ⁺
		N ₂	от 2 до 3	
9	Нержавеющая сталь	CO ₂	10	C ⁺ или C ²⁺
		N ₂	от 2 до 3	

Полученные данные при работе с графитовым анодом и анодом с полиэтиленовым покрытием соответствуют современным представлениям о генерации ионов в диоде с пассивным анодом - состав МИП соответствует материалу анода. Однако ионный диод с анодом из нержавеющей стали генерирует в основном ионы азота, содержание ионов материала анода (Fe⁺) незначительно. Выполненные исследования показали, что при работе ионного диода в двухимпульсном режиме и формировании анодной плазмы за счет взрывной эмиссии электронов во время первого импульса материал анода и состав остаточных газов в диодной камере оказывают большое влияние на состав ионного пучка.

Экспериментальные исследования и моделирование генерации МИП в диоде с пассивным анодом показали, что генерация пучка ионов в диоде с металлическим анодом, работающем в двухимпульсном режиме, происходит в следующей последовательности:

- адсорбция молекул остаточного газа на поверхности электродов диода (до первого импульса);
- десорбция и диссоциация молекул (первый импульс амплитудой 150-200 кВ);
- ионизация атомов в А-К зазоре (первый импульс);

- ускорение ионов по направлению к аноду и образование нитридов (или карбидов, гидридов и др.) на поверхности анода (первый импульс);
- формирование взрывоэмиссионной плазмы (первый импульс);
- эрозия плазмы в А-К зазоре (в начале второго импульса);
- генерация МИП (второй импульс амплитудой 250-300 кВ);
- подавление генерации тяжелых ионов (второй импульс).

Во второй части третьей главы представлены результаты исследования перезарядки и фокусировки ионного пучка металлической сеткой (ячейка $0,2 \times 0,125$ мм², прозрачность 50%), расположенной в области транспортировки ионов. Результаты измерения плотности энергии МИП (диод с сеткой с отверстием $\varnothing 22$ мм при работе в двухимпульсном режиме (первый 450 нс, 150–200 кВ и второй 150 нс, 250–300 кВ) представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

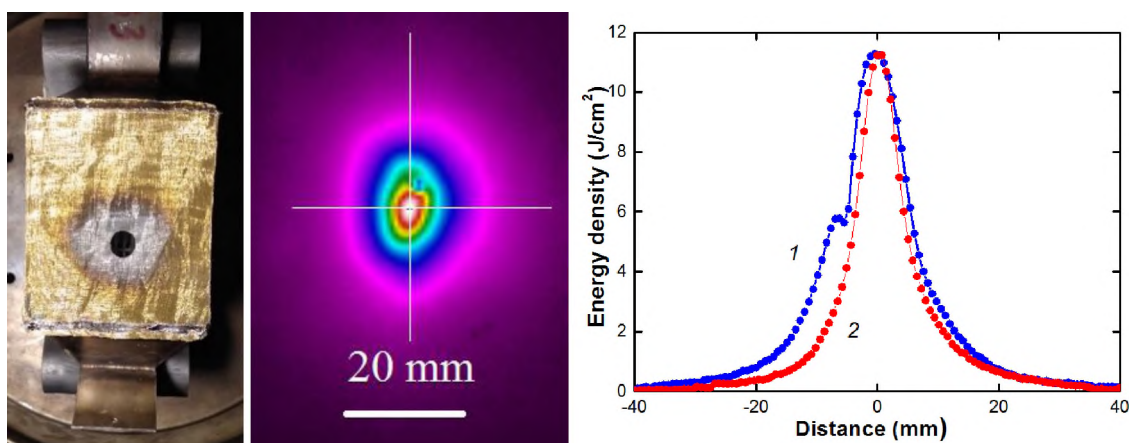


Рисунок 3. Фотография фокусирующего диода с отверстием в сетке, тепловой отпечаток МИП на мишени и распределение плотности энергии в фокусе в вертикальном (1) и горизонтальном (2) направлениях

Таблица 2. Параметры МИП, генерируемого разными диодами

Условия транспортировки МИП	Плотность энергии, Дж/см ²		Доля атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, %
	Тепловизионная диагностика	Расчет по плотности ионного тока	
Без сетки, серия 1	3,3±7%	2,8±15%	15
Без сетки, серия 2	2,9±12%	2,2±16%	24
С сеткой	7,7±10%	0,30±15%	90
Сетка с отверстием 10×20 мм	10,9±7%	0,58±13%	85
Сетка с отверстием $\varnothing 22$ мм	7,7±8%	0,36±14%	90

Использование металлической сетки в области транспортировки МИП повышает эффективность перезарядки ионов; количество энергии, переносимой атомами, полученными при перезарядке ускоренных ионов, увеличивается с 15-30% до 90%. Полная энергия комбинированного пучка (ионы+атомы) при этом не меняется (с учетом оптической прозрачности сетки).

Атомы в ионном диоде формируются при перезарядке между ионами и молекулами в газовой оболочке, прилегающей к сетке. При десорбции молекул с поверхности металлической сетки толщина оболочки, прилегающей к сетке, в 5-15 раз превышает длину перезарядки $\lambda=1/(n_0 \cdot \sigma_{1,0})$ в процессах $C^+ + N_2 \rightarrow C^0$ и $C^+ + O_2 \rightarrow C^0$. Перезарядка между ионами и молекулами остаточного газа около сетки обеспечивает генерацию атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов с энергией 250-300 кэВ, в отличие от перезарядки ионов в А-К зазоре (10-15 кэВ).

Проведенные исследования показали, что МИП имеет суммарный отрицательный заряд из-за избыточной концентрации электронов низкой энергии. Это предотвращает его рассыпание во время фокусировки и вызывает дополнительное сжатие пучка собственным пространственным зарядом. Увеличение плотности отрицательного суммарного заряда (электроны+ионы) ионного пучка с 3,6 мкКл/см² до 9 мкКл/см² уменьшает общую расходимость пучка с 11,4° до 6,7°. Это приводит к увеличению плотности энергии в фокусе с 4 Дж/см² до 7,7 Дж/см² при уменьшении полной энергии в 2 раза. Чтобы эффективно сфокусировать ионный пучок за счет собственного объемного заряда, достаточно вторичных электронов, образованных частью ионов пучка, и поэтому можно использовать металлическую сетку с отверстием в области максимальной плотности энергии. Для оптимального диаметра отверстия и оптимального положения сетки в зоне фокусировки была получена плотность энергии в фокусе 10-12 Дж/см² при уменьшении общей энергии МИП в 1,5 раза.

В третьей части третьей главы выполнено моделирование воздействия атомов, нейтронов и ионов на металлическую мишень в модели бинарных столкновений.

Энергетический спектр первично выбитых атомов в мишени является наиболее важным параметром, который определяет механизм формирования радиационных дефектов, их последующей аннигиляции и кластерообразования. Энергетический спектр ПВА определяется эффективностью передачи кинетической энергии от быстрой частицы к ПВА (произведение энергии ПВА на вероятность рассеяния). Эта зависимость будет иметь экстремум из-за уменьшения энергии ПВА и увеличения вероятности столкновения с увеличением прицельного параметра. В таблице 3 приведены расчетные соотношения, полученные при моделировании методом бинарных столкновений.

Таблица 3. Соотношения для расчета эффективности передачи энергии

Быстрая частица	Эффективность передачи кинетической энергии		
ион	$F_i = f_i E_{PKA} = \frac{K}{1 - \cos \theta}$	$K = \frac{4m_1 \cdot m_2 (4Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2)^2}{E_0 (m_1 + m_2)^2}$	(2)
нейтрон	$F_{nu} = E_0 \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos \frac{\theta}{2}$	при $p < r_1 + r_2$	(3)
	$F_{nu} = 0$	при $p > r_1 + r_2$	(4)
атом	$F_a = E_0 \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos \frac{\theta}{2}$	при $p < R_1 + R_2$	(5)
	$F_a = E_0 \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \cdot \left(\cos \frac{\theta}{2}\right)^{-12}$	при $p > R_1 + R_2$	(6)

где E_0 - начальная энергия быстрой частицы; m_1 и m_2 - масса быстрой частицы и атома мишени; p - прицельный параметр; θ - угол рассеяния быстрой частицы; Z_1, Z_2 - заряды ядра иона и ПВА, e - заряд электрона; r_1 и r_2 - радиусы нейтрона и ядра атома мишени; R_1 and R_2 - радиусы ПВА и быстрого атома.

На рисунке 4 показана эффективность передачи энергии от быстрой частицы к ПВА в железной мишени.

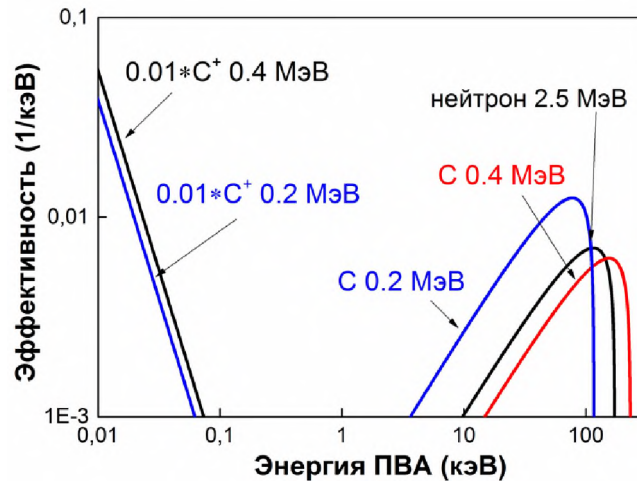


Рисунок 4. Зависимость эффективности передачи кинетической энергии быстрой частицы от энергии ПВА при проникновении в железную мишень

Энергия ПВА в железной мишени после облучения атомами углерода (энергия 0,2-0,4 МэВ) и нейтронами (1-3 МэВ) различается незначительно и превышает 10 кэВ. Энергия ПВА после облучения ионами с энергией 0,2-0,4 МэВ не превышает 0,1 кэВ.

Облучение мишени атомами более соответствует облучению нейтронами в ядерном реакторе по спектру первично выбитых атомов, эффективности и механизму формирования радиационных дефектов. При

поглощении в мишени вероятность ионизации атомов с энергией менее 0,4 МэВ незначительна.

В четвертой главе представлена калориметрическая диагностика радиационных дефектов, формируемых в металлах и сплавах при облучении импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, генерируемых при ускоряющем напряжении 250-300 кВ. Диагностика основана на анализе охлаждения мишени и сравнении экспериментальной мощности потерь энергии в мишени с расчетной мощностью теплового излучения. Диаметр пучка был больше диаметра мишени (≈ 10 мм), что обеспечивало ее более равномерное облучение. Фотография мишени и распределение температуры после облучения показаны на рисунке 5.

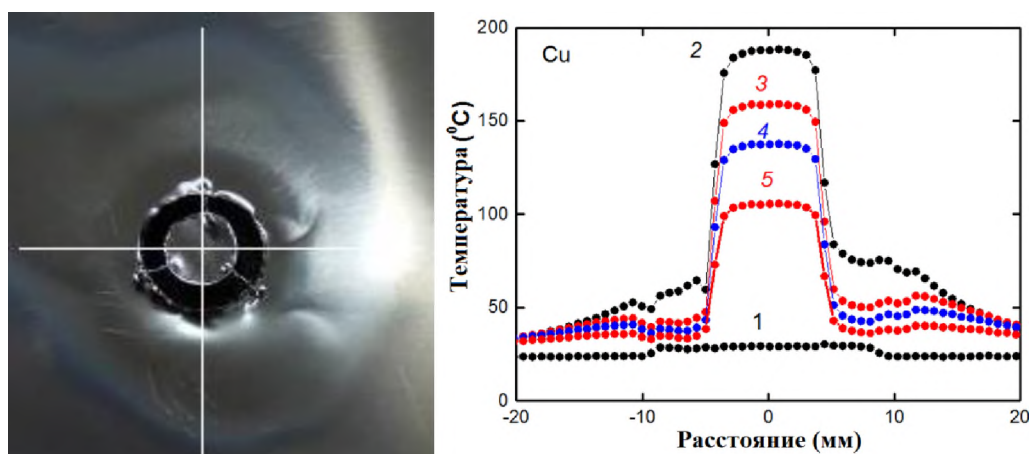


Рисунок 5. Фотография мишени с центральным диском. Распределение температуры в горизонтальном направлении перед облучением (1) и через 0, 2 (2), 5 (3), 10 (4) и 20 секунд (5) после облучения

В первой части четвертой главы представлены результаты экспериментального исследования и моделирования концентрации радиационных дефектов, формируемых в металлах и сплавах при облучении импульсным пучком атомов.

При однородной температуре по глубине мишени объемная плотность тепловой энергии в мишени равна:

$$J_{\text{exp}}(x, y, t) = K_1 K_2 K_3 \cdot c_v \cdot \rho \cdot T(x, y, t), \quad \text{Дж} / \text{см}^3 \quad (7)$$

где c_v - удельная теплоемкость материала мишени; ρ - плотность мишени; $T(x, y, t)$ - температура мишени после облучения; K_1 - коэффициент прозрачности оптического окна; K_2 - коэффициент, учитывающий вклад радиационных дефектов в погрешность тепловизионной диагностики; K_3 - коэффициент, учитывающий вклад абляции материала мишени в погрешность тепловизионной диагностики.

Экспериментальную мощность потерь энергии при охлаждении рассчитывали дифференцированием тепловой энергии в мишени:

$$W_{\text{exp}}(t) = \frac{d[S \cdot \Delta \cdot J_{\text{exp}}(t)]}{dt} = S \cdot K_1 K_2 K_3 \cdot c_v \cdot \Delta \cdot \rho \frac{dT_m(t)}{dt}, \quad \text{Вт} \quad (8)$$

где S и Δ - площадь и толщина мишени, $T_m(t)$ - ее средняя температура.

При расчете мощности теплового излучения мы учитывали тепловой поток с лицевой и тыльной (по отношению к ионному пучку) сторон мишени, а также встречный тепловой поток со стенок камеры. Расчет выполнен по соотношению Стефана-Больцмана:

$$W_{\text{ir}}(t) = -S[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot \sigma [T_m^4(t) - T_0^4]], \quad \text{Вт} \quad (9)$$

где ε_1 и ε_2 - степень черноты лицевой и тыльной сторон мишени, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴).

Результаты расчетов по соотношениям (8) и (9) показаны на рисунке 6. Начальная температура мишени 22°C, плотность энергии МИП 5 Дж/см².

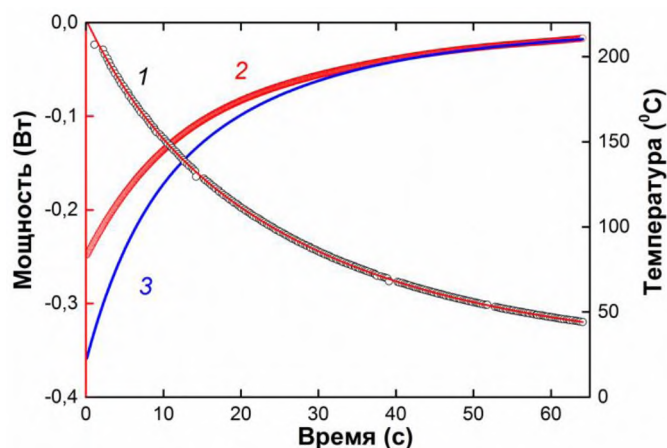


Рисунок 6. Изменение температуры мишени из нержавеющей стали (1), мощности потерь тепловой энергии в мишени (2) и мощности теплового излучения мишени (3) при охлаждении

Степень черноты лицевой стороны мишени (облучаемой пучком) при расчетах брали равной 0,7 (неполированная нержавеющая сталь), степень черноты тыльной стороны мишени брали равной 0,95, так как перед экспериментами она была покрыта тонким слоем черной матовой краски.

Выполненные исследования показали, что в течение начальных 35-40 с после облучения мощность теплового излучения мишени превышает мощность потерь тепловой энергии в ней (по модулю). Это указывает на дополнительное выделение энергии в мишени. В дальнейшем мощность потерь энергии и мощность теплового излучения совпадают с точностью 10% для всех исследованных мишеней из разных металлов, что подтверждает корректность выполненных расчетов. Мишень находится в диодной камере при давлении не более 0,1 Па, поэтому ее конвективное охлаждение незначительно. Центральный диск, охлаждение которого мы регистрируем, закреплен в большой мишени с помощью тонких проволок (см. рис. 5), их теплопроводность мала. Поэтому потери тепловой энергии за счет теплопроводности элементов крепления также незначительны.

Источником дополнительной энергии, которая выделяется в мишени при охлаждении, является термическая аннигиляция радиационных

дефектов, которые образуются в мишени при облучении пучком атомов, полученных путем перезарядки ускоренных ионов. Наши исследования показали, что радиационные дефекты можно разделить на две группы: быстрые дефекты, которые аннигилируют при облучении и в течение 0,1 с после облучения импульсным пучком (длительностью 150 нс); и медленные дефекты, которые мигрируют в мишени и аннигилируют в течение десятков секунд. Количество быстрых радиационных дефектов рассчитывали по дополнительной тепловой энергии в мишени через 0.1 с после облучения (за исключением потерь энергии на электронное торможение, составляющих $\approx 40\%$ для атомов с энергией 150-250 кэВ):

$$E_{an1} = 0.6K_1K_2 \cdot c_v \rho \cdot d \cdot S \cdot (T_1 - T_0), \quad \text{Дж} \quad (10)$$

где T_1 - средняя температура мишени через 0.1 с после облучения.

Количество медленных радиационных дефектов рассчитывали по энергии, которая выделяется при их аннигиляции:

$$E_{an2} = \int_0^{\tau} (|W_{ir}| - |W_{exp}|) dt, \quad \text{Дж} \quad (11)$$

На рисунке 7 показаны зависимости количества радиационных дефектов в мишени от поглощенной энергии пучка. Эта энергия равна сумме тепловой энергии в мишени через 0,1 с после облучения пучком (E_{an1}) и энергии аннигиляции медленных радиационных дефектов в мишени (E_{an2}).

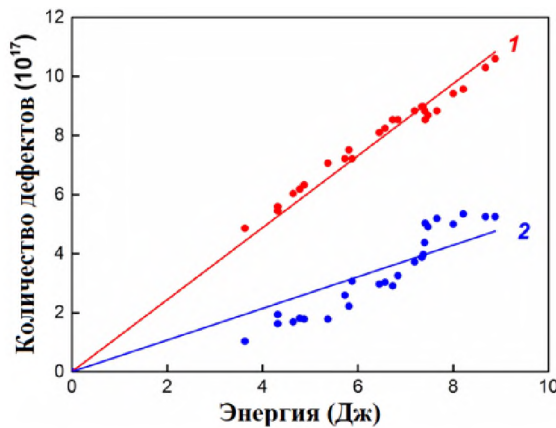


Рисунок 7. Зависимость количества быстрых (1) и медленных (2) дефектов от поглощенной энергии пучка атомов в мишени из нержавеющей стали

Количество радиационных дефектов (вакансии + межузельные атомы), образующихся в мишени, рассчитывали по соотношению:

$$N_d = \frac{2E_{an}}{E_d}, \quad (12)$$

где E_d - пороговая энергия смещения атома.

Одним из основных параметров, который рассчитывают при моделировании формирования радиационных дефектов в мишени, является количество дефектов в каскаде, образованном одной ускоренной частицей. Наши исследования показали, что зависимость числа радиационных

дефектов в мишени от поглощенной энергии пучка описывается линейной функцией (см. рис. 7) $N_d = K_d \cdot E_{sum}$, где K_d - коэффициент, равный числу радиационных дефектов, образованных в мишени ионным пучком с энергией 1 Дж. Поэтому среднее число радиационных дефектов в каскаде смещений, образованном одним атомом, можно рассчитать по соотношению:

$$n_d = K_d \cdot E_{atom} \quad (13)$$

где E_{atom} - средняя энергия атома в пучке.

Среднюю энергию атомов в пучке, генерируемым ускорителем ТЕМП-6, рассчитывали по плотности энергии и плотности ионного тока в фокусе для режима без металлической сетки. Число атомов в этом режиме составляет $\approx 20\%$, см. таблицу 2. В таблице 4 приведены результаты расчетов по соотношению (13).

Таблица 4. Количество дефектов в каскаде атома углерода

Материал мишени	Быстрые дефекты	Медленные дефекты	N_{sum}	N_{SRIM}
Нерж. сталь	4500	2025	6525	1250
Титан	1636	2068	3704	657
Латунь	2290	1070	3360	1167
Медь	2290	1090	3380	1198

Кроме экспериментальных исследований формирования радиационных дефектов при облучении металлической мишени, мы выполнили моделирование с помощью SRIM. В SRIM мы рассчитали суммарное количество вакансий и межузельных атомов в каскаде иона. Результаты моделирования для энергии ионов 200 кэВ приведены в таблице 4. Моделирование показало, что количество радиационных дефектов в каскаде ионов C^+ (N_{SRIM}) в 3-5 раз меньше экспериментальных значений (N_{sum}). Полученные результаты подтверждают большую эффективность формирования радиационных дефектов атомами по сравнению с ионами.

Во второй части четвертой главы представлены результаты измерения пороговой энергии миграции и динамики аннигиляции радиационных дефектов, формируемых в металлах и сплавах при облучении импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов. Энергию активации миграции дефектов определяли сравнением расчетных и экспериментальных значений мощности аннигиляции радиационных дефектов при охлаждении мишени после облучения пучком атомов, полученных путем перезарядки ионов.

Расчетная мощность аннигиляции радиационных дефектов равна:

$$W_{an}(t) = -\frac{N_0 \cdot A \cdot dpa \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_{an} \cdot V_T}{k_B T^2} [\exp(-\varepsilon_{an} / k_B T)] \cdot [\exp(-k_{an} \cdot t)] \quad (14)$$

где N_0 - число атомов в мишени; $dpa = N_{d0} / N_0$; N_{d0} - начальное количество дефектов в мишени после облучения; ε_d - пороговая энергия образования

пары радиационных дефектов (вакансия+межузельный атом); ε_{an} - энергия активации аннигиляции дефектов; $V_T(t)$ – скорость изменения температуры при охлаждении мишени; k_B - постоянная Больцмана, k_{an} - константа скорости аннигиляции радиационных дефектов.

$$k_{an}(T) = A \exp(-\varepsilon_{an} / k_B T) \quad (15)$$

Здесь предэкспоненциальный множитель A равен числу перемещений радиационного дефекта до аннигиляции. При низкой концентрации радиационных дефектов число перемещений может быть значительно больше единицы.

На рисунке 8 показаны результаты моделирования аннигиляции радиационных дефектов в мишени из нержавеющей стали, расчет выполнен для экспериментальных данных (см. рис. 6) для $A \cdot d_{ра} = 0,5$ и $\varepsilon_{an} = 0,3$ эВ. Для более точного определения энергии активации аннигиляции радиационных дефектов, рассчитанные (по соотн. 14) и экспериментальные значения мощности аннигиляции радиационных дефектов на рисунке 8б показаны дополнительно в координатах Аррениуса $\log(W) = f(1000/T)$.

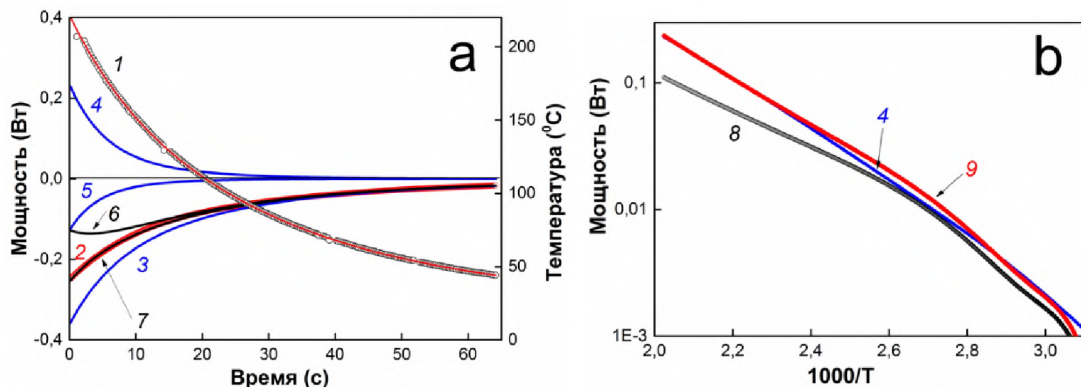


Рисунок 8. Температура мишени (1) и экспериментальная мощность потерь тепловой энергии в мишени (2, точки). Расчетные значения мощности теплового излучения мишени (3), мощности аннигиляции радиационных дефектов (4), мощности потерь энергии на миграцию дефектов (5), мощности потерь энергии в мишени с учетом теплового излучения и аннигиляции дефектов (6); мощности потерь энергии в мишени с учетом теплового излучения, аннигиляция и миграции дефектов (7, линия). Экспериментальная мощность аннигиляции радиационных дефектов без (8) и с учетом (9) миграции дефектов в мишени. Изменение при охлаждении мишени (а) и в координатах Аррениуса (б)

Экспериментальную мощность аннигиляции радиационных дефектов с учетом теплового излучения и аннигиляции дефектов рассчитывали по соотношению:

$$W_{an}^{exp} = W_{exp} - W_{ir} \quad (16)$$

Проведенные исследования показали, что в течение первых 15-20 с после облучения пучком атомов, полученных путем перезарядки ускоренных ионов ($T > 100^\circ\text{C}$, см. рис. 8) экспериментальная мощность потерь энергии в мишени превышает (по модулю) расчетные значения, полученные с учетом теплового излучения от мишени и аннигиляции радиационных дефектов. Это

можно объяснить дополнительным потреблением энергии в мишени. Эта энергия не превышает 15% энергии теплового излучения мишени при ее охлаждении. В дальнейшем охлаждение мишени удовлетворительно описывается двумя процессами - потерей энергии в мишени за счет теплового излучения и выделением энергии при термической аннигиляции дефектов (см. рис. 8), экспериментальные и расчетные мощности совпадают в пределах 10%.

При уменьшении плотности энергии МИП охлаждение мишени удовлетворительно описывается двумя процессами - потерей энергии в мишени за счет теплового излучения и выделением энергии при аннигиляции дефектов (см. рис. 9), экспериментальные и расчетные мощности совпадают в пределах 10%.

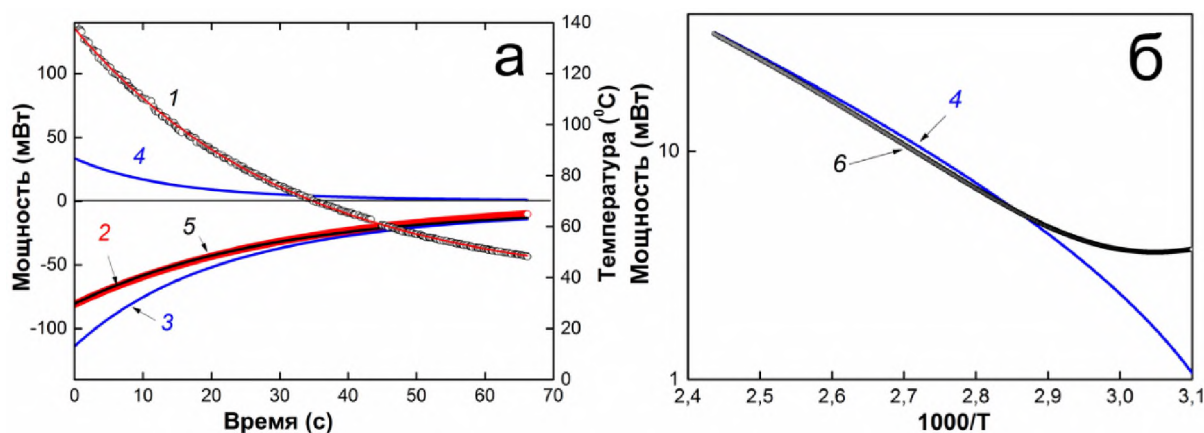


Рисунок 9. Температура мишени (1) и экспериментальная мощность потерь тепловой энергии в мишени (2, точки). Расчетные значения мощности теплового излучения мишени (3), мощности аннигиляции радиационных дефектов (4), мощности потерь энергии в мишени с учетом теплового излучения и аннигиляции дефектов (5, линия). Экспериментальная мощность аннигиляции радиационных дефектов (6). Изменение при охлаждении мишени (а) и в координатах Аррениуса (б)

Параметры радиационных дефектов, полученные с помощью калориметрической диагностики радиационных процессов в мишени из разных металлов, представлены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры радиационных дефектов

Материал мишени	ϵ_{an} , эВ	$A \cdot dpa$
Нерж. сталь	$0,3 \pm 0,05$	0,5-0,9
Медь	$0,3 \pm 0,05$	0,8-1,3
Латунь	$0,3 \pm 0,05$	1,0-1,7
Титан	$0,1 \pm 0,02$	0,009-0,03

Полученные экспериментальные данные не противоречат результатам, полученным другими методами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В соответствии с поставленной целью разработаны научно-технические основы нового метода исследования радиационной стойкости конструкционных материалов (металлов и сплавов), который включает имитационное облучение импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, генерируемых диодом с пассивным анодом при работе в двухимпульсном режиме (150-200 кВ первый импульс и 250-300 кВ второй импульс) и измерение концентрации, пороговой энергии миграции и динамики аннигиляции радиационных дефектов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан стенд, который обеспечивает генерацию импульсного пучка атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов (генерируемых при ускоряющем напряжении 200-300 кВ) с параметрами, необходимыми для имитационного радиационного облучения конструкционных материалов. Энергетический спектр ПВА в образце близок к спектру ПВА при облучении образца нейтронами, которые формируются в реакции деления ^{235}U в ядерном реакторе. Этот стенд имеет большой ресурс работы (более 10^6 импульсов), высокую стабильность ускоряющего напряжения (стандартная девиация 2-3% в серии 50-100 импульсов).

2. Установлено, что при работе ионного диода в двухимпульсном режиме (первый импульс 450 нс, 150–200 кВ и второй импульс 150 нс, 250–300 кВ) и формировании анодной плазмы за счет взрывной эмиссии электронов во время первого импульса материал анода и состав остаточных газов в диодной камере оказывают большое влияние на состав ионного пучка. Разработана феноменологическая модель процесса генерации пучка, включающая анализ различных физических и плазмохимических процессов в диоде. Новый метод генерации МИП обеспечивает возможность оперативно менять состав и степень ионизации ионов.

3. Установлено, что использование металлической сетки в области транспортировки МИП повышает эффективность перезарядки ионов. Количество энергии, переносимой атомами, увеличивается с 15-30% до 90%. Полная энергия комбинированного пучка (ионы+атомы) при этом не меняется (с учетом оптической прозрачности сетки). Атомы в ионном диоде формируются при перезарядке между ионами и молекулами в газовой оболочке, прилегающей к сетке.

4. Показано, что радиационные дефекты, образующиеся в мишени при облучении пучком атомов, оказывают значительное влияние на охлаждение мишени. Три процесса удовлетворительно описывают динамику охлаждения мишени – отвод тепловой энергии в мишени за счет теплового излучения (0,1÷70 с), высвобождение энергии при термической аннигиляции дефектов (0,1÷40 с) и потребление энергии в мишени на миграцию вакансий при высокой температуре (0,1÷15 с).

5. Разработана калориметрическая диагностика радиационных дефектов, которая обеспечивает измерение концентрации, пороговой энергии миграции и динамики аннигиляции радиационных дефектов, формируемых в металлах и сплавах при облучении импульсным пучком ионов и атомов. Диагностика основана на анализе охлаждения мишени и сравнении экспериментальной мощности потерь энергии в мишени с расчетной мощностью теплового излучения. Калориметрическая диагностика позволяет исследовать процессы миграции и аннигиляции радиационных дефектов в металлах с временным разрешением ≈ 1 мс, которое определяется используемым тепловизором.

6. Установлено, что радиационные дефекты, образованные пучком атомов в металлической мишени, можно разделить на две группы: быстрые дефекты, которые аннигилируют до начала измерения охлаждения мишени (в течение облучения и 0.1 с после облучения), и медленные дефекты, которые мигрируют к мишени из области их образования и затем аннигилируют в течение десятков секунд. Медленные радиационные дефекты составляют 24-32% от общего числа дефектов. Эта величина близка к эффективности каскада, т. е. числу пар Френкеля в конце формирования каскада столкновений, деленному на количество пар Френкеля в каскаде.

7. Моделирование SRIM показало, что основная доля кинетической энергии иона при торможении в металлической мишени расходуется на возбуждение электронной подсистемы (electronics stopping). Количество радиационных дефектов в каскаде смещений иона C^+ с энергией 250 кэВ в 4-5 раз меньше экспериментальных значений. Это подтверждает высокую концентрацию атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов в пучке, который формируется фокусирующим диодом с металлической сеткой на катоде.

8. Показано, что при облучении металлической мишени пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, в ней формируется значительное количество радиационных дефектов. Потери энергии пучка на их формирование (равные энергии аннигиляции радиационных дефектов при охлаждении мишени) пропорциональны начальной тепловой энергии в мишени после облучения и составляют 22% в мишени из нержавеющей стали, 30% в медной мишени и 70% в титановой мишени. Учет потерь энергии МИП на формирование радиационных дефектов позволяет устранить большой разброс показаний тепловизионной диагностики плотности энергии (на 40-60%) при использовании мишеней из разных металлов.

9. Обнаружен эффект перегрева металлической мишени при облучении импульсным пучком атомов, полученных при перезарядке ускоренных ионов, который обусловлен вкладом радиационных дефектов. Показано, что эффект перегрева мишени расширяет диапазон измерения плотности энергии пучка с помощью тепловизионной диагностики с 3 Дж/см² до 15 Дж/см².

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ

Монография

1. Пушкарев А.И., Егорова Ю.И., Прима А.И., Корусенко П.М., Несов С.Н. Генерация, диагностика и применение мощных ионных пучков с высокой плотностью энергии – Монография. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. – 106 с.

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus

2. A.I. Pushkarev, Y.I. Isakova, A.I. Prima. High-intensity pulsed ion beam composition and the energy spectrum measurements using the time-of-flight method // Laser and Particle beams (2018), Volume 36, Issue 2, pp. 210-218.

3. X.P. Zhu, L. Ding, Q. Zhang, Yu. Isakova, A. Prima, A. Pushkarev, M.K. Lei. High-intensity pulsed ion beam focusing by its own charge // Laser and Particle beams. 2018, vol. 36, issue 4, pp. 470-476.

4. A. Pushkarev, X.P. Zhu, A. Prima, Yu. Egorova, M.K. Lei. Extending the measurement range of thermal imaging diagnostics of high-intensity pulsed ion beam // Laser and particle beams, 2019, vol. 37, issue 3, pp. 260-267.

5. A. Pushkarev, X.P. Zhu, C.C. Zhang, A. Prima, Y. Li, Yu. Egorova, M.K. Lei. Influence of the space charge of an ion beam on the time-of-flight diagnostics of its composition // Review of Scientific Instruments, 2019, v. 90, iss. 10, 103303.

6. A. Pushkarev, A. Prima, V. Ezhov, I. Miloichikova, E. Petrenko Determination of the Pulsed Electron Beam Spectrum by Current and Voltage Oscillograms //Laser and Particle Beams. – 2021. – Т. 2021.

7. A. Pushkarev, A. Prima, V. Myshkin, N.Chistyakova, V. Ezhov Comparison of Influence of the Fast Atom Beam and Ion Beam on the Metal Target //Laser and Particle Beams. – 2021. – Т. 2021.

Статьи в журналах, рекомендованные ВАК

8. Ю.И. Исакова, А.И. Прима, Сао-Пэн Чжу, Лянь Динь, А.И. Пушкарев, Мин-Кай Лэй. Влияние радиационных дефектов в металлической мишени на погрешность тепловизионной диагностики мощных ионных пучков // Приборы и техника эксперимента, 2019, №. 2, с. 67-74.

9. Ю. Исакова, А. Прима, А. Пушкарев. Конусный ионный диод с магнитной самоизоляцией электронов // Приборы и техника эксперимента. - 2019 - №. 4. - С. 55-66.

10. А.И. Пушкарев, А.И. Прима, Ю.И. Егорова, В.В. Ежов. Диагностика импульсных пучков электронов, ионов и атомов (Обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2020, №3, с. 5-24.

Материалы конференций

11. A. Pushkarev, A. Prima, X.P. Zhu, L. Ding, Q. Zhang, Yu. Isakova, M.K. Lei. Thermal imaging diagnostics of fast radiation processes // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. — p. 516.

12. A. Prima, R. Zyryanova, L. Ding, Q. Zhang, Q.L. Han, C.C. Zhang. Influence of radiation defects on the error of thermal imaging diagnostics of high-power ion beams // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. — 547 p.

13. A. Prima, L. Ding, Q. Zhang, Z.C. Zhang. Research of mechanisms of target overheating at intense pulsed ion beam irradiation // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – с. 26-27.

14. А.И. Прима, L. Ding, Q. Zhang, Z.C. Zhang. Влияние быстрых радиационных процессов на охлаждение металлической мишени после облучения мощным ионным пучком // V Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-15) 15-19 октября 2018 г., с. 51.

15. Прима А.И., Зырянова Р.В., Бакиев Ф.Т. Моделирование формирования радиационных дефектов в металлах при облучении ионами углерода // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» 23 – 26 апреля 2019 г., с. 271-273.

16. А.И. Прима, А.И. Пушкарёв, С. Zhang, Y. Li, X.P. Zhu, M.K. Lei. Лабораторный стенд для имитационного радиационного облучения ускоренными атомами // XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа. Москва, 2019, с. 132.

17. A. Pushkarev, X.P. Zhu, A. Prima, C.C. Zhang, M.K. Lei. Investigation of thermal annealing of radiation defects formed by high-intensity pulsed ion beam // Proceedings of the 24th International Conference on Ion-Surface Interactions, part 2. Moscow, Russia, 2019. p. 133-136.

18. A. Pushkarev, A. Prima, X.P. Zhu, C.C. Zhang, Y. Li, M.K. Lei. Formation of radiation defects in a metal target by a beam of accelerated atoms // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online): Abstracts. — Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. p. 445.

19. A.I. Pushkarev, A.I. Prima, X.P. Zhu, C.C. Zhang, Y. Li, Yu. Egorova, M.K. Lei. Suppression of the generation of heavy ions in vacuum diode with passive anode // 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP-2021: Abstracts. - Ekaterinburg, Russia, 2021, p. 216.