

Авторы благодарят Ж.И. Алфёрова за поддержку работ по РОС-лазерам и Г.М. Гусинского за проведение глубокой имплантации на циклотроне ФТИ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алфёров Ж.И., Кижаяев К.Ю., Кучинский В.И., Куксенков Д.В., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 9. С. 513-517.
- [2] Кижаяев К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Никитин С.А., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 3. С. 267-273.
- [3] Гурьев А.И., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Никитин С.А., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 12. С. 1082-1088.
- [4] Ogita S., Yano M., Ishikawa H., Iwai H. // Electr. Lett. 1987. V. 23. N 8. P. 393-394.
- [5] Барышев В.И., Голикова Е.Г., Дуряев В.П., Кучинский В.И., Кижаяев К.Ю., Куксенков Д.В., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 11. С. 2196-2198.
- [6] Sakai K., Utaoka K., Akiba S., Matsuhashi Y. // IEEE J. of Quant. Electr. 1982. V. QE-18. N 8. P. 1272-1278.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
5 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

05.3; 10.11

НЕТЕПЛОВЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ЭФФЕКТЫ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СПЛАВОВ УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

С.Н. Б о р о д и н, Ю.Е. К р е й н д е л ь,
Г.А. М е с я ц, В.В. О в ч и н н и к о в,
В.А. Ш а б а ш о в

Известно [1, 2], что ионная бомбардировка приводит к изменению физических свойств приповерхностных слоев металлических сплавов. При этом глубина модифицированной зоны во многих случаях существенно превышает пробеги бомбардирующих частиц. Передача энергии ионного воздействия в модифицируемом слое при типичных для

сплавов дозах облучения должна осуществляться с участием подавляющей части атомов этого слоя. Однако до настоящего времени не обнаружено протекания каких-либо глобальных перестроек кристаллической решетки под воздействием ионной бомбардировки на глубине, многократно превышающей пробеги ионов. Имеются лишь данные об изменении дислокационной структуры исходной матрицы [2].

В большинстве работ по ионной модификации объектами воздействия являлись либо химически чистые вещества, либо конструкционные материалы. В первом случае атомы неразличимы и соответственно, картина возможных атомных перестроек и структурных превращений достаточно бедна. Во втором, напротив, в силу сложности состава и многофазности изучаемых систем затруднено выделение роли различных факторов ионного воздействия. В связи с этим ряд эффектов, имеющих место при ионной бомбардировке, может быть более отчетливо выявлен при использовании достаточно простых модельных материалов с сильной зависимостью свойств от структуры.

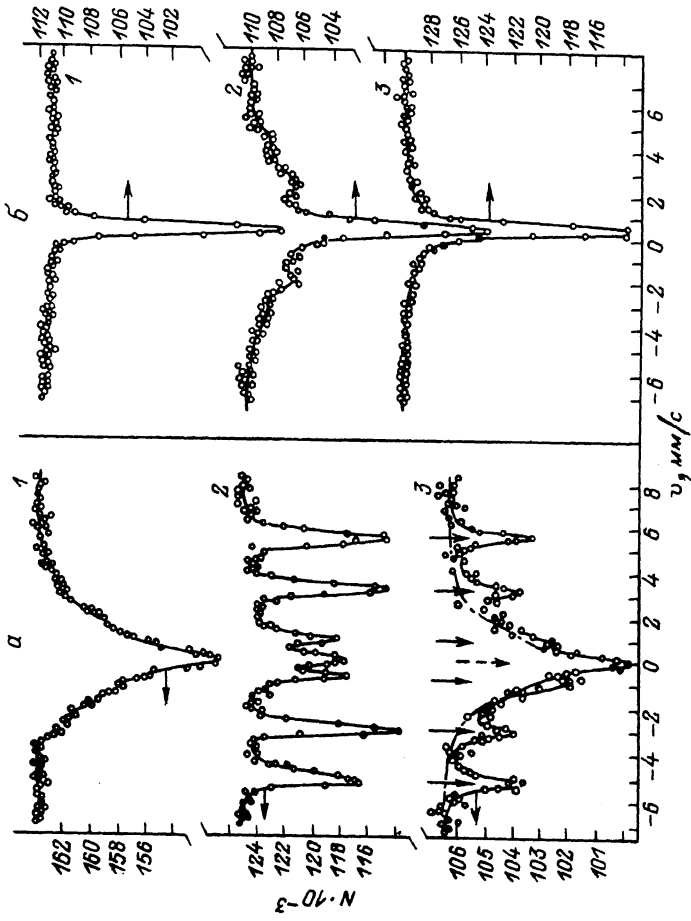
В работе исследовалось воздействие пучка ионов азота с энергией $E = 20$ кэВ и плотностью тока $j = 50$ мкА/см² в вакууме ($P = 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) на сплав $Fe + 30,5$ ат.% Ni , имеющий после обработки холодом (-196 °С) структуру ОЦК α -мартенсита с небольшим количеством $\sim 5\%$ остаточной ГЦК γ -фазы, а также на деформационно-разупорядоченный прокаткой при комнатной температуре упорядочивающийся по типу A_5B_3 сплав $Fe + 35$ ат.% Ni . Расчетная величина плотности мощности ионного пучка $P_s = jE/e$ (~ 1 Вт/см²) совпадала с ее оценкой из измерений скорости нагрева изолированного массивного медного цилиндра с учетом достаточно малых поправок на излучение. Длительность воздействия $\tau \approx 2$ с подбиралась таким образом, чтобы предельный нагрев ΔT образцов даже при полном отсутствии отвода тепла как теплопроводностью, так и излучением не превышал 200 К. Это соответствовало дозе $D \approx 6 \cdot 10^{14}$ см⁻², что значительно меньше типичных доз $\sim (1-5) \times 10^{17}$ см⁻², используемых при имплантации в металлы. В условиях эксперимента фольги из указанных материалов толщиной 30 мкм контактировали с поверхностью дюралюминиевого стопа, что обеспечивало достаточно интенсивный теплоотвод. Для контроля предельной величины нагрева облучавшихся образцов на них помещались мелкие (толщиной 30 мкм) частички сплава ПОС-61, имеющего температуру плавления 190 °С. Оплавление этих частичек в результате облучения не наблюдалось.

Источником ионов азота служил электронно-ионный источник на основе тлеющего отражательного разряда с полым катодом [3], работающий в режиме генерации ионного пучка. Исследование сплавов осуществлялось методами ядерного гамма-резонанса и рентгено-структурного анализа на установках ЯГРС-4 и ДРОН-3.

¹ Упорядоченная структура 3-го ранга, получающаяся из В2 структуры в результате выделения дополнительных подрешеток с разной заселенностью.

а) Мессбауэровские спектры сплава Fe + 35 ат. % Al: 1 - ГЦК γ -фаза, полученная термическим отжигом (900 °С, 1 ч); 2 - обработка холодом при -196 °С (ОЦК α -мартенсит и остаточная ГЦК γ -фаза); 3 - облученный образец (частичный не-тепловой обратный ОЦК \rightarrow ГЦК переход).

б) Мессбауэровские спектры сплава Fe + 35 ат. % Al: 1 - упорядоченная фаза Fe₅Al₃ после отжига при 650 °С, 6 ч; 2 - деформационно-разупорядоченное состояние; 3 - облученный образец (упорядоченное по типу Fe₅Al₃ состояние). Источник ⁵⁷Co в Сг.



На основании результатов анализа мессбауэровских спектров (см. рисунок) и данных рентгеноструктурных исследований установлено, что при облучении исследуемых материалов указанной малой дозой и при отсутствии разогрева, достаточного для протекания термических превращений, происходит существенная перестройка их кристаллической и магнитной структуры. Так, около 60% объема образца сплава $Fe + 30,5 \text{ ат.}\% Ni$ претерпевает обратное $\alpha \rightarrow \gamma$ (ОЦК \rightarrow ГЦК) превращение, которое при нагреве начинается лишь при 500°C и заканчивается при 650°C . Следует подчеркнуть, что даже в пересчете на превращенный объем образца подведенной энергии недостаточно для достижения этим объемом температуры начала термического перехода. Сплав $Fe + 35 \text{ ат.}\% Al$ при облучении в тех же условиях за $\tau \approx 2$ с переходит из деформационно-разупорядоченного в упорядоченное по типу В2 состояние. В этом сплаве превращение завершается на 100% по всей глубине образца, что полностью исключает из числа возможных причин превращения неоднородность поля температур по глубине образца (при усредненной оценке без учета теплоотвода $\Delta T \approx 200 \text{ K}$). Помещение деформационно-разупорядоченного сплава в масляную ванну с температурой нагрева 220°C на несколько десятков секунд не вызывает его превращения в упорядоченное состояние, что однозначно свидетельствует о нетепловой природе индуцируемого ионным облучением фазового перехода.

Было установлено, что существует минимальное значение плотности ионного тока, вызывающее обнаруженные превращения. Так, например, при уменьшении плотности ионного тока до $j = 20 \text{ мкА/см}^2$ описанные превращения не происходят даже при достаточно длительном облучении (до $D = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$).

Структурные перестройки приводят к изменению магнитных свойств исследованных сплавов. Сплав $Fe_{65}Al_{35}$ вследствие уменьшения числа положительных обменных связей $Fe-Fe$ при ионном облучении переходит из ферро- в парамагнитное состояние. Ферромагнитные свойства железо-никелевого сплава при $\alpha \rightarrow \gamma$ переходе значительно ослабляются ($T_c^\alpha \approx 500^\circ\text{C}$, $T_c^\gamma = 68^\circ\text{C}$).

Обнаруженные переходы, не являющиеся результатом прямого радиационного или теплового воздействия, могут быть связаны с возникновением ударных волн при эволюции каскадов атомных столкновений [3, 4]. Согласно [3], ударные волны распадаются на неупругие и нелинейные упругие уединенные волны. Можно предположить, что солитоноподобные волны с высокой запасенной плотностью энергии в определенных условиях способны играть роль инициирующего фактора, вызывающего превращение всего объема кристалла. При экзотермическом характере процесса уединенные волны могут стать незатухающими, а индуцированные ионной бомбардировкой или другим подобным импульсным воздействием фазовые превращения – самораспространяющимися.

- [1] Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. Поута и др.; Пер. с англ. Н.К. Мышкина и др. / Под ред. А.А. Углова. М.: Машиностроение. 1987. С. 424.
- [2] Д и д е н к о А.Н., Л и г а ч е в А.Е., К у р а к и н И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Атомиздат. 1987. 184 с.
- [3] К р е й н д е л ь Ю.Е. В сб.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск: Наука, 1976.
- [4] Ж у к о в В.П., Д е м и д о в А.В. // Атомная энергия. 1985. Т. 59. В. 1. С. 29-33.
- [5] Ж у к о в В.П., Б о л д и н А.А. // Атомная энергия. 1987. Т. 63. В. 6. С. 375-379.

Поступило в Редакцию
22 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

06.2

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ МЕТОД ПЕРЕНОСА
НА ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ ПЛАСТИНУ РИСУНКА
ТРАФАРЕТНОГО ШАБЛОНА С ЭЛЕМЕНТАМИ
РАЗМЕРОМ ~ 0.1 МКМ

К.А. В а л и е в, Л.В. В е л и к о в,
Р.Х. М а х м у т о в, С.Н. С и д о р у к,
В.С. Я к у н и н

При разработке электронных сверхвысокочастотных приборов геометрические размеры элементов структуры приборов вплотную приблизились к значению 0.1 мкм [1]. В литографии подобная разрешающая способность достигается с помощью электронно-лучевых систем с нанометровым диаметром пучка, например при формировании рисунка на тонких мембранах [2]. Эти же системы могут использоваться и для изготовления образцов приборов с размерами элементов ≤ 0.1 мкм путем экспонирования пленок резистов непосредственно на полупроводниковой пластине [3]. Однако промышленная технология изготовления приборов требует разработки методов параллельного переноса изображения шаблонов с размерами элементов ≤ 0.1 мкм. Таким методом может быть метод электронно-лучевого переноса в широких пучках рисунка трафаретного шаблона на полупроводниковую пластину.