

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ И УСКОРЕННЫМИ АТОМАМИ

А.И. ПРИМА\*, Р.В. ЗЫРЯНОВА

Томский политехнический университет

\* E-mail: aip17@tpu.ru

Развитие космической и атомной промышленности невозможно без конструкционных материалов, способных в течении долгого времени сохранять свои характеристики в условиях высокоэнергетических воздействий. Повреждение кристаллической структуры материалов сопровождается образованием радиационных дефектов (РД), дальнейшая диффузия, миграция и отжиг которых влияет на устойчивость конструкционного материала к высокоэнергетическим воздействиям. Для получения РД в материалах используется высокоинтенсивное облучение, формируемое в ядерных реакторах, или имитационное облучение: электронные, ионные пучки и пучки ускоренных атомов [1]. Целью данной работы является сравнение формирования радиационных дефектов в металлах при облучении ионами и ускоренными атомами.

### 1. Анализ баланса энергии

При облучении металлической мишени ионами основная часть их кинетической энергии (75-80%) расходуется на возбуждение электронной подсистемы металлической мишени (electronic stopping), а не на формирование радиационных дефектов [2]. В таблице 1 приведены результаты расчета потерь энергии на электронное торможение и образование фононов для иона углерода с энергией 250 кэВ. Расчеты проводили при использовании пакета программ SRIM [3], предназначенного для моделирования формирования РД ионами.

Таблица 1 - Расчет потерь энергии атома углерода с энергией 250 кэВ в разных мишенях

Материал мишени	Потери энергии	
	Эл. торможение	Фононы
Ti	84%	12%
Fe	81%	16%
Zn	77%	19%
Латунь	77%	19%
Cu	78%	19%

Ускоренные атомы не имеют заряда, их энергия расходуется при упругом столкновении с атомами мишени, а не на электронное торможение.

### 2. Анализ спектра энергии атома отдачи

При упругом столкновении двух атомов – ускоренного атома и атома мишени сохраняются суммарные импульс и энергия сталкивающихся частиц. Энергия, которую получил атом отдачи после столкновения, равна:

$$E_2 = E_0 \frac{4m_1 \cdot m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cdot \cos^2 \alpha$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – масса ускоренного атома и масса атома мишени.  $\alpha$ -угол рассеяния атома мишени,  $E_0$  – начальная энергия ускоренного атома.

Спектр энергии атомов отдачи при облучении мишени моноэнергетичным пучком быстрых атомов будет иметь экстремум, обусловленный снижением энергии атома отдачи с ростом прицельного параметра и ростом при этом вероятности рассеяния. Энергия, которую получил атом отдачи после столкновения с ускоренным атомом, равна:

$$E_2 = E_0 \frac{8\pi m_1 \cdot m_2 \cdot (R_1 + R_2)}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы атома мишени и ускоренного атома.

На рисунке 1 показан энергетический спектр атомов отдачи после поглощения в железной мишени разных атомов с энергией 200 кэВ.

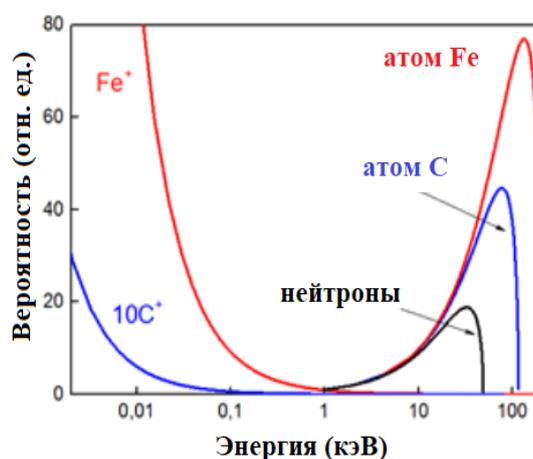


Рисунок 1 - Энергетический спектр атомов отдачи после поглощения различных ионов и атомов с энергией 200 кэВ и нейтронов с энергией 0.71 МэВ в железной мишени

Образование радиационных дефектов ионами происходит при малоугловом рассеянии на атомах мишени за счет их кулоновского взаимодействия, которое отличается от механизма образования дефектов быстрыми атомами. Вероятность рассеяния иона на атомах мишени описывается формулой Резерфорда. Энергия, которую получил атом отдачи после столкновения с ионом, равна:

$$E_2 = \frac{4K}{1 - \cos \theta}; K = \frac{4m_1 \cdot m_2 (4Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2)^2}{E_0 (m_1 + m_2)^2},$$

где  $Z_1, Z_2$  – заряд иона и ядра атома мишени,  $e$  – заряд электрона,  $\theta$  – угол рассеяния иона.

На рисунке показан энергетический спектр атомов отдачи после поглощения в железной мишени разных ионов с энергией 200 кэВ.

При облучении ионами азота с энергией 200 кэВ железной мишени 60% атомов отдачи имеют энергию менее 1 кэВ, при этом в 28% актов рассеяния эта энергия не превышает порог формирования радиационных дефектов. В тоже время, при облучении ускоренными атомами азота железной мишени, энергия первично выбитого атома мишени превышает 10 кэВ (при энергии ускоренного атома 200 кэВ) и более 80% энергии пучка ускоренных атомов расходуется на формирование радиационных дефектов. Поэтому облучение ускоренными атомами при исследовании радиационной стойкости материалов более полно имитирует прямое облучение нейтронами в ядерном реакторе.

### Список литературы

1. Григорьев И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М. 2001. 528 с.
2. James Ziegler - SRIM & TRIM. URL: <http://www.srim.org/>
3. Прима А.И., Р.В. Зырянова, Ф.Т. Бакиев. 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.