

УДК 539.893.539.376

©1993

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В Ge И Si В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО 12 ГПА И $P$ - $T$ - $\gamma$ ДИАГРАММЫ ЭТИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*М.М.Александрова, В.Д.Бланк, С.Г.Буга*

Методами рентгенофазового анализа, микрокалориметрии, оптических и электрических измерений исследовано влияние сдвиговой деформации под давлением до 12 ГПа на параметры фазовых переходов в Ge и Si. Установлено, что сдвиг меняет не только условия равновесия фаз, но и механизм фазовых превращений.

Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования кристаллической структуры ковалентных полупроводников Ge и Si в интервале давлений до 10.0-12.5 ГПа [1-18] позволили проследить закономерности перехода от исходной структуры типа алмаза (I) к металлическим модификациям со структурой типа  $\beta$ -Sn(II) при давлениях до  $\sim 12$  ГПа [1], затем к фазам с примитивной гексагональной структурой [2] и структурам с плотнейшими упаковками [8]. Особенности превращений полупроводник(I)-металл(II) в Ge и Si, которые сопровождаются скачком объема  $\sim 20\%$  и переходом от тетраэдрической к шестерной координации, являются большой гистерезис и чувствительность его к сдвиговым напряжениям. По данным разных авторов, давление превращения I  $\rightarrow$  II в Ge может изменяться от 6.7 до 10.6 ГПа [7], а в Si — от 8.8 [8] до 11.2 ГПа [12] в зависимости от условий эксперимента. При снижении давления металлические модификации Ge(Si)II обычно превращаются в полупроводниковые метастабильные фазы Ge(Si)III, плотность которых на  $\sim 10\%$  больше, чем у фаз Ge(Si)I. Структура метастабильных фаз установлена: GeIII имеет простую тетрагональную решетку,  $z = 12$ ; SiIII характеризуется кубической объемно-центрированной решеткой,  $z = 16$  [9]. Эти структуры иллюстрируют два различных способа достижения более высокой плотности по отношению к структуре типа алмаза без изменения координационного числа, но с некоторым искажением связей.

Имеются теоретические предсказания и экспериментальные подтверждения возможности существования и других метастабильных фаз в Ge и Si. С помощью закалки под давлением 11-13 ГПа до температуры сухого льда выделена фаза GeIV (аналог SiIII) и указаны  $P$ ,  $T$  области образования фаз GeIII и GeIV [5]. Путем очень быстрого сброса давления при  $T = 300$  К из металлического состояния SiII выделены две новые метастабильные фазы с тетрагональной структурой, одна из которых

по-видимому, является аналогом GeIII [8]. В работе [5] сделано предположение о возможной области стабильности фазы GeIII при  $T = 300$  К и  $P = 2.5 \div 9.0$  ГПа; для SiIII подобные данные отсутствуют.

Изучение Ge и Si в условиях деформации сдвига под давлением показало, что после обработки при  $T = 300$  К,  $P = 10$  ГПа,  $\varphi = 360^\circ$  и времени выдержки  $\tau = 3$  ч получен практически 100%-ный выход метастабильных фаз Ge(Si)III [14]. В работе [15] после деформации сдвига ( $\varphi = 36^\circ$ ) при среднем давлении 3 ГПа наблюдалась фаза SiIII, на основании чего сделано предположение о возможности прямого перехода I  $\rightarrow$  III. Однако примененный метод оценки давления по формуле  $P_{cp} = F/S$  дает весьма неопределенное значение, так как  $P_{max}$  в центре наковален может отличаться примерно в два раза.

В настоящей работе изучалась возможность реализации прямых превращений I  $\rightarrow$  III  $\rightarrow$  II в Ge и Si в условиях сдвиговой деформации и ее влияние на параметры фазовых переходов.

## 1. Методика эксперимента

В экспериментах использовались камеры высокого давления (в том числе с наковальнями из природных алмазов) для деформации сдвигом твердых тел, описанные в работах [19,20]. Исследование фазовых переходов в Ge и Si проводилось методами рентгенофазового анализа, оптических и электрических измерений,<sup>1</sup> а также сканирующей микрокалориметрии.

Градуировка оптически непрозрачных наковален по давлению осуществлялась двумя способами: как по изменению электросопротивления реперных веществ (Bi, PbSe, ZnS и т.д.), так и по люминесценции рубина. В последнем случае нижняя наковальня из твердого сплава заменялась природным монокристаллом алмаза, а к порошку Ge(Si) в качестве датчика давления добавлялся в соотношении 1 : 30  $\div$  50 рубин  $Al_2O_3 + 0.05\%Cr^{3+}$  размером частиц 2–3 мкм. Далее при фиксированных нагрузках измерялось распределение давления по образцу, что позволило достаточно надежно определить величину давления. Следует отметить, что калибровочные кривые  $P = f(F)$  (где  $F$  — нагрузка), полученные оптическим и электрическим методами, хорошо согласуются между собой, причем величина мультипликации достигает  $P_{max}/P_{cp} = 2 \div 2.5$  и имеет максимальное значение при относительно малых нагрузках.

При измерении электросопротивления образцы Ge(Si) размером  $5 \times 10^{-4}$  м помещались в центре таблетки из опрессованной плотной бумаги. На наковальни укладывали тонкую медную фольгу для улучшения контакта. Для определения типа проводимости образца использовался метод нагрева. Для этого на нижнюю наковальню помещали нихромовый нагреватель; температура контролировалась медь-константановой термопарой. Измерения проводились по потенциометрической схеме, токовыми являлись наковальни. В контрольных экспериментах по предупреждению короткого замыкания между наковальнями снимался сигнал с медного образца, который сравнивался с величиной сигнала от исследуемых Ge или Si. Как правило, величина сигнала от Ge и Si была

<sup>1</sup> Авторы выражают искреннюю благодарность И.А. Баранову за помощь в калибровке камеры высокого давления оптическим методом и В.Г. Данилову за помощь в проведении электрических измерений.

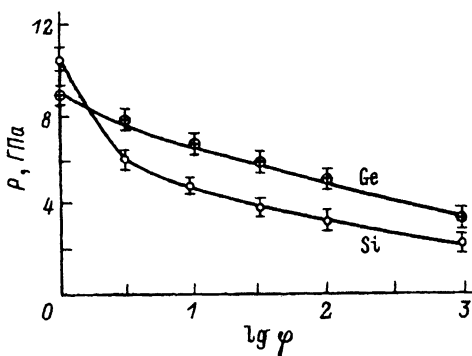


Рис. 1. Условия получения Ge(Si)III при одновременном воздействии "давление-сдвиг".

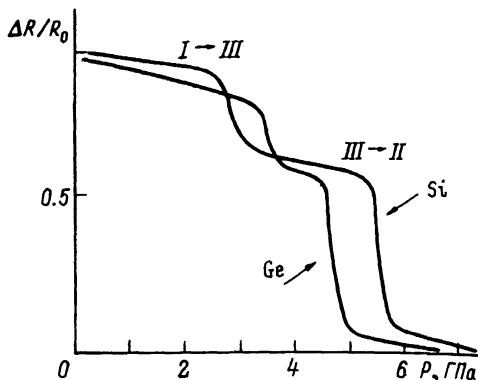


Рис. 2. Изменение электросопротивления ( $\Delta R/R_0$ ) под давлением при деформации сдвига, переход I → III и III → II для Ge и Si.

на 1-2 порядка выше, чем от Cu. Образцы, сигнал от которых в ходе эксперимента падал до величины сигнала от Cu, отбраковывались. После каждого эксперимента проводился оптический контроль таблетки с образцом под микроскопом.

Исследование фазового перехода типа "полупроводник-металл" в Ge(Si)I → II оптическим методом проводилось в камере с алмазными наковальнями диаметром 0.6 мм. Давление определялось по изменению длины волны  $R_I$  — линии люминесценции рубина,  $dl/dp \sim 0.0365 \text{ нм/кбар}$  [21]. Люминесценция рубина возбуждалась He-Cd лазером ( $\lambda = 441.6 \text{ нм}$ ). Эксперимент проводился на установке, собранной на базе автоматизированного спектрального комплекса КСВУ-23. Переход легко фиксировался визуально и с помощью телевидеоаппаратуры. Поскольку в видимой части спектра коэффициент отражения полупроводника меньше, чем у металла, образование металлической фазы высокого давления наблюдалось в виде белого пятна на фоне темной полупроводниковой фазы. При сжатии таблетки исследуемого вещества образующаяся фаза высокого давления появляется в центре наковален. При дальнейшем росте нагрузки увеличивается размер области, занимаемой металлом. В экспериментах снималось распределение давления по диаметру наковален и определялась его величина на границе перехода "полупроводник-металл" до и после деформации сдвига при фиксированной нагрузке. Порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$  с размером частиц 2-3 мкм осаждался на алмазную наковальню, через которую освещали таблетку исследуемого вещества и снимали спектр люминесценции рубина.

Рентгеновский анализ образцов осуществлялся на дифрактометре Н2G-4А и в камере РКУ-114.0 с использованием фильтрованного  $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Кинетику обратного превращения Ge(Si)III → I изучали с помощью дифференциального сканирующего микрокалориметра ДСМ-2М.

## 2. Результаты и их обсуждение

В условиях простого сжатия методом измерения электросопротивления фазовый переход "полупроводник-металл" был определен в Ge при

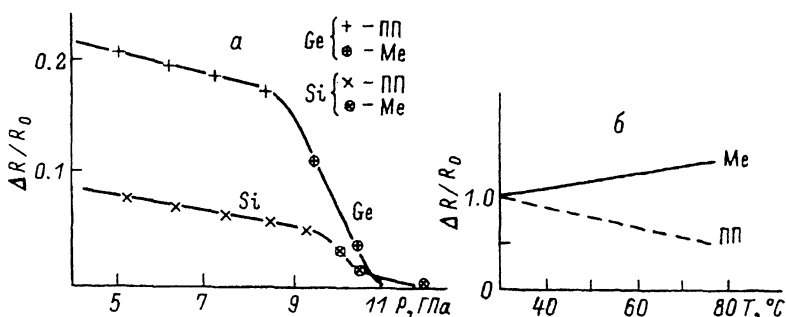


Рис. 3. Смена характера проводимости (а) и зависимость электросопротивления от температуры (б) для Ge и Si.

$P = 8.5 \pm 0.5$  ГПа и в Si при  $P = 10.5 \pm 1$  ГПа. При сжатии без гasketки в алмазных наковальнях давление на границе перехода „полупроводник-металл“, по данным оптических измерений, оказалось равным для Ge  $P = 7.1 \pm 0.3$  ГПа и для Si  $P = 8.2 \pm 0.3$  ГПа. Полученные результаты не противоречат известным литературным данным и еще раз подтверждают сильное влияние сдвиговых напряжений на фазовый переход I  $\rightarrow$  II („полупроводник-металл“). На основании рентгенографических исследований образцов, деформированных сдвигом под давлением, были получены данные об условиях возникновения касперовских фаз Ge(Si)III. Как видно из приведенных данных, давление получения Ge(Si)III с ростом угла сдвига быстро уменьшается и минимальное значение составляет при  $\varphi = 1000 \div 10\,000^\circ$  ( $\lg \varphi = 3 \div 4$ ) для Ge  $P = 3.1 \pm 0.3$  ГПа, а для Si  $P = 2.5 \pm 0.2$  ГПа (рис. 1). Это позволило предположить, что в условиях деформации идет прямой переход Ge(Si)I  $\rightarrow$  III, а не I  $\rightarrow$  II  $\rightarrow$  III, т.е. через металлическую фазу. При исследовании фазовых переходов методом электросопротивления в условиях постоянного сдвига ( $\nu = 0.14$  град/с) было обнаружено, что на зависимости  $\Delta R/R = f(P)$  для германия и кремния наблюдаются два скачка электросопротивления (рис. 2)

для Ge  $P_1 = 3.4 \pm 0.3$  ГПа,  $P_2 = 4.2 \pm 0.3$  ГПа,

для Si  $P_1 = 2.8 \pm 0.2$  ГПа,  $P_2 = 5.4 \pm 0.4$  ГПа.

Можно предположить, что первый скачок обусловлен переходом I  $\rightarrow$  III, а второй III  $\rightarrow$  II, т.е. мы наблюдаем смену механизма фазового перехода „полупроводник-металл“. Для подтверждения нашей гипотезы о смене механизма перехода была изучена зависимость электросопротивления образцов от температуры до и после деформации сдвига при постоянном давлении. Как показано на рис. 3, смена характера проводимости с полупроводниковой на металлическую наблюдалась для Ge при  $P = 4.5 \pm 0.5$  ГПа и для Si при  $P = 5.0 \pm 0.5$  ГПа после деформации сдвига ( $\varphi = 15^\circ$  и  $\nu = 1$  град/с) и нагреве до  $\tau = 100 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Результаты, полученные методом электросопротивления, удовлетворительно коррелируют с данными оптических измерений. На рис. 4 представлены типичные графики распределения давления в таблетках Ge в условиях одноосного сжатия до (а) и после сдвиговой деформации (б).

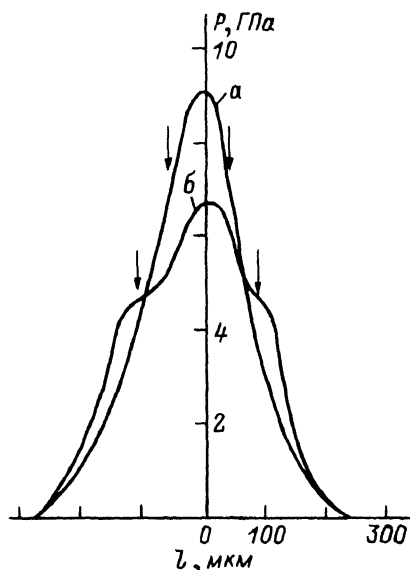


Рис. 4. Распределение давления в алмазной камере для Ge до (а) и после (б) деформации сдвига.

Стрелками указано положение межфазной границы.

Такое же распределение давления характерно и для Si. Стрелками указано положение границы „полупроводник-металл“ до и после сдвига. Давление перехода „полупроводник-металл“ в условиях одноосного сжатия оказалось равным  $P = 7.1 \pm 0.4$  ГПа для Ge и  $P = 8.2 \pm 0.3$  ГПа для Si, а после деформации сдвига  $P = 4.9 \pm 0.4$  ГПа для Ge и  $P = 5.45 \pm 0.4$  ГПа для Si. Отметим, что давление определялось по рубиновой шкале. Однако в этом случае, по данным работы [22], необходимо сделать поправку, так как датчик давления — рубин — находится в среде, имеющей отличные от рубина упругие характеристики, что должно сказываться на его показаниях в сравнении с фактическим давлением в окружающей рубин матрице.

Используя полученные в работе [23] результаты, можно оценить поправки для измеренных нами оптическим методом давлений фазовых переходов в Ge и Si. Величины  $K$  (модуль объемной сжимаемости) и  $\sigma$  (коэффициент Пуассона) были взяты из работы [24], а предел текучести  $\tau$  был вычислен по формуле

$$\tau = (3/8)^{1/2} \frac{1 - 2\sigma}{1 + \sigma} H\mu,$$

где  $H\mu$  — микротвердость Ge и Si [25]. Отсюда получим с учетом поправок давления фазовых переходов

$$P^{o.c} = 5.5 \pm 0.4 \text{ ГПа}, \quad P^{o.c+сд} = 3.9 \pm 0.4 \text{ ГПа для Ge},$$

$$P^{o.c} = 6.8 \pm 0.4 \text{ ГПа}, \quad P^{o.c+сд} = 4.8 \pm 0.4 \text{ ГПа для Si},$$

где о.с — одноосное сжатие, сд — сдвиг.

Давления фазовых переходов ( $P$ , ГПа) в Ge и Si при различных условиях эксперимента

Вещество	Переход I→III	Переход в металлическое состояние			Переход II→I + III	
	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	одноосное сжатие		одноосное сжатие	
			оптика	$\Delta R/R_0$	$\varphi = 0^\circ$	после предвар. деформ. $\varphi = 10^\circ$
Ge	$3.0 \pm 0.3$	$4.5 \pm 0.4$	$7.1 \pm 0.3$	$8.5 \pm 0.5$	$4.3 \pm 0.3$	$2.3 \pm 0.2$
Si	$2.7 \pm 0.2$	$5.2 \pm 0.4$	$8.2 \pm 0.3$	$10.5 \pm 1.0$	$4.7 \pm 0.3$	$2.7 \pm 0.2$

Следует отметить, что с учетом поправок величины давления фазовых переходов в Ge и Si в условиях одноосного сжатия кажутся несколько заниженными по сравнению с известными литературными данными. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что в условиях деформации сдвига в Ge и Si наблюдаются переходы I → III → II, т.е. наблюдается смена механизма фазового превращения по сравнению с гидростатикой (I → II). При этом давление перехода в металлическое состояние резко снижается и становится меньше, чем давление обратного перехода „металл-полупроводник“. Так, в гидростатике

$$\text{для Ge } P^{I \rightarrow II} = 10.6 \text{ ГПа, а } P^{II \rightarrow I+III} = 7.6 \text{ ГПа,}$$

$$\text{для Si } P^{I+II} = 11.2 \text{ ГПа, а } P^{II \rightarrow III} = 8.5 \text{ ГПа,}$$

откуда видно, что меняется не только механизм превращения, но и условия равновесия фаз. Если считать, что

$$P = \frac{P_{\text{пр}} + P_{\text{обр}}}{2}$$

близко к  $P_0$  (что, строго говоря, неверно), то, исходя из разницы в величине давления превращения при сдвиге и в гидростатических условиях, можно оценить величину упругой энергии, которая приводит к изменению равновесия между фазами.

Как следует из работ [23,26] только за счет одного члена  $(\sigma_{ij}^2/4\mu)V$  в уравнении состояния деформированного тела будет происходить снижение давления перехода

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + 4\pi R^2\lambda \quad [26],$$

где  $\Delta\Phi_1$  — гидростатическое условие,  $\Delta\Phi_2$  — чистый сдвиг,  $4\pi R^2\lambda$  — поверхностная энергия,

$$\Delta\Phi_2 = E_2 + Sw_1 dv + E_{ps} - \frac{\sigma_{ij}^2}{4\mu} V.$$

Влияние условий получения фазы Ge(Si)III на удельную теплоту превращения и температуру максимума тепловыделения

Вещество	Фаза Ge(Si)III, полученная закалкой $P = 9.5$ ГПа, $T = 900$ °C (Ge), $T = 1300$ °C (Si)		Фаза Ge(Si)III, полученная сдвигом $T = 300$ К, $P = 9$ ГПа, $\gamma = 5.5$	
	$\Delta H$ , кал/моль	$T_{\max}$ , К	$\Delta H$ , кал/моль	$T_{\max}$ , К
	Ge	$1550 \pm 240$	548	$750 \pm 80$
Si	$900 \pm 150$	498	$570 \pm 120$	528

Такая оценка дает величину упругой энергии

$$W_{\text{упр}}^{\text{Ge}} = 1100 \text{ кал/моль}, \quad W_{\text{упр}}^{\text{Si}} = 1400 \text{ кал/моль}.$$

Эти значения примерно на порядок превышают значения упругой энергии (140 кал/моль для Ge и 180 кал/моль для Si), которые можно получить исходя из величины предела текучести, определенной по данным микротвердости.

Расхождение между этими величинами объясняется по крайней мере двумя причинами. Во-первых, под давлением при пластической деформации будет происходить упрочнение и Ge, и Si. Величина упрочнения при сильной пластической деформации может достигать  $\sigma_{\psi}/\sigma_0 \simeq 5 \div 10$  [27]. Во-вторых, даже при относительно небольших деформациях (при дислокационном механизме упрочнения) в голове движущегося скопления дислокаций величина напряжений достигает предела прочности твердого тела, что значительно выше, чем  $\tau_{\text{ср}} = \gamma\mu$ .

Таким образом, упругая энергия деформации меняет условия равновесия фаз и, пользуясь только  $P$ - $T$  диаграммой состояния, трудно объяснить полученные экспериментальные данные. Для этого следует ввести третью координату —  $\gamma$  (сдвиг). Попробуем сделать расчет такой  $P$ - $T$ - $\gamma$  диаграммы для Ge и Si, используя известные литературные данные, а также экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе: во-первых, давление перехода  $P(\text{I} \rightarrow \text{III}) - \gamma = 1.0$  [ $\gamma = \varphi R(r/h)$ ], определенное по оптическим измерениям в алмазной камере; во-вторых, теплоты перехода фазы Ge(Si)III  $\rightarrow$  I (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что теплоты превращения для образцов, полученных сдвигом, меньше по сравнению с закаленными, а температура максимума перехода сдвинута вверх. Мы предполагаем, что отжига дефектов кристаллической решетки практически не происходит, поскольку  $T_{\text{перехода}} < 0.5 - 0.6 T_{\text{плавления}}$ . Это подтверждается рентгеновскими данными, так как линии на дифрактограммах до и после перехода Ge(Si)III  $\rightarrow$  I остаются уширенными. Приняв линейным изменение давления равновесия от температуры ( $T = 300$  К) и используя соотношение  $\vartheta \Delta H/P = \Delta V(1 - \Delta\beta_T T)$  [28], где  $\Delta\beta_T$  — разность коэффициентов объемного расширения фаз высокого и низкого давлений, получим (при  $\Delta\beta_T T \ll 1$ )

$$\Delta H^{\text{III} \rightarrow \text{I}} = \Delta H^0 + (P^{\text{III} \rightarrow \text{I}} - P^0) \Delta V.$$

В нашем случае имеет тепловые эффекты  $\text{III} \rightarrow \text{I}$  превращения при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$

$$\Delta H_1 = \Delta H^0 - P_1^0 \Delta V,$$

$$\Delta H_2 = \Delta H^0 - P_2^0 \Delta V.$$

Используя уравнение Клапейрона

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P_1 - P_2}{T_1 - T_2} = \frac{\Delta H^0}{T \Delta V},$$

найдем, что

$$P_1 = T_1 \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{(T_1 - T_2) \Delta V} - \frac{\Delta H_1}{\Delta V},$$

$$P_{298\text{K}} = P_1 - (T_1 - 298) \frac{dP}{dT} = 298 \frac{\Delta H_2 - \Delta H_1}{(T_1 - T_2) \Delta V} - \frac{\Delta H_1}{\Delta V}.$$

Подставляя значения  $\Delta V^{\text{III} \rightarrow \text{I}}$  для Ge и Si (1.37 и 1.15 см<sup>3</sup>/моль соответственно), получим, что давление равновесия при  $T = 298$  К и  $\gamma = 0$  составит (ГПа); для Ge — 8.4, для Si — 8.5. Исходя из того, что в любой тройной точке ( $\text{I} = \text{III} = \text{II}$ )

$$\Sigma \Delta V_{\text{I}=\text{II}=\text{III}} = 0, \quad \Sigma \Delta H_{\text{I}=\text{II}=\text{III}} = 0,$$

рассчитываем  $P$ - $T$  диаграммы для Ge и Si при  $\gamma = 0$ .

Координаты тройной точки ( $\text{I} = \text{II} = \text{III}$ ):

$$\text{для Ge } P_0 = 9.0 \text{ ГПа, } T_0 = 325 \text{ К,}$$

$$\text{для Si } P_0 = 10.6 \text{ ГПа, } T_0 = 400 \text{ К.}$$

Давление  $P_0(\text{III} \rightarrow \text{II})$  при  $T = 298$  К:

$$\text{для Ge } P = 9.3 \text{ ГПа,}$$

$$\text{для Si } P = 12.3 \text{ ГПа.}$$

На рис. 5 представлены  $T$ - $P$ - $\gamma(\tau)$  диаграммы для Ge. Нелинейное поведение  $P$  от  $\gamma(\tau)$  обусловлено квадратичной зависимостью в соответствии с [23]. Такой вид диаграмм состояния позволяет объяснить практически все экспериментальные результаты, полученные в этой и других работах. Штрихом указаны линии кинетического гистерезиса  $\text{I} \rightleftharpoons \text{III}$  и  $\text{I} \rightleftharpoons \text{II}$ . Смена механизма превращения  $\text{I} \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{II}$  в условиях сдвига связана с тем, что практически отсутствует кинетический гистерезис превращения, который всегда наблюдается в твердых телах при гидростатическом давлении ( $T < 0.5T_{\text{пл}}$ ). Становится понятным результат работы [8], когда в гидростатике при  $P = 10.8 \div 8.5$  ГПа обратный переход в Si идет в фазу III. Это область ее стабильности, и относительно небольшие сдвиговые напряжения, возникающие из-за скачка объема при превращении, практически не влияют на конечное состояние. В случае обратного перехода в Ge, который начинается при  $P = 7.6$  ГПа (область стабильности фазы I), наблюдается смесь фаз III+I, т.е. часть GeII превращается





## Список литературы

- [1] Jamieson J.C. // *Sci.* 1963. V. 139. N 3552. P. 340-341.
- [2] Olijnyk H., Sikka S.K., Holzapfel W.B. // *Phys. Lett.* 1984. V. 103A. N 3. P. 137-140.
- [3] Vohra Y.K., Brister K.E., Desgreniers S., Ruoff A.Z., Chang K.I., Cohen M.Z. // *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. N 18. P. 1944-1947.
- [4] Duclos S.J., Vohra Y.K., Ruoff A.Z. // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. N 8. P. 775-777.
- [5] Qadri S.B., Skelfon E.F., Webb A.W. // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54. N 6. P. 3609-3611.
- [6] Малюшицкая З.В., Кабалкина С.С. // *ФТТ.* 1984. Т. 26. № 8. С. 2259-2263.
- [7] Menony S., Hu J.Z., Spain I.Z. // *Phys. Rev. B.* 1986. V. 34. N 1. P. 362-368.
- [8] Hu J.Z., Spain I.Z. // *Sol. St. Commun.* 1984. V. 51. N 5. P. 263-266.
- [9] Kasper J.S., Richards S.M. // *Acta Cryst.* 1964. V. 17. N 6. P. 752-755.
- [10] Bates C.H., Dachille F., Roy R. // *Sci.* 1965. V. 147. N 3660. P. 860-862.
- [11] Clark J.D., Dachille F., Shimada M. // *J. Non-Cryst. Sol.* 1977. V. 23. N 1. P. 13-19.
- [12] Zhao Y.-X., Buehler F., Sites J.R., Spain I.Z. // *Sol. St. Commun.* 1986. V. 59. N 10. P. 679-682.
- [13] Minomura S. // *J. Cryst. Soc. Jap.* 1972. V. 14. N 3. P. 250-253.
- [14] Верещагин Л.Ф., Зубова Е.В., Бурдина К.П. // *ДАН СССР.* 1966. Т. 168. С. 301-303.
- [15] Неверов В.В., Чернов А.А. // *ФТТ.* 1986. Т. 28. № 1. С. 176-179.
- [16] Тонков Е.Ю. Фазовые превращения соединений при высоком давлении. М.: Металлургия, 1988. Ч. 2. 360 с.
- [17] Bundy F.P. // *G.F. Research Lab. Rep.* 1963. N 63-RL. 3464 с.
- [18] Ильина М.А., Ицкевич Е.С. // *ФТТ.* 1980. Т. 22. № 10. С. 3139-3142.
- [19] Аксененков В.В., Бланк В.Д., Коняев Ю.С. и др. // *ФММ.* 1983. Т. 57. № 2. С. 394-397.
- [20] Барабанов И.А., Бланк В.Д., Коняев Ю.С. // *ПТЭ.* 1987. № 2. С. 176-177.
- [21] Mao H.K., Bell M., Shaner J.W., Steinberg D.J. // *Appl. Phys.* 1978. V. 49. P. 3276-3279.
- [22] Avilov V.V., Arkhipov P.G. // *Solid State Com.* 1983. V. 48. P.933-938.
- [23] Богуславский Ю.Я. // *ФТТ.* 1985. Т. 27. № 1. С. 140-143.
- [24] Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бануга С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Киев: Наукова думка, 1985. 141 с.
- [25] Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 204 с.
- [26] Каганова И.М., Ройтбурд А.А. // *ЖЭТФ.* 1988. Т. 94. № 6. С. 156-173.
- [27] Павлов В.А. // *ФММ.* 1985. Т. 59. № 4. С. 629-649.
- [28] Лисняк А.Г., Могутнов Б.М., Эстрин Э.И. // *ФТТ.* 1971. Т. 13. № 9. С. 2769-2772.

Институт физики высоких давлений РАН  
им. Л.Ф. Верещагина  
Троицк  
Московская обл.

Поступило в Редакцию  
28 декабря 1992 г.