

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

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 Å 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 Å от края ближайшего вакансионного скопления и на глубине не менее 45 Å от поверхности; общее число межузельных атомов составило ~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 расстоянии до 130 Å. 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 ~10 Å.

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

ЗАБОЛОТНЫЙ 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 Å, $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$) 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.

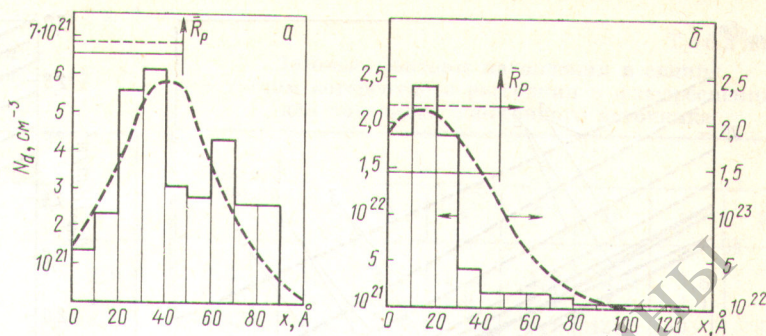
Средняя удаленность межузельных атомов от края обедненной зоны составляет 25 Å, а их число не превышает 1% расчетного числа образующихся пар Френкеля. Высокая подвижность межузельных атомов в вольфраме при комнатной температуре вызвана образованием комплексов с атомами примесных элементов. Обычно полагают, 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 Å от края обедненных зон, можно заключить, что влияние термической миграции на их первоначальное распределение невелико. В противном случае в исследуемом объеме должно было возникнуть 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 Å [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.

Распределение дефектов по глубине материала, построенное по совокупности автоионных изображений поверхностных слоев при дозе облучения $1 \cdot 10^{12}$ (а) и $5 \cdot 10^{14}$ ион/см² (б)



Кроме обедненных зон, содержащих несколько сот вакансий, были обнаружены и более мелкие скопления, содержащие около десятка вакансий. Расстояние от мелких вакансионных скоплений до крупных составило несколько десятков ангстрем. По-видимому, такие скопления являются обедненными зонами субкаскадов смещений энергией ~ 1 кэВ. Перекрытие каскадов смещений с одновременным отжигом поврежденных внутри каскадов в настоящее время изучено сравнительно мало. Единственным способом, позволяющим исследовать этот процесс на атомарном уровне, по-видимому, является автоионная микроскопия.

К важнейшим параметрам, необходимым для сопоставления, например, распухания при нейтронном облучении и имитационном эксперименте, относится распределение дефектов по глубине образца. Экспериментально получить такие сведения весьма затруднительно, особенно при сравнительно небольшой энергии бомбардирующих ионов. На рисунке показано, как распределяются вакансии по глубине при различных дозах облучения, причем направление оси x совпадает с направлением пучка ионов. Наряду с экспериментальными гистограммами построены и теоретические кривые (пунктир). Значения средней плотности вакансий (сплошная линия) и средней плотности смещений (пунктир), определенные соответственно из гистограммы и теоретической кривой, отличаются на 4,4%. Смещение максимума гистограммы к поверхности по мере возрастания дозы облучения вызвано распылением образца. Судя по изменению распределения дефектов, коэффициент распыления равен 60—70 атом/ион. Согласно расчетам, средняя концентрация смещений при данной дозе должна составлять $2,2 \cdot 10^{23}$ см⁻³. Однако наблюдаемое значение равно $1,45 \cdot 10^{22}$ см⁻³. Причина такого расхождения заключается в специфике процесса развития каскада смещений в кристалле, обладающем высокой концентрацией вакансий. Образующиеся в каскаде смещенные атомы могут попадать в уже имеющиеся вакансии, что приведет к снижению общего числа создаваемых дефектов.

Как уже указывалось, основным видом радиационных повреждений при дозе облучения $1 \cdot 10^{12}$ ион/см² являются обедненные зоны единичных каскадов смещений. Перекрытие каскадов при дозе $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² приводит к тому, что наряду с этим возникают дефектные области от слияния нескольких обедненных зон. С увеличением дозы

облучения до $5 \cdot 10^{14}$ ион/см² происходит перекрытие множества каскадов, сопровождающееся появлением обширных дефектных областей. Перекрытие каскадов снижает эффективность образования радиационных дефектов. Так, если при дозах облучения $1 \cdot 10^{12}$ и $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² каждый ион образует в среднем по 300 вакансий, то при дозе облучения $5 \cdot 10^{14}$ ион/см² уже только 22 вакансии. Средняя концентрация вакансий в поврежденном слое при дозе облучения $1 \cdot 10^{12}$ ион/см² составляет $3,5-7,0 \cdot 10^{-3}$ атомных долей, при дозе $1 \cdot 10^{13}$ ион/см² — она в 10 раз меньше, а при дозе $5 \cdot 10^{14}$ ион/см² — не превышает 0,09—0,17 атомных долей. Согласно [8], объем вакансии в вольфраме равен $0,42 \text{ \AA}^3$. Таким образом, среднее вакансионное распухание поврежденного слоя при максимальной дозе облучения может достигать 7%. При высоких дозах облучения не обнаружено образования пор размером более 10 \AA , однако существующие мелкие поры при соответствующих термических условиях могут играть роль зародышей более крупных пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков А. Ф. и др. «Атомная энергия», наст. вып., с. 325.
2. Doran D. «Rad. Effects», 1970, v. 2, p. 249.
3. Beeler J., Beeler M. In: Proc. Intern. Conf on Fundamental Aspects of Radiation Damage in Metals. Gatlinburg, 6—10 Oct. 1975, CONF-751006-P1, US ERDA, v. 1, p. 28.
4. Кирсанов В. В. В кн.: Реакторное материаловедение. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1978, т. 1, с. 340.
5. Beavan L., Scanlan R., Seidman D. «Acta Metallurgica», 1971, v. 19, p. 1339.
6. Кирсанов В. В. «Физика твердого тела», 1977, т. 19, с. 1184.
7. Beeler J., Yoshikawa N. In: Materials Research and Standards, 1971, v. 11, N 29, p. 50.
8. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах, М., «Мир», 1971.

Поступило в Редакцию 15.12.78
В окончательной редакции 08.01.80

УДК 621.039

О влиянии растворенного в воде газа на критические тепловые нагрузки

ФИСЕНКО В. В., КАТКОВ Ю. Д., ЛАСТОЧКИН А. П., МАКСИМОВ В. И.

В связи с возрастающими требованиями к надежности элементов оборудования АЭС и в первую очередь к активным зонам энергетических реакторов в СССР и за рубежом опубликован ряд работ, посвященных исследованию кри-

зиса теплообмена при вынужденном течении воды в трубах. В 1976 г. были опубликованы табличные данные для расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах [1]. В таблицах приведены