

существование данной моды связано с двухфононными процессами с участием продольного и поперечного акустического фононов (см. дисперсионные кривые для  $\text{InP}$  в [12]) и отражает наличие особенности в плотности фононных состояний.

В заключение приведем (см. таблицу) значения диэлектрической проницаемости и проводимости фосфида индия на частоте  $10 \text{ см}^{-1}$  для нескольких температур.

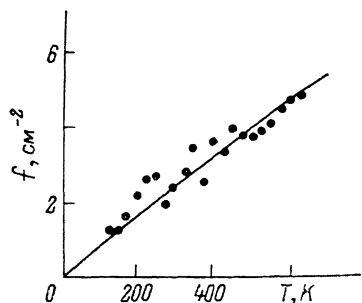


Рис. 3. Температурная зависимость силы осциллятора моды с собственной частотой около  $29 \text{ см}^{-1}$ , наблюдаемой в субмиллиметровых спектрах фосфида индия.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Henry R. L., Swiggard E. M. // J. Elektron. Mater. 1978. V. 7. N 5. P. 647—657.
- [2] Волков А. А., Гончаров Ю. Г., Козлов Г. В., Лебедев С. П., Мальцев В. И. // Электронная техника, сер. 1. 1984. № 11. С. 38—41.
- [3] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973.
- [4] Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников. Киев, 1987.
- [5] Neidert R. E., Binari S. C., Weng T. // Electron. lett. 1982. V. 18. N 23. P. 987—988.
- [6] Palik Ed. D. Handbook of Optical Constants of Solids. N. Y., Academic Press, 1985. P. 503—516.
- [7] Пихтин А. Н., Яськов А. Д. // ФТП. 1975. Т. 12. № 6. С. 1047—1053.
- [8] Seeger K. // Appl. Phys. lett. 1989. V. 54. N 13. P. 1268—1269.
- [9] Мосс Т. Оптические свойства полупроводников. М., 1961.
- [10] Turner W. J., Reese W. E., Pettit G. D. // Phys. Rev. 1964. V. 136. N 5A. P. A1467—A1470.
- [11] Stolen R. H. // Phys. Rev. B. 1975. V. 11. N 11. P. 767—770.
- [12] Borchers P. H., Alfrey G. F., Saunderson D. H., Woods A. D. B. // J. Phys. C. 1975. V. 8. N 13. P. 2022—2030.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
1 ноября 1989 г.

УДК 669.017 : 539.89

© Физика твердого тела, том. 32, № 5, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 5, 1990

## ТОРМОЗЯЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ В АНСАМБЛЯХ МАЛЫХ ЧАСТИЦ

Л. И. Трусов, В. И. Новиков, В. П. Филоненко, В. А. Сидоров,  
Л. Г. Хвостанцев, Р. В. Салия, О. М. Гвоздецкий

Релаксационные процессы (сплаво- и фазообразования, рекристаллизация и т. п.) в смешевых системах малых частиц (МЧ) с размером частиц  $0.1 \text{ мкм}$  протекают при существенно более низких температурах ( $0.1—0.2 T_{п.л.}$ ), чем в системах обычной дисперсности ( $\sim 10 \text{ мкм}$ ) [1—3]. Экспериментально показано [3], что ведущим процессом, определяющим релаксационно-диффузионную активность в системах МЧ, является собирательная рекристаллизация. Доминирующая роль рекристаллизации обусловливается кинетическим эффектом образования неравновесных вакансий мигрирующими границами. Из общих представлений очевидно, что наложение высокого гидростатического давления должно увеличивать работу,

затрачиваемую дисперсной системой на образование избыточных вакансий [1] в процессе рекристаллизации. Поэтому исследование влияния гидростатического давления на рекристаллизацию и сопровождающие ее релаксационные процессы в системах МЧ может прояснить механизм массопереноса в таких системах. Эксперименты проводились в камере высокого давления типа «Торонд» [5], которую использовали для получения давления 5 ГПа при одновременном нагреве.

Гидростатические условия создавали путем помещения пористого (60 %) образца в хлористый натрий, широко используемый для передачи

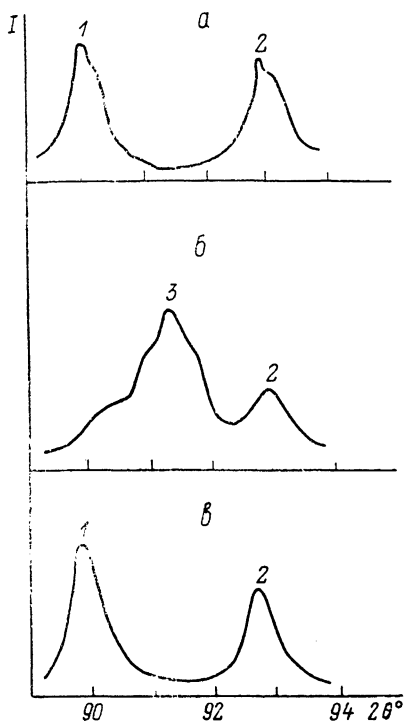


Рис. 1. Дифракционные пики (220)  $\text{CoK}_x$  и их сплавов после различных условий отжига.

1 — Ni, 2 — Cu, 3 — твердый раствор Cu—Ni.  
а — исходное состояние, 0.1 МПа, 20 °С;  
б — 0.1 МПа, 500 °С,  $\tau=10$  мин; в — 5 ГПа, 500 °С, 10 мин.

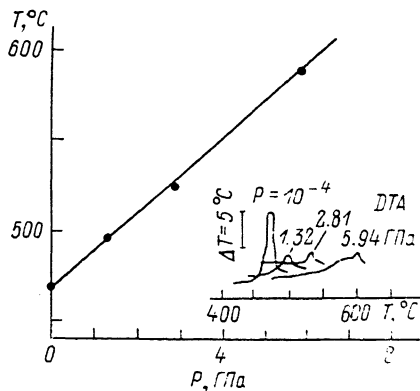


Рис. 2. Зависимость температуры кристаллизации аморфного порошкового сплава  $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$  от давления.

давления на исследуемый объект в технике высоких давлений [6]. Нагрев образца осуществляли пропусканием тока через цилиндрический металлический нагреватель. Образец теплоизолировали от холодных пуансонов слоем хлористого натрия толщиной 8 мм с каждой стороны. Длина образца (5 мм) значительно меньше длины нагревателя (25 мм). Это позволяет создать изотермические условия при нагреве образца.

Микроструктурные исследования проводили на электронном микроскопе типа SCAN-180. В таблице представлены результаты экспериментальных исследований процесса рекристаллизации МЧ никеля (20, 70 нм) в условиях гидростатического давления (5 ГПа) в интервале температур 600—900 °С.

Установлено, что при 600—900 °С без воздействия давления МЧ Ni укрупняются за несколько минут в 10—40 раз, а под давлением практически не укрупняются. Это можно объяснить, учитывая эффект генерации избыточных вакансий мигрирующими при рекристаллизации границами [1, 2]. Если каким-либо образом затормозить процесс генерации

Средний размер МЧ Ni при различных режимах компактирования ( $T=620$  °С,  $\tau=3$  мин)

Условие	Размер частиц, нм	
	исходный	после нагрева
Давление 5 ГПа	70	70
	20	20
После снятия давления	70	500
	20	800

вакансий, то соответственно будет замедляться и связанная с этим процессом миграция границ. Принцип торможения миграции границ внешним давлением находится в полном соответствии с известным принципом Лешателье.

На рис. 1 представлены результаты исследования процесса низкотемпературного растворобразования в смесевой системе МЧ (70 нм) Cu—Ni (50 : 50 ат. %) при нормальном (0.1 МПа) и при высоком (5 ГПа) гидростатическом давлении. Данные показывают, что воздействие высокого гидростатического давления полностью подавляет процесс низкотемпературного растворобразования. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что в смесевой системе МЧ Cu—Ni при высоком давлении при нагреве (до 500 °С) сохраняется исходная дисперсность МЧ ~70 нм. При атмосферном давлении протекает интенсивная рекристаллизация в системе МЧ Cu—Ni, приводящая к увеличению размеров зерен в 3 раза (0.2 мкм). Таким образом, эти результаты подтверждают рекристаллизационную модель низкотемпературной диффузионной активности в ансамблях МЧ [2] и решающую роль вакансий в этом процессе. Поскольку высокое гидростатическое давление влияет на процессы массопереноса, можно ожидать торможения процесса кристаллизации в порошках аморфного сплава  $Fe_{70}Ni_{10}P_{13}C_7$  со средним размером частиц  $\leq 0.5$  мкм.

Температуру кристаллизации аморфного сплава определяли по экзотермическому эффекту методом дифференциального термического анализа. Фазовый состав сплава до и после кристаллизации определялся методом мессбауэровской спектроскопии. Экспериментальные данные представлены на рис. 2.

Наблюдается линейная зависимость увеличения температуры кристаллизации аморфного сплава  $Fe_{70}Ni_{10}P_{13}C_7$  от величины приложенного гидростатического давления. Фазовый анализ показал, что в результате кристаллизации образуются фазы  $Fe_3C$  и  $(FeNi)_3P$ .

Напротив, при интенсивной сдвиговой деформации порошки этого же сплава кристаллизуются при комнатной температуре [7]. Таким образом, применение высокого давления в системах МЧ позволяет активно управлять процессами стабилизации дисперсной структуры и изменять фазовый состав.

#### Список литературы

- [1] Новиков В. И., Трусов Л. И., Лаповок В. Н., Гелейшвили Т. П. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 12. С. 3696—3698.
- [2] Трусов Л. И., Грязнов В. Г., Новиков В. И., Гелейшвили Т. П. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 9. С. 2726—2729.
- [3] Лаповок В. Н., Новиков В. И., Свирида С. В., Семенихин А. Н., Трусов Л. И. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 6. С. 1846—1848.
- [4] Герузин Я. Е. Диффузионная зона М.: Наука, 1979. 343 с.
- [5] Khvostantsev L. G., Vereshagin L. F., Novikov A. P. // Temp-High Pressur. 1977. V. 9. N 3. P. 637—640.
- [6] Стронг Г. // Современная техника сверхвысоких давлений. М.: Мир, 1964. С. 163—170.
- [7] Трусов Л. И., Салия Р. В., Новиков В. И., Лопухов Ю. А., Релушко П. Ф. // ПМ. 1988. № 6. С. 19—22.

Ставропольский политехнический институт  
Пятигорский филиал  
Пятигорск

Поступило в Редакцию  
24 апреля 1989 г.  
В окончательной редакции  
3 ноября 1989 г.