

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ МЭВ-ных ЭНЕРГИЙ

А. А. Медников, Н. П. Бобырь, А. В. Спицын, А. В. Голубева

НИЦ «Курчатовский институт», Россия, г. Москва,
cuprum.777@mail.ru

Введение

Управляемый термоядерный синтез является одним из потенциальных источников энергии будущего. Для его реализации в ряде стран ведется проектирование термоядерных энергетических реакторов (ДЕМО) и термоядерного источника нейтронов (ТИН). В этой связи возникает необходимость в новых конструкционных и обращенных к плазме материалах, требования к которым более строгие, чем в термоядерных установках предыдущих поколений: низкая активируемость при облучении термоядерными нейтронами с энергией 14 МэВ, высокая теплопроводность, быстрый спад наведенной активности, малое сечение захвата нейтронов.

В ходе работы ТЯР материалы первой стенки будут подвергаться воздействию интенсивных потоков тепла, компонентов термоядерной плазмы, а также быстрых нейтронов. Облучение нейтронами имеет ряд негативных последствий. Оно может привести к изменению элементного состава из-за трансмутаций (в т. ч. к образованию водорода, гелия и рения), а также может создать нейтронно-индуцированные повреждения (дефекты вакансионного и дислокационного типа, поры) в решетке металла. Эти повреждения являются центрами захвата водорода, и их наличие может привести к росту накопления водорода в поврежденном материале. Тритий – один из компонентов термоядерного топлива радиоактивен и дорог. По этой причине при выборе материалов для вакуумной камеры и защиты вакуумной камеры от воздействия плазмы необходимо минимизировать накопление изотопов водорода в этих материалах ТЯР. Поэтому исследование влияния таких дефектов на накопление изотопов водорода в материалах ТЯР.

Ввиду того, что на данный момент источника нейтронов термоядерного спектра, пригодного для материаловедческих применений, не существует, а так же, учитывая, что все нейтронные исследования сложны, дорогостоящи и связаны с повышенной радиационной опасностью, широко используются другие способы создания дефектов в материалах. Отдельные типы дефектов в материале могут быть созданы путем облучения образцов материалов высокоэнергетичными частицами.

Один из таких методов – облучение образцов материала высокоэнергетичными ионами. При таком методе формируются дефекты преимущественно каскадного типа. Но, если в случае нейтронного облучения поврежденный слой имеет толщину ~10 см, то в случае облучения высокоэнергетичными

ионами дефекты концентрируются только в узком приповерхностном слое ~ 1 мкм. Стоит добавить, что скорость наработки дефектов при использовании данного метода составляет $10^{-4} \div 10^{-3}$ сна/с. На рис. 1, а представлен профиль распределения дефектов, который был получен в программе SRIM (<http://www.srim.org>). В расчете вольфрам облучался ионами вольфрама W^{6+} с энергией 20 МэВ до дозы $1,6 \cdot 10^{14}$ ион/см². Энергия смещения для вольфрама взята равная 90 эВ. По профилю видно, что уровень повреждений имеет максимум на глубине 2 мкм.

Другой метод заключается в облучении образцов материала высокоэнергетичными электронами. Преимуществом данного метода является то, что распределение дефектов по глубине более равномерное, а толщина поврежденного слоя ~ 1 мм. На рис. 1, б представлен рассчитанный в программе Electron Damage [1] профиль распределения дефектов при облучении электронами с энергией 10 МэВ, до дозы $7 \cdot 10^{18}$ е/см². Энергия смещения для вольфрама взята равная 90 эВ. Из рисунка видно, что облучение высокоэнергетичными электронами позволяет создать дефекты, более равномерно распределенные и глубина поврежденного слоя существенно больше, чем при облучении ионами. Стоит отметить, что недостатком данного метода является низкая скорость наработки дефектов $\sim 10^{-7}$ сна/с.

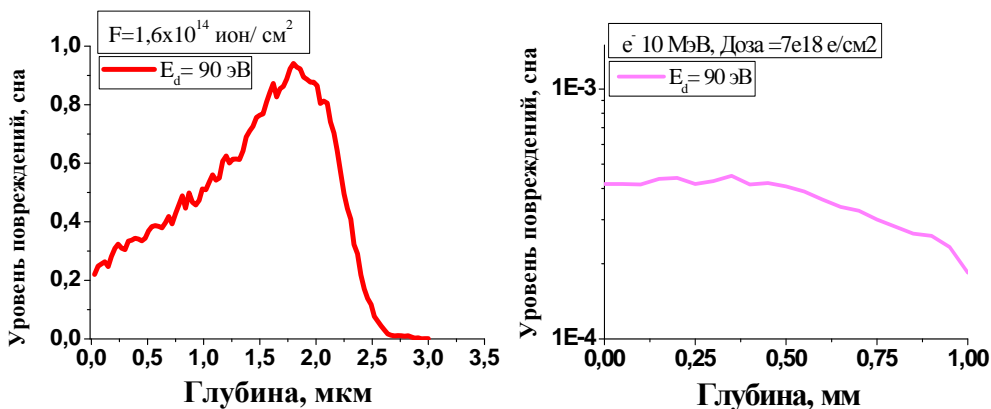


Рис. 1. а – профиль распределения дефектов в вольфраме облученном ионами вольфрама W^{6+} с энергией 20 МэВ до дозы $1,6 \cdot 10^{14}$ ион/см² (SRIM); б – профиль распределения дефектов в вольфраме облученном электронами с энергией 10 МэВ, до дозы $7 \cdot 10^{18}$ е/см² (Electron Damage)

Модуль для облучения

В данной работе повреждения в образцах вольфрама создавались, используя высокоэнергетичные электроны. Для проведения экспериментов был разработан высоковакуумный водоохлаждаемый модуль для одновременного облучения до 12 образцов.

В качестве источника электронов использовался линейный ускоритель со средней энергией электронов 10 МэВ со следующими параметрами: максимальный ток импульса 400 мА, длительность импульса $4 \div 7$ мкс, частота

10÷100 Гц, пятно пучка изменяемое в диапазоне 10÷100 мм. Вакуумная система, включающая в себя безмасляный ротационный насос, турбомолекулярный насос, магниторазрядный насос, датчики давления и систему вакуумопроводов и вентилей, позволяет поддерживать вакуум в ходе эксперимента не хуже 10^{-5} Па.

Для измерения импульсного тока пучка ускоренных электронов использовался индукционный датчик тока, устанавливаемый на выходе ускорителя, сигнал с выхода которого поступал на вход осциллографа. Импульсный ток электронов на образец рассчитывался путем измерения падения напряжения на резисторе сопротивлением 50 Ом.

В ходе экспериментов по облучению образцов высокоэнергетичными электронами, одной из проблем является нагрев образца в процессе облучения. Известно, что с ростом температуры образца увеличивается скорость отжига дефектов, а также происходит объединение дефектов в кластеры. Так, согласно данным работы [2], начиная с 600 К вакансии в вольфраме становятся подвижными и начинают объединяться в кластеры. Таким образом, в процессе электронного повреждения необходимо контролировать температуру образца, ее значение должно быть как можно ближе к комнатной. Также необходимо исключить процесс окисления образцов, поэтому в ходе эксперимента они должны находиться в вакууме.

В качестве технического решения был специально сконструирован и изготовлен модуль (рис. 2), который представляет собой вакуумную камеру с остаточным давлением не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ Па, в которой образцы крепятся на водоохлаждаемый медный держатель для предотвращения отжига генерируемых дефектов. Геометрия вакуумной системы ускорителя и модуля облучения позволяет облучать одновременно до 4 образцов размером $10 \cdot 10 \cdot 1$ мм, закрепленных на держателе образцов, при плотностях потока электронов до $5 \cdot 10^{13}$ е/с·см². Держатель образцов представляет собой полый медный цилиндр с припаянными трубками из нержавеющей стали, предназначенными для водяного охлаждения. Медь обладает хорошей теплопроводностью, и при обеспечении достаточного теплового контакта образца с держателем, температура задней поверхности образца практически совпадает с температурой держателя. Образцы крепятся к держателю с помощью прижимной пластины. Температура образцов измерялась с помощью термопар. Для измерения тока, который падает на образцы, держатель электроизолирован от остальной части модуля (для этого использовался патрубок с керамической вставкой). Дополнительно для отсечения остального пучка, который не попадал на образцы, в качестве диафрагмы был установлен фланец толщиной 30 мм, с квадратной прорезью 22·22 мм. Таким образом, поток электронов на образцы измерялся с хорошей точностью. В то же время, диафрагма позволяет расположить на ней и облучать одновременно с «основными» образцами до 8 образцов размером $10 \cdot 10 \cdot 1$ мм. Плотность потока электронов на эти образцы в 2–3 раза меньше, чем на образцы на основном держателе.

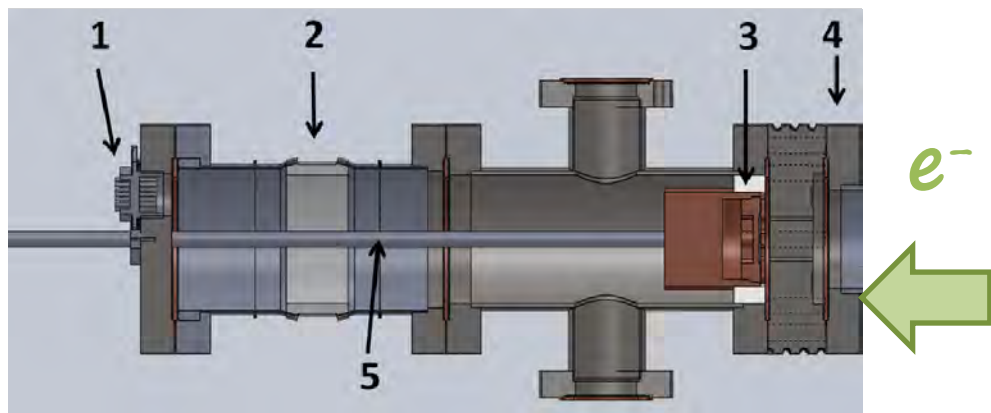


Рис. 2. Модуль для облучения электронами. 1 – токовводы, 2 – керамическая вставка, 3 – держатель образцов, 4 – фланец-диафрагма, 5 – нержавеющая трубка водоохлаждения

Облучение образцов

В работе использовались образцы вольфрама размером 10·10·1 мм, изначально рекристаллизованные при температуре 1673 К в течение 60 минут для того, чтобы максимально снизить содержание естественных дефектов. В ходе предварительного тестового эксперимента с одним образцом вольфрама были подобраны оптимальные параметры облучения, при которых температура образцов не превышала 150 °С (см. табл. 1). В ходе последующих экспериментов по облучению образцов электронами использовались эти параметры.

Таблица 1

Параметра облучения

Параметр	Значение
Энергия электронов	9,5–10 МэВ
Импульсный ток	160 мА
Длительность импульса	4,5 мкс
Частота	20÷60 Гц
Пятно пучка	22×22 мм
Температура образца	50÷130 °С
Поток	$2\div5 \times 10^{13} \text{ e}^-/\text{c} \cdot \text{cm}^2$

В дальнейшем были облучены 4 образца вольфрама одновременно. На рис. 3 показан держатель с установленными образцами. Температура облучения измерялась как в центре лицевой части держателя, так и с краю.



Рис. 3. Положение образцов в ходе облучения

В ходе проведения экспериментов по облучению образцов вольфрама высокоэнергетичными электронами с плотностью потока $5 \cdot 10^{13} \text{ e/cm}^2$ в течение примерно 40 ч были получены образцы с дозой $7 \cdot 10^{18} \text{ e/cm}^2$.

Расчет повреждений

Профили распределения дефектов по глубине были рассчитаны в коде Electron Damage. Этот программа представляет собой Монте-Карло код рассчитывающий повреждения, создаваемые электронами высоких энергий в металлах в одномерном приближении. В коде моделируется результат воздействия большого количества электронов (порядка нескольких сотен тысяч) на металл. При этом прослеживается движение каждого электрона в металле в отдельности. Все рассматриваемые электроны имеют одну и ту же начальную энергию и направление первоначального импульса (перпендикулярно поверхности образца). Траектория электрона считается прямой линией, которая испытывает изломы в местах столкновения электрона с ядром атома металла. Столкновения электронов с ядрами металла моделируется путем случайной генерации угла рассеяния согласно дифференциальному сечению Кулоновского рассеяния. Исходя из этого, вычисляется энергия, которую электрон передает атому металла в процессе столкновения. Считается, что произошло смещение атома металла из его положения в решетке, если переданная энергия превысила пороговую энергию для образования пары Френкеля. Количество созданных дефектов в результате этого элементарного акта взаимодействия вычисляется по формуле Кинчина-Пиза. Расчет неупругих потерь энергии электрона в процессе движения в металле проводится на основе формулы Бете-Блоха для электронов. При этом неупругие потери энергии считаются постоянными вдоль его прямолинейной траектории. Также учитываются потери энергии на генерацию тормозного излучения. В результате моделирования движения большого количества электронов в образце определяются количество смещений, созданных в каждом сегменте образца. Количество этих смещений делится на количество промоделированных электронов, в результате

чего получается распределение количества дефектов по глубине, в среднем создаваемых одним электроном в процессе его движения по металлу. На рис. 4 представлены рассчитанные профили распределения дефектов по глубине для двух значений энергий смещения в вольфраме.

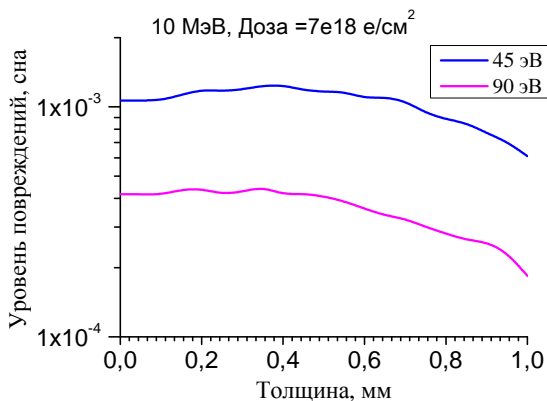


Рис. 4. Профили распределения дефектов по глубине

В расчетах полагается, что материал имеет температуру 0 К, поэтому тепловые эффекты, такие как колебания атомов решетки, термическая рекомбинация вакансий с междоузельным дефектом, объединение дефектов в кластеры, в коде не учитываются. Известно, что уже при температурах ниже комнатной в вольфраме происходит первая стадия отжига дефектов [3, 4]. Таким образом, в случае облучения образцов при комнатной температуре (и выше), большая часть первично созданных дефектов термически аннигилирует. Поэтому рассчитанные с помощью данного кода уровни повреждения следует рассматривать как оценку сверху концентрации созданных в образце точечных дефектов.

По полученным расчетам можно сказать, что уровень созданных повреждений составил $(4 \cdot 10^{-4})$ сна). Профиль распределения дефектов по глубине образцов плоский в диапазоне толщины 0–0,6 мм. Уровень повреждений на оборотной стороне образца примерно в 2 раза меньше, чем на входной. Данный уровень относительно низок сравнительно с тем, который ожидается в реальном реакторе в случае нейтронного облучения. Для получения больших повреждений требуются более продолжительные эксперименты по облучению. Тем не менее образцы с дефектами такого типа и уровня можно использовать для изучения фундаментальных процессов накопления изотопов водорода в дефектах материалов ТЯР.

Заключение

В данной работе был опробован способ создания дефектов в материалах ТЯР путем облучения образцов высокоэнергетичными электронами. Для данных целей был изготовлен модуль для облучения с водоохлаждаемым держателем для образцов. Был проведен эксперимент по облучению образцов вольфрама пучком 10 МэВ-ных электронов с плотностью потока электронов

$5 \cdot 10^{13}$ е/с·см² до дозы $7 \cdot 10^{18}$ е/см². Компьютерное моделирование распределения дефектов показало равномерное распределение дефектов в образце на уровне $4 \cdot 10^{-4}$ сна.

В дальнейшем планируется проводить эксперименты по созданию дефектов в образцах низкоактивируемой коррозионностойкой стали, с последующим изучением захвата изотопов водорода в материалах ТЯР с электронно-индуцированными дефектами.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00685 мол_а.

Список литературы

1. Messina L. Monte Carlo simulation for the prediction of gamma-induced damage in metals // Master Thesis; Politecnico di Torino, Kungliga Tekniska högskolan, 2010.

2. Eleveld H., van Veen A. Void growth and thermal desorption of deuterium from voids in tungsten // Journal of Nuclear Materials. 1994. Т. 212–215, Part B, N 0. С. 1421–1425.

3. Maury F., Biget M., Vajda P., Lucasson A., Lucasson P. Frenkel pair creation and stage I recovery in W crystals irradiated near threshold // Radiation Effects. 1978. Т. 38, N 1–2. С. 53–65.

4. Neely H. H., Keefer D. W., Sosin A. Electron Irradiation and Recovery of Tungsten // Physica status solidi (b). 1968. Т. 28, N 2. С. 675–682.