

## К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я

УДК 537.312+53.082.73.539.89

© 1990

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭДС ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ВИСМУТА ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ СЖАТИИ ДО 9 ГПа

А. О. Сабуров, Н. Н. Степанов, В. А. Пономаренко,  
В. С. Ровша, А. П. Шеецов

В работах [1, 2] для исследования электронных транспортных свойств высокобарических фаз висмута был применен метод термоэдс. В [1] поведение термоэдс  $S$  Вi под давлением изучалось при температурах 319 и 325 К в барическом диапазоне до 6 ГПа. В результате проведенных экспериментов на зависимостях  $S(P)$  Вi обнаружены особенности, обусловленные полиморфными превращениями ВiI—II, ВiII—III и ВiIII—IV,<sup>1</sup> определены порядок величины и знак  $S$  каждой из указанных фаз. В [2]  $S$  Вi исследовалась в условиях литостатического сжатия до 8.4 ГПа и комнатной температуры. При этом фазовые превращения ВiII—III, ВiIII—IV, ВiIV—V и ВiV—VI методом термоэдс не были зафиксированы, что, возможно, явилось следствием существенной негидростатичности генерируемого в твердофазной среде давления.

В связи с изложенным представляло интерес провести повторные эксперименты по изучению термоэдс полиморфных модификаций ВiI—ВiVI в аппаратуре высокого давления, обеспечивающей высокую степень изостатичности сжатия. С этой целью в настоящей работе был применен усовершенствованный вариант аппарата высокого давления «тороид» [4], который позволял создавать давления до 9 ГПа в рабочем объеме камеры сжатия  $\sim 1$  см<sup>3</sup>. Средой, передающей давление на испытуемый образец, служил гексагональный нитрид бора. Давление в камере сжатия определялось резистивным методом по реперным переходам в Вi (2.55 и 7.7 ГПа), РbТе (5.05 ГПа) и Sn (9.4 ГПа) [5, 6]. Температурный градиент на образце, размещенном в камере сжатия, создавался внутренним нихромовым нагревателем, расположенным вблизи одного из его торцов.

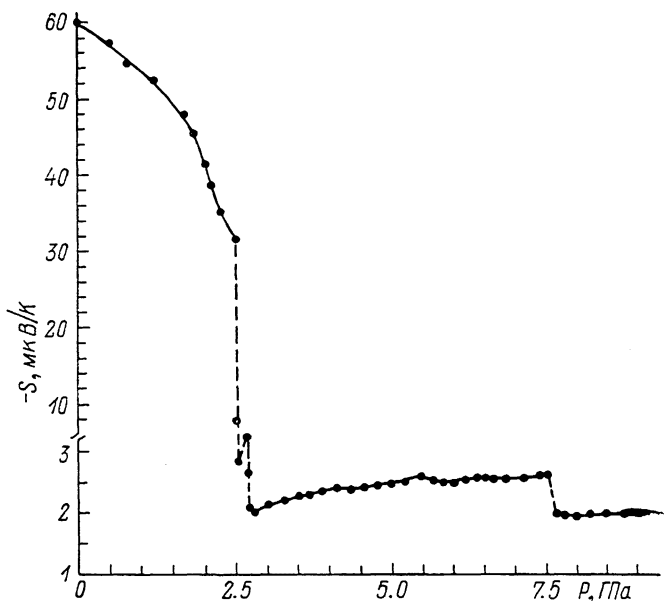
Образцы поликристаллического Вi (чистотой не менее 99.99 %) представляли собой кусочки проволоки диаметром 0.5 и длиной 3—4 мм, полученные экструзией исходного слитка через фильеру. Перепад температур вдоль образца измерялся впаянными в его торцы медь-константовыми термопарами с диаметром проводов 0.05 и 0.07 мм соответственно. Термоэлектрический сигнал снимался с медных ветвей термопар. Погрешность в измерении термоэдс не превышала  $\pm 0.2$  %.

Результаты измерений термоэдс Вi в диапазоне давлений  $P \leq 9$  ГПа при температуре 300 К представлены на рисунке. Проведем анализ полученной барической зависимости  $S$  Вi.

При атмосферном давлении и комнатной температуре термоэдс Вi (фаза ВiI) имеет величину  $S \approx -60$  мкВ/К. Под давлением  $S$  убывает по абсолютной величине и в точке фазового превращения ВiI—II ( $P = 2.55$  ГПа)

<sup>1</sup> Нумерация фаз висмута взята из [3].

ее величина со стороны фазы  $\text{ViI}$  составляет  $S \approx -31$  мкВ/К. Фазовый переход  $\text{ViI}-\text{II}$  сопровождается резким скачком величины  $S$  до  $\approx -2.8$  мкВ/К. В фазе  $\text{ViII}$   $|S|$  возрастает под давлением со скоростью  $|\partial S/\partial P| \approx 5.8$  мкВ/К·ГПа и достигает величины  $|S| \approx 3.5$  мкВ/К при  $P=2.7$  ГПа. Вслед за этим  $|S|$  вновь резко уменьшается в результате фазового превращения  $\text{ViII}-\text{III}$ , величина термоэдс принимает при этом значение  $S \approx -2$  мкВ/К. В условиях литостатического переход  $\text{ViII}-\text{III}$ , начинающийся при  $P=2.67$  ГПа, полностью завершается при  $P=2.8$  ГПа. В фазе  $\text{ViIII}$   $|S|$  возрастает под давлением со скоростью  $|\partial S/\partial P| \approx 0.27$  мкВ/К·ГПа и достигает при  $P=4.3$  ГПа величины  $|S| \approx 2.4$  мкВ/К. В точке  $P=4.3$  ГПа на барической зависимости термоэдс наблюдается излом, соответствующий фазовому переходу  $\text{ViIII}-\text{IV}$ , при этом вели-



Барическая зависимость дифференциальной термоэдс висмута при 300 К.

чина  $|S|$  незначительно уменьшается, одновременно убывает и наклон зависимости  $-S(P)$  — барический коэффициент термоэдс фазы  $\text{ViIV}$   $\partial S/\partial P \approx -0.16$  мкВ/К·ГПа. Указанная величина  $\partial S/\partial P$  сохраняется вплоть до  $P=5.7$  ГПа. Отметим, что зафиксированное нами давление фазового перехода  $\text{ViIII}-\text{IV}$  находится в превосходном согласии с общепринятым в настоящее время значением  $P_{\text{ViIII-IV}} = 4.27 \pm 0.05$  ГПа при 300 К [8]. В целом зависимость  $S(P)$   $\text{Vi}$  в диапазоне давлений до 5.7 ГПа согласуется (с точностью до знака) с таковой, полученной в [1].

При  $P=5.7$  ГПа на кривой  $S(P)$   $\text{Vi}$  вновь наблюдается излом, свидетельствующий о происшедшем в  $\text{Vi}$  фазовом переходе  $\text{ViIV}-\text{V}$ . Полиморфное превращение  $\text{ViIV}-\text{V}$  сопровождается незначительным падением величины  $|S|$  и заметным уменьшением ее барического коэффициента — в фазе  $\text{ViV}$   $|\partial S/\partial P| \approx 0.09$  мкВ/К·ГПа.

Фазовый переход  $\text{ViV}-\text{VI}$  при  $P=7.7$  ГПа был зафиксирован нами по скачку термоэдс  $|\Delta S| \approx 0.6$  мкВ/К.  $S$   $\text{Vi}$  после завершения в последнем фазового превращения при 7.8 ГПа имеет величину  $\approx -1.9$  мкВ/К, и далее ее значение с ростом  $P$  до 9 ГПа практически не меняется.

В результате проведенных исследований установлено, что высокобарические фазы висмута  $\text{ViII}-\text{ViVI}$  характеризуются невысокими значениями термоэдс и слабой зависимостью  $S$  от давления. Обращает на себя внимание также тот факт, что барический коэффициент термоэдс убывает по абсолютной величине с ростом номера фазы высокого давления  $\text{Vi}$ .

На этом основании можно прийти к заключению, что: а) в фазах II—VI висмут является типичным металлом с низкой плотностью энергетических состояний носителей заряда на уровне химического потенциала; б) металлический характер межатомных связей в указанных фазах VI усиливается с ростом давления.

Представляется наиболее вероятным, что в образовании металлической связи, обуславливающей экспериментально наблюдаемую барическую зависимость термоэдс, участвуют валентные  $6s$ - и  $6p$ -электроны Bi.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Khvostantsev L. G., Vereshchagin L. F., Uliyanitskaya N. M. // High Temp.-High Press. 1973. V. 5. N 2. P. 261—264.
- [2] Vijayakumar V., Vaidya S. N., Sampathkumaran E. V., Gupta L. C. // High Temp.-High Press. 1980. V. 12. N 6. P. 649—654.
- [3] Тонков Е. Ю. Фазовые превращения соединений при высоком давлении / Под ред. Е. Г. Понятовского. М., 1988. Т. 1. 464 с.
- [4] Khvostantsev L. G., Vereshchagin L. F., Novikov A. P. // High Temp.-High Press. 1977. V. 9. N 6. P. 637—639.
- [5] Onodera A. // High Temp.-High Press. 1987. V. 19. N 6. P. 579—609.
- [6] Скоропанов А. С., Валецкий Б. Л., Скумс В. Ф., Вечер А. А. // Сверхтвердые материалы. 1988. № 3. С. 61—63.

ЛФИМАШ АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
22 августа 1989 г.

УДК 535.361

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

## КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ПОДВЕРГНУТОГО ЛАЗЕРНОМУ ОТЖИГУ

*Л. П. Авакянц, В. С. Горелик, Е. Д. Образцова*

Комбинационное рассеяние (КР) света от приповерхностной области кристаллов кремния, подвергнутых ионной имплантации, исследовалось ранее в работах [1—4]. Было показано, что при малых дозах имплантации происходит уменьшение интенсивности КР на фундаментальных решеточных модах, проявляющихся в спектрах первого и второго порядков [4]. Это интерпретировалось как следствие возникновения точечных дефектов при ионной имплантации. При возрастании дозы имплантации в спектре КР возникали дополнительные пики, коррелирующие с максимумами плотности фононных состояний, что свидетельствовало о разупорядочении кристаллической решетки и переходе ее в аморфное состояние. Область доз имплантации, при которых осуществлялся этот переход, определялась массой ионов; например, для бора эта величина составляла  $10^{16}$  см $^{-2}$ , а для сурьмы  $10^{13}$  см $^{-2}$ . При лазерном воздействии на поверхность имплантированного кремния наблюдался [5] процесс восстановления спектра КР, характерного для кристаллического кремния. Это свидетельствовало о лазерном отжиге разупорядоченности кристаллической решетки, возникшей в результате ионной имплантации. В то же время практически не был исследован характер эволюции спектров КР при последовательном увеличении энергии лазерного воздействия, отражающий динамику перехода приповерхностного слоя имплантированного кремния из аморфного в кристаллическое состояние.

В настоящей работе была поставлена задача выявления изменений в спектрах КР, обусловленных последовательным возрастанием дозы