

мени t_1 сигналом СИ₂ отпирается транзистор VT4 на время, примерно равное половине периода повторения $U_{п}$, и отрицательный полюс ИП соединяется с нулевым потенциалом. В этот же момент времени сигналом СИ₁ отпирается транзистор VT2, через который заряжается эквивалентная емкость $C_{гип}$ до напряжения ИП. В момент времени t_2 сигналом СИ₃ отпирается транзистор VT3. При этом формируется срез положительной части $U_{п}$. Отпираем транзистора VT1 в момент времени t_3 обеспечивается «привязка» положительного полюса ИП к нулевому потенциалу. Заряд $C_{гип}$ происходит от отрицательного полюса ИП через транзистор VT3, а разряд в момент времени t_4 (формирование среза отрицательной части $U_{п}$) — через транзистор VT2 и диод VD1.

Схемы управления ГИП~, в том числе и ГПН, выполняются, как правило, на дискретных компонентах (транзисторы, диоды, резисторы). Это объясняется тем, что до настоящего времени не налажен серийный выпуск высоковольтных мощных интегральных микросхем с высоким быстродействием, необходимым для получения достаточно высокой крутизны фронтов импульсов, оказывающей существенное влияние на диапазон управления ГИП~.

Таким образом, описываемая схема ГПН обеспечивает получение двухполярного $U_{п}$ от одного ИП со стабильной и одинаковой амплитудой положительной и отрицательной частей. Использование одного ИП позволяет уменьшить число соединений, по которым протекают мощные импульсные токи, и уменьшить вероятность возникновения сбоев за счет паразитных наводок.

Список литературы

1. Яблонский Ф. М. Газоразрядные приборы для отображения информации. М., 1979.
2. Якимов О. П. // Электронная техника. Сер.: Электрорадиодные и газоразрядные приборы. 1983. Вып. 3. С. 11.
3. Проблемы прикладной физики. Дисплей / Под ред. Ж. Панкова. М., 1982.
4. Задубовский И. И., Калугин Б. Н., Николаенко В. Т. Генератор импульсов: А. с. 1018195 СССР // БИ. 1983. № 18.

Поступила в редакцию 18.05.87.

УДК 548-162:539.12.04

В. П. ГОЛЬЦЕВ, В. В. ХОДАСЕВИЧ,
В. М. ДРАКО, В. В. УГЛОВ

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В НИКЕЛЕ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

В настоящее время значительно возрос интерес к кинетике и механизмам взаимодействия ускоренных ионов с ГЦК- и ОЦК-металлами в связи с решением ряда проблем радиационной физики твердого тела и реакторного материаловедения [1]. Изучение основных закономерностей образования, накопления и эволюции радиационных дефектов структуры и их взаимодействия с внедренными ионами помогает понять механизм таких явлений, как радиационное набухание, структурно-фазовые превращения и упрочнение материалов [2]. Экспериментально установлено, что имплантация ионов инертных газов существенно влияет на характер радиационной повреждаемости металлов, что проявляется в изменении морфологии скоплений дефектов в процессе облучения или постимплантационного отжига.

В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа JEM-100X исследовано влияние изохронного отжига на динамику накопления радиационных дефектов в ионно-имплантированных образцах никеля.

Образцами служили тонкие пленки никеля толщиной 100 нм, напыленные электронно-лучевым способом при комнатной температуре на свежие сколы NaCl. Напыление проводилось в вакууме 10^{-4} — 10^{-5} Па со скоростью 1—2 нм/с. Облучение образцов никеля ионами Ag^+ осуществлялось при ускоряющем напряжении 40 кВ. Дозы облучения варьировались в интервале 10^{15} — 10^{17} ион/см². Изохронный отжиг проводился при температуре от 300 до 1300 К в вакууме (не хуже 10^{-4} Па) в течение 1 ч.

Известно, что облучение металлов при температурах ниже $0,2$ — $0,3T_{\text{пл}}$ приводит к образованию множества точечных дефектов, поведение которых обусловлено исходной структурой материала и параметрами облучения [1]. Основными типами радиационных дефектов в этом случае являются малые петли межузельных атомов, включения второй фазы и малоподвижные, заблокированные вакансии, фиксируемая концентрация которых, согласно [3], в десятки раз выше, чем при высокотемпературном облучении.

Мелкозернистая структура образцов никеля при 300 К (рис. 1, а) и высокая плотность дислокаций, достигающая 10^{15} — 10^{16} м⁻², — основные предпосылки для гетерогенного механизма образования зародышей второй фазы, к которой относится и радиационная пористость. Как указывается в работе [4], наличие повышенной плотности дислокаций, являющихся стоком в большей степени межузельных атомов, чем вакансий, приводит к зарождению многочисленных субмикроскопических зародышевых пор.

С другой стороны, наличие в металлах малорастворимых газовых атомов (гелий, аргон, неон и др.) стабилизирует трехмерные скопления вакансий, что, в свою очередь, усиливает процесс зародышеобразования. Средняя концентрация ионов аргона по глубине их залегания в поверхностном слое никелевых образцов, как показали исследования с использованием метода резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия с энергией 1,6 МэВ (РОР), для доз облучения $5 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} ион/см² составляет $0,5 \cdot 10^{22}$ и $1,3 \cdot 10^{22}$ см⁻³ или 6 и 14 ат. % соответственно.

Увеличение температуры постимплантационного отжига до 670 К и выше приводит к росту зерна и интенсивному формированию пористости (см. рис. 1, б, в, г). Наиболее крупные поры наблюдаются в основном на тройных стыках зерен. Поры располагаются в основном на межзеренных границах, декорируя последние, изредка — на двойниковых границах.

Принимая в качестве движущей силы зарождения и роста пор уменьшение энергии системы, содержащей газовакансионные скопления, можно определить наиболее вероятный тип дефектов структуры, на которых

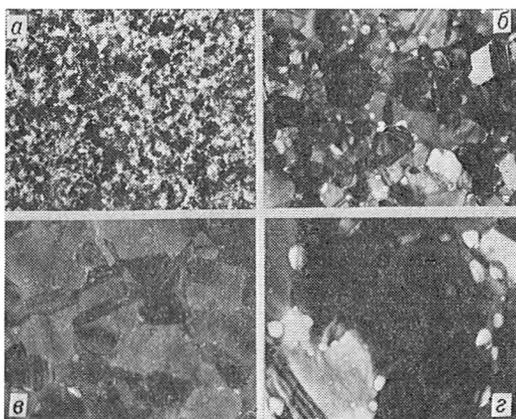


Рис. 1. Изменение структуры пленок никеля, облученных ионами аргона дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см², в процессе отжига при 300(а); 770(б); 870(в); 1070 К(г)

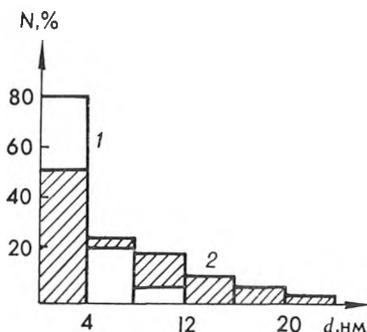


Рис. 2. Распределение пор по размерам для пленок никеля, облученных ионами аргона, в зависимости от дозы $5 \cdot 10^{15}$ (1) и $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² (2); $T_{\text{отж.}} = 870$ К

предпочтительнее всего будет развиваться процесс порообразования. На первом месте следует поставить поверхность уже имеющихся в образце субмикроскопических пор и микротрещин, так как именно они наиболее мощные стоки для вакансий. За ними в порядке уменьшения соответствующей поверхностной энергии следуют межзеренные ($\sim 10^{-4}$ Дж/м²), затем малоугловые (10^{-6} — 10^{-7} Дж/м²) и границы между двойниковыми прослойками (10^{-7} Дж/м²). При этом зарождение пор происходит на границе зерен, расположенных перпендикулярно к направлению действия растягивающих напряжений, появляющихся вследствие реакции нижележащих слоев на расширение ионно-имплантированного слоя. Подобная картина описана и в работе [5].

Изучение температурной зависимости изменения суммарного объема пор, отнесенной к единице объема материала ($\Delta V/V$), указывает на наличие максимума набухания при температуре отжига 770—870 К, что соответствует 0,4—0,5 $T_{пл}$. Анализ распределения пор по размерам в зависимости от дозы облучения и температуры постимплантационного отжига позволяет прийти к выводу, что рост пор происходит в результате их коалесценции (рис. 2). Характер гистограмм распределения пор по размерам дает также основание предположить, что в облученном ионами аргона никеле существуют два типа пор: газозаполненные и вакансионные.

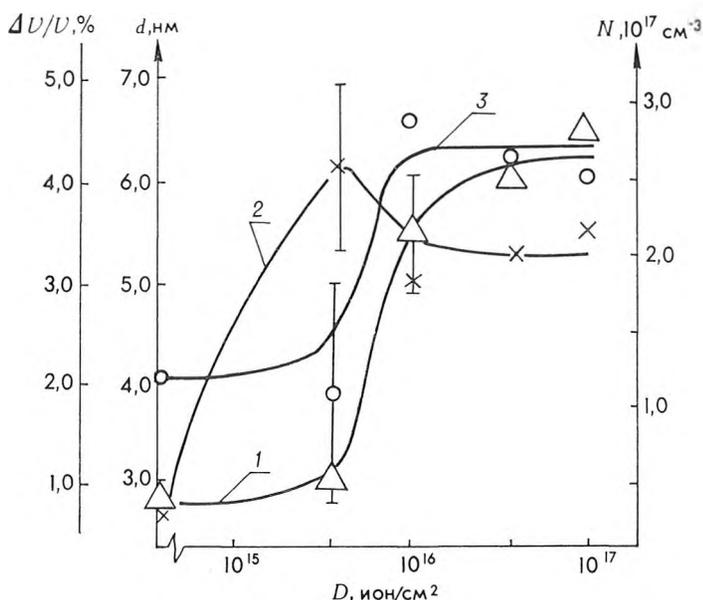


Рис. 3. Зависимости $\Delta V/V$ (1), \bar{N} (2) и \bar{d} (3) при $T_{отж.} = 870$ К для пленок никеля, облученных ионами аргона

Обобщая экспериментальные данные по использованию эволюции радиационных дефектов в никеле, подвергнутом облучению ионами аргона, можно представить основные виды повреждений структуры, включающих суммарный объем (ΔV), концентрацию (\bar{N}) и средний размер (\bar{d}) пор в виде дозовых зависимостей (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что $\Delta V/V$, \bar{N} и \bar{d} с ростом дозы повышаются, выходя на насыщение. При этом дозовая зависимость концентрации пор \bar{N} проходит через максимум.

Выявленный характер зависимостей \bar{N} и \bar{d} от дозы облучения связан с замедлением процесса зародышеобразования и превалированием процесса роста пор.

Ход кривой $\Delta V/V$ от дозы облучения обусловлен, во-первых, характером зависимости концентрации и среднего размера пор от дозы облу-

чения (см. рис. 3); во-вторых, может быть связан с выделением примесных атомов внедрения, эффективно подавляющих процесс порообразования. Из данных РОР [6] следует, что слоевая концентрация углерода возрастает почти в три раза ($25,5 \cdot 10^{16}$ ат/см² — доза 10^{17} ион/см²) по сравнению с исходной ($6,9 \cdot 10^{16}$ ат/см²). Следует отметить, что при облучении пленок Ni ионами Ag⁺ дозами более $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² наряду с ГЦК-решеткой никеля наблюдается появление ГПУ-фазы, дифракционные характеристики которой совпадают с соединением Ni₃C. При этом не исключено, что выделения Ni₃C могут формироваться вокруг пор, которые являются стоками для точечных дефектов и примесных атомов. Аналогичная картина образования сегрегаций углерода вокруг пор наблюдалась в работе [7], где отмечено, что выделения такого рода представляют собой не графит, а цементит Fe₃C.

Список литературы

1. Кирсанов В. В., Суворов А. Л., Трушин Ю. В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М., 1985.
2. Ибрагимов Ш. Ш., Кирсанов В. В., Пятилетов Ю. С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. М., 1985.
3. Палатник Л. С., Черемской П. Г., Фукс М. Я. Поры в пленках. М., 1982.
4. Гегузин Я. Е. Микроскопические дефекты в металлах. М., 1962.
5. Любов Б. Я., Соловьев В. А. // ФТТ. 1967. Т. 9. С. 338.
6. Гольцев В. П., Комаров Ф. Ф., Гецц Г., Глазер Э., Ходасевич В. В., Драко В. М., Новоселова Г. А., Углов В. В. // Тез. докл. XIV Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1984. С. 141.
7. Takahashi H., Takeyama T., Nakahigashi S., Terasawa M. // Journ. Nucl. Mater. 1981. V. 98. P. 227.

Поступила в редакцию 09.02.87.

УДК 681.325.63.35:512.93

Н. Н. ТАРАСЕВИЧ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАЖОРИТАРНОЙ ФУНКЦИИ И МАЖОРИТАРНОГО ЭЛЕМЕНТА

Мажоритарное резервирование, при котором к выходам n параллельно работающих идентичных систем подключается элемент, реализующий мажоритарную функцию (МФ), является эффективным методом повышения надежности систем различного назначения. МФ относится к классу пороговых функций и в общем случае ее выражение имеет вид:

$$F_M(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n a_i x_i \geq h, \\ 0, & \sum_{i=1}^n a_i x_i < h, \end{cases} \quad (1)$$

где x_i — i -й аргумент функции (0 или 1 для $i = \overline{1, n}$); a_i — весовой коэффициент i -го аргумента; n — число аргументов; h — порог. Для МФ обычно полагают, что n нечетно, а порог $h = \frac{n+1}{2}$ [1] или, иначе, $F_M = 1$ и $F_M = 0$ на тех наборах, где большинство аргументов равно 1 и 0 соответственно. Для трехканальной мажоритарно резервированной системы с $n=3$, $h=2$ МФ имеет вид (в предположении, что все $a_i=1$):

$$F_M(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3. \quad (2)$$

На рисунке показана мажоритарно резервированная система, содержащая три одинаковых блока (1, 2, 3), выходы из которых подключены к соответствующим входам мажоритарного элемента (МЭ). Из таблицы,