

05;12

## Экспериментальное моделирование воздействия быстрых нейтронов на Pt пучками заряженных частиц $Ar^+$

© В.А. Ивченко

Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург  
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: ivchenko@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2013 г.

Проведено изучение радиационных дефектов на атомно-чистой поверхности и в приповерхностном объеме платины, инициированных нейтронным взаимодействием ( $E > 0.1$  MeV) и пучками заряженных частиц  $Ar^+$  ( $E = 30$  keV), методами полевой ионной микроскопии. Показано, что взаимодействие быстрых нейтронов ( $E > 0.1$  MeV)  $F = 6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$ ,  $F = 3.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}$  с веществом приводит к образованию в объеме платины таких же радиационных повреждений, какие возникают после ионного облучения пучками заряженных ионов  $Ar^+$  с  $E = 30$  keV,  $F = 10^{16} \text{ ion/cm}^2$  и наблюдаются в Pt на глубине около 1.5–2 nm (соответственно  $F = 6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  и  $F = 3.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}$ ) от облученной поверхности. В результате экспериментально смоделировано воздействие нейтронного облучения пучками заряженных ионов на основании возникновения определенной структуры радиационных повреждений в материале.

Одной из приоритетных задач радиационной физики твердого тела является выяснение механизмов взаимодействия ускоренных частиц с веществом, изучение возникающей при этом атомной перестройки и, как следствие, образования радиационных дефектов кристаллической решетки и изменения фазового состояния материала.

Данная работа посвящена изучению пространственного распределения радиационных повреждений, в частности вакансий и их комплексов в объеме ГЦК-металлов, подвергнутых различным видам облучения (нейтронному и ионному).

Имитация нейтронного облучения больших флюенсов с помощью положительно заряженных ионов может позволить решить задачу

аналогового моделирования излучения одной установки излучением другой.

Основная цель работы состояла в попытке установить адекватность влияния разных видов облучения на один и тот же материал (Pt) на основе сравнения образовавшихся радиационных повреждений одного и того же типа. Для этого было проведено изучение радиационных дефектов на атомно-чистой поверхности и в приповерхностном объеме платины, инициированных нейтронным взаимодействием ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) и ионной имплантацией ( $E = 30 \text{ keV}$ ), методами полевой ионной микроскопии (ПИМ). ПИМ позволяет проводить прецизионное исследование изменений реальной структуры кристаллической решетки металлов и сплавов, происходящих в результате облучения, в атомно-пространственном масштабе. В то же время метод дает возможность анализировать структуру образца в объеме путем управляемого последовательного удаления поверхностных атомов электрическим полем.

Объектом облучения являлась платина (чистота 99.99%). Предназначенные для исследования образцы готовились в виде игольчатых эмиттеров с радиусом кривизны при вершине 30–50 nm из проволочных заготовок путем электрохимического полирования. Аттестованные для ионной имплантации полевые эмиттеры имели атомно-гладкую поверхность вершины, приготовленную *in situ* полевым испарением поверхностных атомов. Облучение игольчатых образцов, предварительно аттестованных в полевом ионном микроскопе, проводилось ускоренными до 30 keV пучками газовых ионов ( $\text{Ar}^+$ ), с флюенсом  $F = 10^{16} \text{ ion/cm}^2$  и плотностью ионного тока  $j = 150 \mu\text{A/cm}^2$  ( $T = 70^\circ\text{C}$ ). Бомбардировка производилась в направлении, параллельном оси образца-острия. Имплантированные после предварительной аттестации образцы-острия вновь помещали в ПИМ для изучения приповерхностного объема сплава.

Напротив, после нейтронного облучения образцы-острия изготавливались из уже облученных заготовок. Заготовки под образцы из Pt представляли собой проволочные отрезки диаметром 0.2 mm и длиной 20 mm. Их облучали в реакторе ИББ-2М при  $T = 310 \text{ K}$  в течение 1 h до флюенсов быстрых нейтронов (с  $E > 0.1 \text{ MeV}$ )  $F = 6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  и  $F = 3.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}$ . В камеру ПИМ помещали образцы-острия с радиусом кривизны при вершине 10–30 nm, изготовленные путем электрохимического полирования, и, фиксируя регистрирующей аппаратурой (фото- или видеокамерой) ионные изображения поверхности при

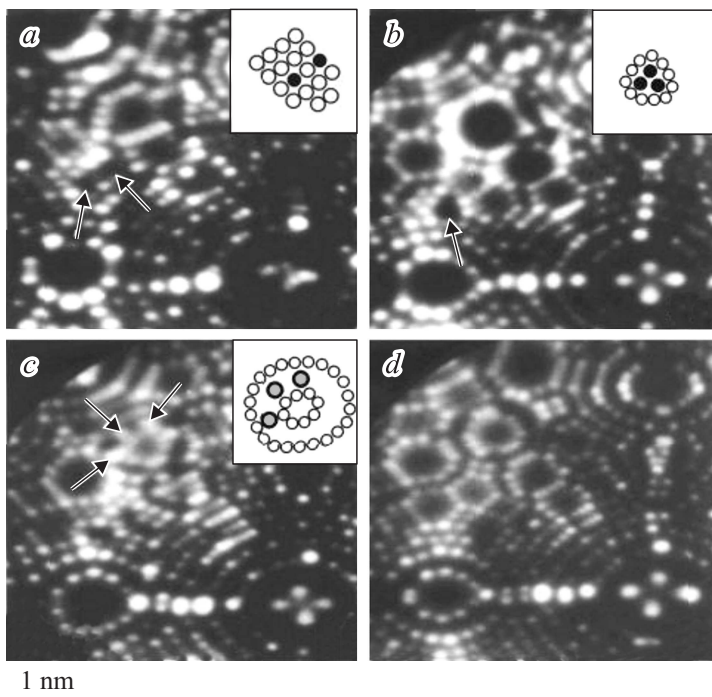
контролируемом удалении атомных слоев, анализировали структурное состояние сплава в объеме.

Полевой ионный микроскоп был снабжен микроканальным ионно-электронным конвертером, усиливающим яркость ионных изображений в  $10^4$  раз. Хладагентом служил жидкий азот ( $T = 78 \text{ K}$ ), в качестве изображающего газа использовали спектрально-чистый неон.

В результате изучения структурного состояния чистой Pt после нейтронного облучения до флюенса  $6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) было обнаружено присутствие большого количества нарушений кристаллической решетки [1]. Это были единичные точечные дефекты, отдельные вакансии, смещенные междоузельные атомы и вакансионные кластеры.

На рис. 1 приведен ионный контраст типичного реального пространственного распределения радиационных повреждений кристаллической решетки Pt после взаимодействия с нейтронным излучением в процессе контролируемого удаления поверхностных атомов. Микрокартина поверхности платины, подвергнутой облучению быстрыми нейтронами по контрасту ионного изображения, практически подобна микрокартине необлученного образца. Однако на некоторых участках поверхности облученной платины наблюдали нарушения ионного контраста и регулярности кольцевой картины. Именно нарушения в кольцевой картине ионного контраста и определяют дефектность совершенной структуры кристалла. По известному контрасту [2] идентифицируют тот или иной тип возникающих в материале дефектов после различных внешних воздействий. В данном случае изменение ионного контраста облученной платины по сравнению с контрастом исходной Pt обусловлено радиационными повреждениями, которые являются результатом взаимодействия нейтронов с атомами кристаллической решетки. Структура дефектов анализировалась в объеме в процессе контролируемого удаления поверхностных атомов платины электрическим полем. Обнаруженные радиационные повреждения, как правило, представляли собой либо единичные точечные дефекты (вакансии, междоузельные атомы), либо небольшие вакансионные комплексы с размерами, соизмеримыми с межатомными расстояниями.

При увеличении флюенса нейтронов до  $3.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}$  были обнаружены [1] обедненные зоны (область с локально повышенной концентрацией вакансий) с „поясом“ междоузельных атомов. Это наблюдение подтверждает гипотезу [3], согласно которой в металле каскад развивается так, что из центральной его части (наиболее возмущенной области)



**Рис. 1.** Неоновые изображения участков поверхности платины, облученной нейтронами до  $F = 6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$ . Стрелками показаны: *a* — единичные вакансии; *b* — тетраэдрический вакансионный кластер; *c* — межузельные атомы; *d* — тот же участок поверхности без дефектов. Соответствующие схемы дефектов приведены в правом верхнем углу микроизображений:  $\circ$  — изображение атома;  $\bullet$  — изображение вакансии;  $\bigcirc$  — изображение межузельного атома.

выносятся большое число атомов посредством цепочек замещений. По нашим оценкам средняя концентрация вакансий в обедненных зонах составила 9%, а концентрация межузельных атомов 1.5%.

В работе [1] была предпринята попытка выяснить пространственную геометрию обедненных зон в облученной до флюенса промежуточных и быстрых ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) нейтронов  $3.5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-2}$  платине. Форма обедненных зон анализировалась в стандартном режиме путем контролируемого испарения атомных слоев электрическим полем с целью

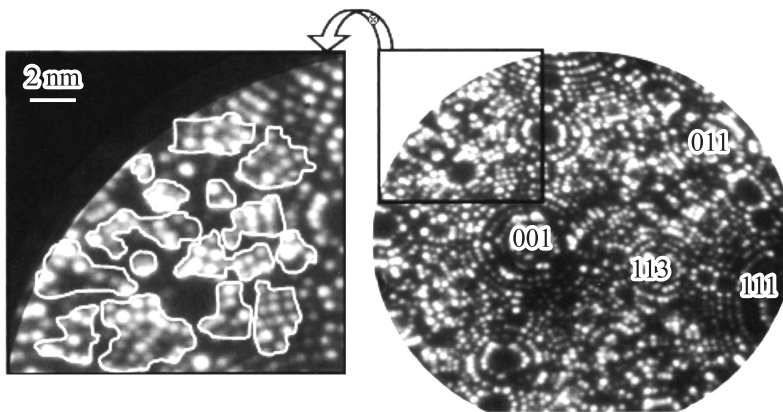
определения характерной анизотропии. В результате анализа контраста дефектных областей не было обнаружено анизотропии формы обедненных зон. Из полученных данных следует, что конфигурация зон не соответствует какой-либо простой геометрической фигуре, так как вакансии, их составляющие, расположены крайне нерегулярно.

Изучение большого количества микроснимков поверхности облученной платины позволило измерить продольные и поперечные размеры отдельных обедненных зон. В результате определено среднее значение диаметра радиационного кластера, которое составило 3.2 nm.

В результате нейтронного облучения Pt до  $6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) структурное состояние чистого металла несколько изменилось, о чем свидетельствовали микроснимки, регистрирующие атомно-чистую поверхность облученной платины. На микрофотографиях наблюдались дефектные участки поверхности, где результат взаимодействия с нейтронами обнаруживался в виде смещений атомов из узлов кристаллической решетки. Радиационные повреждения, как правило, представляли собой отдельные вакансии, небольшие вакансионные кластеры, смещенные из положений равновесия (узлов кристаллической решетки) отдельные атомы и зоны смещенных атомов. Следовательно, можно констатировать, что влияние указанного выше флюенса нейтронов создает в платине отдельные, неперекрывающиеся каскады атомных смещений.

Ионные изображения аттестуемых перед ионным облучением полевых эмиттеров показывали практически совершенный кольцевой контраст монокристаллов чистых металлов, свидетельствующий об отсутствии структурных дефектов [4].

На рис. 2 представлено неоновое изображение атомно-чистой поверхности чистой платины, облученной ионами  $\text{Ar}^+$  с  $E = 30 \text{ keV}$ ,  $F = 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ . На ионных микрокартинах были обнаружены нарушения в кольцевом контрасте изображений граней кристалла. Именно такие нарушения в кольцевой картине ионного контраста регистрируют дефектность в совершенной структуре кристалла и определяют контраст от тех или иных дефектов, возникающих в материале после внешних воздействий. В данном случае изменения ионного контраста облученной платины по сравнению с контрастом исходной аттестованной Pt, наблюдаемые в слое толщиной 1.5 nm от облученной поверхности, свидетельствуют о присутствии блочной наноразмерной структуры в приповерхностном объеме материала [4].

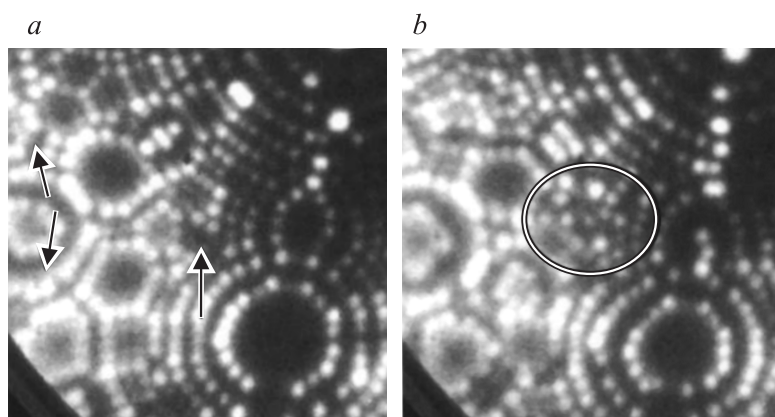


**Рис. 2.** Неоновые изображения участка поверхности Pt после облучения  $\text{Ag}^+$  с  $F = 10^{16} \text{ ion/cm}^2$  ( $T = 70^\circ\text{C}$ ), отмечены наноблоки.

Как видно, ионный контраст радиационных повреждений после ионного облучения (рис. 2) отличается от контраста радиационных повреждений после нейтронного взаимодействия с материалом (рис. 1). При дальнейшем изучении приповерхностного объема Pt после ионного облучения путем последовательного полевого испарения атомных слоев на глубине 2 nm от поверхности были обнаружены радиационные повреждения, идентичные повреждениям на рис. 1. Ионный контраст от таких радиационных повреждений приведен на рис. 3.

Следовательно, взаимодействие быстрых нейтронов ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )  $F = 6.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-2}$  приводит к образованию в объеме платины таких радиационных повреждений, какие после ионного облучения пучками заряженных ионов  $\text{Ag}^+$  с  $E = 30 \text{ keV}$ ,  $F = 10^{16} \text{ ion/cm}^2$  наблюдаются в Pt на глубине около 2 nm от облученной поверхности.

Отсюда можно сделать вывод о том, что все радиационные повреждения в объеме материала после нейтронного облучения есть дефекты кристаллической решетки определенного типа, которые зависят только от флюенса и энергии нейтронов. Напротив, при взаимодействии пучков заряженных ионов с веществом тип радиационных повреждений обусловлен кроме параметров облучения расстоянием от облученной поверхности. На разной глубине материала наблюдается



**Рис. 3.** Неоновые изображения участка поверхности Pt: *a* — на глубине 2 nm от облученной поверхности (стрелками показаны отдельные вакансии и межузельные атомы); *b* — на глубине 1.5 nm от облученной поверхности (показана обедненная зона).

процесс перехода одного типа радиационных повреждений в другие. Поэтому полностью смоделировать аналог воздействия быстрых нейтронов при определенном флюенсе с ионным облучением можно только на определенной глубине облученного пучками заряженных частиц приповерхностного объема вещества. Для этого необходимо сравнить тип образующейся дефектной структуры при разных видах облучения на соответствующей глубине приповерхностного объема облученного пучками частиц материала.

Таким образом, в работе обнаружено, что взаимодействие быстрых нейтронов с материалом соответствует воздействию пучков заряженных ионов  $Ag^+$  на определенной глубине от облученной поверхности. Отсюда следует, что можно моделировать воздействие нейтронного облучения пучками заряженных ионов на основании возникновения определенной структуры радиационных повреждений в материале.

Работа выполнена при поддержке Уральского отделения Российской академии наук (Программа ОФН РАН № 5 „Физика новых материалов и структур“).

## Список литературы

- [1] *Ивченко В.А., Медведева Е.В., Овчинников В.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 8. С. 26–32.
- [2] *Boowkett K.M., Smith D.A.* Field Ion Microscopy // Defects in Crystalline Solids / Ed.: S. Amelinckx, R. Gevers, J. Nihoul. Amsterdam, London: North Holland Publishing Company, 1970. V. 2. 257 p.
- [3] *Seeger A.K.* // Proceeding of The Second Intern. Conf. On Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva: United Nations, 1958. V. V1. P. 2503.
- [4] *Ивченко В.А., Медведева Е.В.* // Изв. вузов. Физика. 2009. № 8/2. С. 410–412.