

Автоионная микроскопия радиационных дефектов в вольфраме, облученном ионами W^+ энергией 50 кэВ.

I. Методика и результаты эксперимента

БОБКОВ А. Ф., ЗАБОЛОТНЫЙ В. Т., ИВАНОВ Л. И., КУКАВАДЗЕ Г. М., МАХЛИН Н. А., СУВОРОВ А. Л.

В целях дальнейшего развития радиационного материаловедения было предпринято изучение каскадов атомных смещений в вольфраме, подобных образующимся под воздействием нейтронов при реакции дейтериево-третиевого синтеза. Это изучение продолжает предшествующие работы [1], но для других интервалов энергии нейтронов и температуры.

В соответствии с принятой методикой эксперимента заранее изготовленные и просмотренные в автоионном микроскопе [2] образцы (острия) из технически чистого вольфрама марки ВА-3 облучали в ионном ускорителе «Везувий-1» ионами вольфрама энергией 50 кэВ при температуре 300 К, соответствующей стадии второго отжига. Дозы облучения составляли 10^{12} , 10^{13} и $5 \cdot 10^{14}$ ион/см², что по расчету [3] означает создание за время облучения 0,01; 0,1 и 5,5 смещ./атом, при этом эквивалентные значения флюенса нейтронов равны $7 \cdot 10^{18}$; $7 \cdot 10^{19}$ и $3,5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см². Скорость генерации дефектов в вольфраме составила 10^{-3} смещ./атом, т. е. в 10^4 раз выше, чем ожидается в термоядерных реакторах. Затем образцы снова анализировались в автоионном микроскопе при 78 К. Объемную картину расположения возникших радиационных дефектов получали методом послойного (в непрерывном режиме) испарения полем поверхностных атомов. Аппроксимируя поверхность образцов полусферой, а автоионное изображение — псевдостереографической проекцией [4], можно по сериям последовательных изображений построить распределение дефектов (вакансий) вдоль трека бомбардирующих ионов. Искажение вида радиационных дефектов изображающим и испаряющим полями учитывали по известной методике [5, 6]. Тип и размеры радиационных повреждений определяли на основании предшествующих результатов [6—9].

Автоионно-микроскопический анализ облученных образцов показал образование дефектных областей, представляющих собой вакансионные скопления (обедненные зоны) с расположенным на расстоянии в среднем 25 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) ореолом межузельных атомов. Подсчитанная концентрация вакансий в обедненных зонах составила

(30 ± 10) ат.%, причем вакансии располагались как изолированно, так и в виде скоплений, содержащих до тридцати вакансий. При дозе облучения 10^{12} ион/см² были обнаружены вакансионные скопления объемом $\sim 1 \cdot 10^3 \Omega_a$ (здесь $\Omega_a = 15,85 \text{ \AA}^3$ — атомный объем вольфрама), содержащие примерно 300 вакантных узлов. В некоторых случаях вблизи крупных вакансионных скоплений наблюдались более мелкие, состоящие из 10—30 вакансий и удаленные друг от друга на несколько десятков ангстрем (рис. 1а, б). Предполагается, что оба скопления возникли в результате разветвления одного каскада смещений на изолированные субкаскады. На каждый собственный ион приходится в среднем $\sim 1,25$ субкаскада. Согласно оценке [10], средняя энергия образования субкаскада равна ~ 30 кэВ. Число смещений в решетке вольфрама, произ-

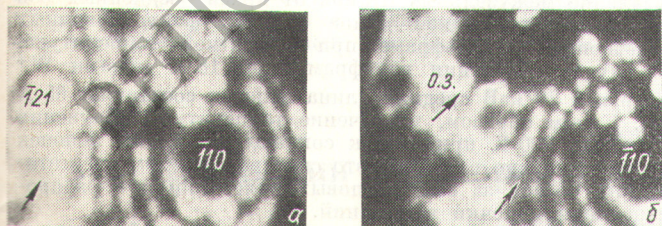


Рис. 1. Полученные в результате последовательного испарения полем автоионные изображения двух поверхностей облученного вольфрамового образца с обедненной зоной единичного каскада смещений атомов (стрелкой указано направление облучения): а — исходное облучение; б — после удаления полем восьми атомных слоев

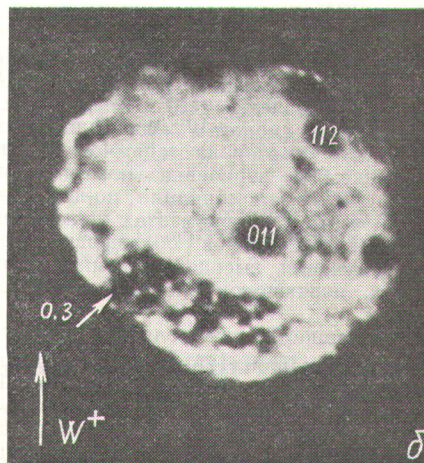


Рис. 2. Автоионные изображения поверхностей облученных вольфрамовых образцов, демонстрирующие образование вакансионных скоплений при дозах $1 \cdot 10^{13}$ (а) и $5 \cdot 10^{14}$ (б) ион/см² (стрелками указано направление облучения)

видимых одним ионом вольфрама энергией 50 кэВ, определяется по соотношению $\nu = k\bar{E}/2E_d$, где k — коэффициент каскадной функции (0,8); \bar{E} — средняя энергия, затрачиваемая ионом на создание смещений (37,7 кэВ); E_d — пороговая энергия смещения атомов вольфрама (50 эВ). Отсюда $\nu \approx 300$.

При дозе облучения $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² в некоторых случаях были обнаружены скопления объемом $3 \cdot 10^3 \Omega_a$, состоящие примерно из 10^3 вакансий. Одно из таких скоплений, образовавшихся в результате перекрытия трех каскадов смещений (рис. 2, а) начинается на поверхности образца и простирается приблизительно на 90 \AA в глубину по направлению пучка частиц. Концентрация таких каскадов в образцах составила 10^{18} см^{-3} , а их средний объем — приблизительно $2 \cdot 10^3 \Omega_a$ (~600 вакансий).

Некоторые из автоионных изображений показали образование единичных межузельных атомов на расстоянии от 10 до 50 \AA от края ближайшего вакансионного скопления и на глубине не менее 45 \AA от поверхности; общее число межузельных атомов составляет ~1% числа обнаруженных вакансий. Не наблюдались также контрасты, которые можно было бы интерпретировать как кластеры межузельных атомов.

После облучения до дозы $5 \cdot 10^4$ ион/см² были обнаружены обедненные зоны объемом от 1 до $5 \cdot 10^4 \Omega_a$ (рис. 2, б). Зоны начинаются на поверхности и простираются в глубь образца по направлению пучка частиц на расстояние до 130 \AA . Очевидно, что эти повреждения образовались в результате слияния обедненных зон, принадлежащих

множеству каскадов смещений. При всех дозах облучения внутри вакансионных скоплений обнаружены мелкие поры диаметром $\sim 10 \text{ \AA}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seidman D. «Surface Sci.», 1978, v. 70, p. 532.
2. Кузнецов В. А., Кукавадзе Г. М., Суворов А. Л. «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 2, с. 152.
3. Robinson M. In: Radiation Damage in Metals. American Society for Metals. Ohio, Metals Park, 1976, p. 1.
4. Brandon D. «J. Sci. Instrum.», 1964, v. 41, p. 373.
5. Суворов А. Л. В кн.: Структура и свойства монокристаллов тугоплавких металлов. М., «Наука», 1973, с. 52.
6. Суворов А. Л., Соколов А. Г. «Кристаллография», 1972, т. 17, с. 1200.
7. Суворов А. Л. «Успехи физ. наук», 1970, т. 101, с. 21.
8. Суворов А. Л., Соколов А. Г. «Кристаллография», 1975, т. 20, с. 379.
9. Бобков А. Ф. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Харьков, изд. ХФТИ, 1976, вып. 1(3), с. 26.
10. Pronko P., Merkle K. In: Proc. Workshop on Correlation Neutron and Charged Particle Damage. ORNL, USA, 1976, p. 177.

Поступило в Редакцию 21.09.78
В окончательной редакции 08.01.80

УДК 539.2:539.12.04

Автоионная микроскопия радиационных дефектов в вольфраме, облученном ионами W^+ энергией 50 кэВ.

II. Обсуждение экспериментальных данных
ЗАВОЛТНЫЙ В. Т., ИВАНОВ Л. И., МАХЛИН Н. А., СУВОРОВ А. Л.

Представляет интерес сопоставить полученные экспериментальные данные [1] с результатами расчетов радиационной повреждаемости вольфрама, существующими моделями развития и отжига каскадов смещений, построенными при помощи ЭВМ, а также с данными других экспериментов [2—5].

Обнаружено, что обедненные зоны каскадов смещений имеют максимальный линейный размер (до 60 \AA , $1 \text{ \AA} = 10^{10} \text{ м}$) вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Среднее число вакансий, создаваемых одним ионом W^+ , составляет не менее 240, т. е. в результате на второй стадии отжига в каскаде сохраняется около 80% первоначального числа вакансий. Такая незначительная рекомбинация, по-видимому, объясняется тем, что в этих экспериментах подавляющее большинство межузельных атомов, обладающих при данной температуре облучения высокой подвижностью, уходит на поверхность, играющую роль эффективного доминирующего стока.

Средняя удаленность межузельных атомов от края обедненной зоны составляет 25 \AA , а их число не превышает 1% расчетного числа образующихся пар Френкеля. Высокая подвижность межузельных атомов в вольфраме при комнатной температуре вызвана образованием комплексов с атомами примесных элементов. Обычно полагают, что межузельные атомы образуются посредством цепочек фокусированных замещений [5]. Присутствие примесей в облучаемом металле может привести к сокращению длины цепочек в результате их обрыва на атомах примеси [6]. Однако в данном случае концентрация примесей

составляла менее 0,2 ат.% и не могла существенно изменить среднюю длину цепочек. Поэтому можно заключить, что образование комплексов межузельный атом — атом примеси не связано с этим обрывом цепочек, а произошло в результате захвата межузельных атомов примесными ловушками в процессе термической миграции.

Поскольку межузельные атомы были обнаружены только в интервале 10 — 50 \AA от края обедненных зон, можно заключить, что влияние термической миграции на их первоначальное распределение невелико. В противном случае в исследуемом объеме должно было возникать равномерное распределение межузельных атомов, т. е. среднее удаление межузельных атомов от краев обедненных зон соответствует средней длине цепочек фокусированных замещений в вольфраме при комнатной температуре. В случае облучения вольфрама при 18 К ионами W^+ энергией 20 кэВ средняя длина цепочек составляет 65 \AA [5]. Таким образом, увеличение температуры облучения от 18 до 300 К приводит к сокращению длины цепочек приблизительно в 3 раза; это связано с ростом энергетических потерь за счет тепловых колебаний при распространении цепочки замещений.

В экспериментах, как и ранее [5], не были обнаружены комплексы межузельных атомов, хотя их наличие предсказывается моделями развития и отжига каскадов смещений, построенными с помощью ЭВМ [2, 3, 7]. Такое расхождение можно объяснить тем, что в указанных моделях не рассматривались замещающие соударения, а объем рекомбинации межузельных атомов выбран произвольно,