

УДК 536.21 : 548

© 1992

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ АНТИМОНИДОВ ГАЛЛИЯ, ИНДИЯ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Я. Б. Магомедов, Н. Л. Крамынина, Ш. М. Исмаилов

Абсолютным компенсационным методом в стационарном тепловом режиме исследовано влияние всестороннего давления (до 0.35 ГПа) на теплопроводность антимонидов галлия, индия и твердых растворов на их основе $(\text{InSb})_x(\text{GaSb})_{1-x}$ в поликристаллической модификации, где $x = 0.3, 0.5, 0.7$. Рассматриваются причины роста фоновой теплопроводности под воздействием давления и изменение ее в твердых растворах в зависимости от состава и давления.

Изучение влияния высокого давления на физические свойства полупроводников при различных температурах представляет существенный интерес для физики твердого тела при решении ряда современных технических проблем. В литературе имеются данные по исследованию влияния высокого давления на электрические и оптические свойства многих полупроводников и полупроводниковых соединений. Следует отметить, что для более четкого представления об изменениях зонных и упругих параметров полупроводников в условиях всестороннего давления важными являются данные по теплопроводности и различным ее механизмам в зависимости от давления. Однако влияние всестороннего давления на теплопроводность полупроводников мало исследовано теоретически и экспериментально. Имеющиеся в литературе сведения [1-7] касаются в основном влияния давления на теплопроводность металлов и диэлектриков. Попытка некоторых авторов [8-11] оценить теоретически изменение фоновой части теплопроводности твердых тел с давлением не согласуется с экспериментальными данными.

Используя один из вариантов абсолютного компенсационного метода изменения теплопроводности твердых тел, мы собрали установку, позволяющую исследовать теплопроводность и электропроводность полупроводниковых материалов в зависимости от температуры и всестороннего гидростатического давления [12].

В качестве объектов исследования теплопроводности в условиях всестороннего сжатия были выбраны антимониды индия и галлия и твердые растворы на их основе. Электрические и оптические свойства этих материалов в зависимости от температуры и давления исследованы многими авторами. В широком температурном интервале исследована и теплопроводность, но нет сведений по влиянию давления на теплофизические параметры этих объектов.

Для исследования были использованы промышленные поликристаллические образцы n -типа InSb и p -типа GaSb с концентрацией носителей тока $2 \cdot 10^{16}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Были исследованы также концентрационная и барическая зависимости теплопроводности сплавов антимонидов индия и галлия $(\text{InSb})_x(\text{GaSb})_{1-x}$, где $x = 0.3, 0.5, 0.7\%$. Данные металлографического анализа образцов сплавов, полученных в определенном технологическом режиме, свиде-

	T (К)	P , ГПа						
		$1 \cdot 10^{-5}$	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
InSb	373	10.0	10.14	10.22	10.3	10.36	10.44	10.55
	423	8.8	8.92	8.99	9.06	9.13	9.19	9.25
$x = 0.3$	373	4.3	4.37	4.41	4.43	4.46	4.49	4.52
	423	3.77	3.83	3.85	3.88	3.91	3.94	4.0
$x = 0.5$	373	3.8	3.82	3.84	3.85	3.86	3.87	3.9
	423	3.61	3.61	3.64	3.65	3.66	3.65	3.66
$x = 0.7$	373	4.4	4.48	4.51	4.53	4.57	5.1	5.3
	423	3.9	3.95	4.01	4.05	4.09	4.13	4.16
GaSb	373	18.3	18.53	18.64	18.76	18.88	19.0	19.13
	423	16.1	16.29	16.4	16.51	16.6	16.71	16.83

тельствуют о том, что после длительного гомогенизирующего отжига мы имели дело с поликристаллическими образцами твердых растворов замещения InSb и GaSb.

Барическая зависимость теплопроводности исследованных образцов при 273 К представлена на рис. 1. В таблице приведены экспериментальные данные по теплопроводности этих веществ при других температурах и давлениях. Экспериментальные данные при нормальном давлении хорошо согласуются с литературными [13, 14]. При всех температурах теплопроводность антимонидов индия, галлия и их твердых растворов с ростом давления увеличивается линейно. Интенсивность барической зависимости теплопроводности с температурой ослабляется и зависит от состава — уменьшается при переходе от GaSb к InSb.

Для объяснения экспериментальных данных мы исходили из наличия фононного $\lambda_{\text{ф}}$, электронного $\lambda_{\text{эл}}$ и биполярного $\lambda_{\text{бп}}$ механизмов теплопроводности в исследованных соединениях. Для вычисления $\lambda_{\text{эл}}$ и $\lambda_{\text{бп}}$ была исследована электропроводность σ в зависимости от температуры и давления. По температурной зависимости электропроводности установлено, что в интересующем нас температурном интервале в исследованных объектах наблюдается область смешанной проводимости и величина электропроводности не превышает $300\text{--}400 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Вычисленные по электрическим параметрам $\lambda_{\text{эл}}$ и $\lambda_{\text{бп}}$ в температурном интервале до 500 К малы и не могут влиять на температурную и барическую зависимости общей теплопроводности.

Фононный механизм теплопроводности является основным механизмом для этих соединений в указанном интервале температур. Для объяснения барической зависимости фононной теплопроводности мы исходили из формулы Лейбфрида—Шлёмана [15]

$$\lambda_{\text{ф}} = \frac{VM\delta\Theta^3}{\gamma^2 T}, \quad (1)$$

устанавливающей связь $\lambda_{\text{ф}}$ с параметрами δ , Θ и γ , которые могут изменяться в условиях всестороннего сжатия. Здесь δ — среднее расстояние между атомами, Θ — характеристическая температура Дебая, γ — параметр Грюнайзена.

Дифференцируя (1) по объему при постоянной температуре, авторы работ [8, 10] получили выражение для барического коэффициента теплопроводности $g = \partial \ln \lambda / \partial P = \kappa (3\lambda + 2q - 1/3)$, где κ — изотермическая сжимаемость; $\gamma = -(\partial \ln \Theta / \partial \ln V)$ — параметр Грюнайзена; $q = (\partial \ln \gamma / \partial \ln V)$ — параметр, экспериментальное значение которого для кристаллов с кубической структурой,

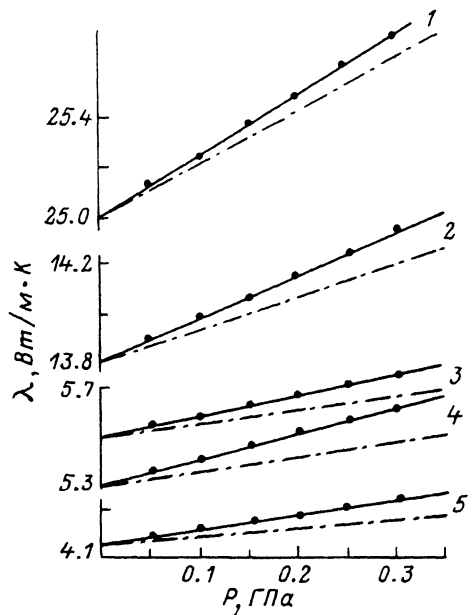


Рис. 1. Теплопроводность InSb, GaSb и твердых растворов на их основе в зависимости от давления при $T = 273$ К.

Сплошные линии — экспериментальные данные, штриховые — расчетные, 1 — GaSb, 2 — InSb, 3 — $\text{InSb}_{0.3}\text{GaSb}_{0.7}$, 4 — $\text{InSb}_{0.5}\text{GaSb}_{0.5}$, 5 — $\text{InSb}_{0.7}\text{GaSb}_{0.3}$.

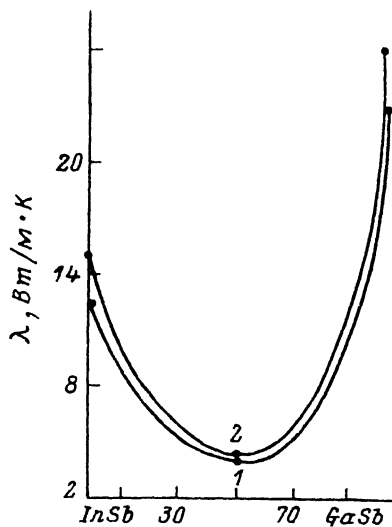


Рис. 2. Теплопроводность твердых растворов на основе антимонидов InSb и GaSb в зависимости от состава и давления при $T = 273$ К.

1 — $P = 1 \cdot 10^{-5}$, 2 — 0.35 ГПа.

согласно [9], лежит в пределах $1 \leq q \leq 2$. Расчетные или экспериментальные значения q для соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ в литературе мы не встретили и для своих расчетов приняли $q = 1.5$.

Высокотемпературные значения γ и χ для InSb и GaSb взяты из [16]. Нам не известны значения χ и γ для твердых растворов на основе InSb и GaSb, поэтому мы допускаем, что эти параметры в твердых растворах изменяются линейно от значения, соответствующего InSb, до значения, соответствующего GaSb.

Вычисленная по формуле $\ln \lambda = \ln \lambda_0 + \chi \gamma P$ барическая зависимость теплопроводности решетки для всех исследованных составов при 273 К представлена на рис. 1. Здесь λ_0 — значение теплопроводности данного состава при атмосферном давлении, P — величина давления.

Как видно из этого рисунка, вычисленные значения теплопроводности в зависимости от давления качественно согласуются с экспериментальными, но количественно расходятся: экспериментальные значения выше расчетных. Учитывая, что подбор параметров для расчетного уравнения (1) носит оценочный характер, можно считать вполне удовлетворительной согласованность качественных и количественных результатов расчета и эксперимента.

Из-за отсутствия в литературе значений параметров χ , γ , q произвести подобные расчеты при других температурах и сравнить их с экспериментом не представляется возможным.

Была исследована концентрационная зависимость теплопроводности твердых растворов системы $(\text{InSb})_x(\text{GaSb})_{1-x}$ от давления при температуре 273 К. На рис. 2 представлены также концентрационные зависимости при атмосферном давлении и при давлении 0.35 ГПа. Как видно из этого рисунка, замещение атомов одного элемента другими атомами сопровождается уменьшением тепло-

проводности. Наряду с рассеянием фононов процессами переброса (U -процессы) в твердых растворах замещения увеличение теплового сопротивления обусловлено дополнительным рассеянием фононов точечными дефектами, связанными с различием масс и упругих параметров решетки в местах замещения атомов [15].

Величину теплопроводности сплавов твердых тел, решетка которых содержит большое количество точечных дефектов, при нормальном давлении можно рассчитать по формуле [17]

$$\lambda_{\phi} = \lambda_U \frac{\omega_0}{\omega_D} \operatorname{arctg} \frac{\omega_D}{\omega_0}, \quad (2)$$

где λ_U — теплопроводность решетки сплава, если она ограничена рассеянием фононов только U -процессами; ω_D — частота Дебая; ω_0 — частота фононов, при которой времена релаксации для рассеяния U -процессами и дефектами одинаковы. Для расчета частоты использована формула [16] $(\omega_0/\omega_D)^2 = k/2\pi v \lambda_U \Theta_D A$, в которую входят величина средней скорости распространения звука в данном сплаве v и параметр $A = C(1 - C)\Delta M^2/4\pi v^3 N M^2$, определяющий рассеяние фононов дефектами, обусловленными изменением плотности. Здесь C , ΔM и M — концентрация, разность масс и средняя молекулярная масса соединений, составляющих сплав соответственно.

Используя значения параметров v , Θ для InSb и GaSb [15] и в качестве λ_{ϕ} — собственные экспериментальные данные, путем интерполяции этих данных мы рассчитали теплопроводность твердых растворов $(\text{InSb})_x(\text{GaSb})_{1-x}$ при атмосферном давлении и 273 К, которые согласуются с экспериментом (рис. 2). Для расчета концентрационной зависимости λ_{ϕ} при других давлениях и температурах мы не располагаем соответствующими значениями параметров, входящих в формулу (2).

Из формулы (1) следует, что с ростом температуры теплопроводность должна меняться по закону T^{-1} , если тепловое сопротивление решетки обусловлено рассеянием фононов U -процессами. Из нашего эксперимента и данных [12, 13] следует, что с температурой фононная теплопроводность меняется по закону T^{-n} , где $n = 1.2$ и 1.1 для GaSb и InSb соответственно при 450 К. С увеличением давления значение n уменьшается и при 0.35 ГПа принимает значение 1.17 для GaSb и 1.08 для InSb. Учитывая эти обстоятельства и тот факт, что при выводе формулы (1) авторы считают объем кристалла постоянным, мы, согласно [10], допускаем, что увеличение значения происходит за счет изменения коэффициента теплового расширения решетки. Вычисленные по формуле $n = 1 + 3\alpha g T$ [10] (где α — коэффициент объемного теплового расширения) значения n для 450 К, равные 1.21 и 1.12 соответственно для GaSb и InSb, согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

- [1] Бриджмен Р. В. Физика высоких давлений / Под ред. Л. Ф. Верещагина. М.: ИЛ, 1935. С. 402.
- [2] Huges D. S., Sawin F. // Phys. Rev. A. 1967. V. 61 N 3. P. 861—872.
- [3] Аверкин А. А., Жапаров Ж. Ж., Сильбанс Л. С. // ФТП. 1972. Т. 5. С. 1954—1957.
- [4] Andersson P., Backström G. // High Temp.-High Press. 1972. V. 4. P. 101—110.
- [5] Andersson S., Backström G. // J. Phys. C. 1987. V. 20. N 25. P. 5951—5962.
- [6] Alm O., Backström G. // J. Phys. Chem. Solids. 1974. V. 35. P. 421—425.
- [7] Alm O., Backström G. // High Temp.-High Press. 1975. V. 7. P. 235—239.
- [8] Mooney D. L., Steg R. G. // High Temp.-High Press. 1969. V. 1. P. 273—279.
- [9] Bohlin L. // High Temp.-High Press. 1973. V. 5. P. 581—585.
- [10] Glen A. Slack // Solid State Physics, 1979. V. 34. P. 1—71.
- [11] Klemens P. G. // Proc. 7th Symp. Thermophys. prop. New York, 1977. V. 4. P. 100—104.
- [12] Амирханов Х. И., Магомедов Я. Б., Эмиров С. Н. // ФТТ. 1973. Т. 15. № 5. С. 1512—1515.
- [13] Амирханов Х. И., Магомедов Я. Б. // ФТТ. 1965. Т. 7. № 2. С. 637—640.

- [14] Амирханов Х. И., Магомедов Я. Б. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 1. С. 290—292.
[15] Драбл И. Р., Голдслид Х. С. Теплопроводность полупроводников. М.: ИЛ, 1963. С. 266.
[16] Баранский Р. И., Клочков Б. П., Потикевич И. В. Электронные полупроводники. Киев: Наукова думка, 1975. С. 705.
[17] Klemens P. G. // Phys. Rev. 1910. V. 119. P. 507—510.

Институт физики им. Х. И. Амирханова
Дагестанский научный центр РАН
Махачкала

Поступило в Редакцию
11 марта 1992 г.

