

АНАЛИЗ РЕШЕТОЧНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Ga_{1-x}In_xAs$

М.И.АЛИЕВ, Д.Г.АРАСЛЫ, Р.Н.РАГИМОВ, А.А.ХАЛИЛОВА, И.Х.МАМЕДОВ

Институт Физики им. академика Г.М.Абдуллаева

НАН Азербайджана

AZ- 1143, Баку, пр. Г. Джавида 33

$Ga_{1-x}In_xAs$ ($0 \leq x \leq 0,03$) monokristalların istilik keçiriciliyi 80-300K temperatur bölümündə tədqiq olunmuşdur. Alınmış nəticələrin analizində bütün səpilmə mexanizmləri nəzərə alınmaqla Holland modelindən istifadə edilmişdir. Göstərilmişdir ki, tədqiq olunan temperatur bölümündə istiliyin daşınmasında eninə fononların payı əhəmiyyətli dərəcədədir.

Исследована теплопроводность монокристаллов $Ga_{1-x}In_xAs$ при $0 \leq x \leq 0,03$ в области температур 80-300K. Полученные результаты анализировались по модели Холланда с учетом всех механизмов рассеяния фононов. Показано, что в исследуемом интервале температур вклад поперечных фононов в перенос тепла существенен.

The thermal conductivity of $Ga_{1-x}In_xAs$ single crystals ($0 \leq x \leq 0,03$) in the temperature range 80-300K has been investigated. Holland's model has used to analyze for received experimental results taking into account of all scattering mechanisms. It has been shown that the contribution of transverse phonons to heat transfer in the investigated temperature range is essential.

1. ВВЕДЕНИЕ

GaAs и тройные соединения на его основе являются важными материалами для сверхбыстродействующих приборов электронной и оптоэлектронной техники. Особое значение при создании этих приборов имеет теплопроводность материала. В данной работе приводятся результаты исследований теплопроводности (K) тройного соединения $In_{1-x}Ga_xAs$. Литературные данные о теплопроводности твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs$ довольно скудны. В работах [1] и [2] исследована температурная зависимость теплопроводности поликристаллов $Ga_{1-x}In_xAs$ при больших составах ($0,12 < x < 0,85$ и $0,3 < x < 0,7$) выше комнатной температуры. Омер и др. [3] измерили $K(x)$ $Ga_{1-x}In_xAs$ со стороны GaAs до 1моль% InAs при комнатной температуре. Температурная зависимость $K(T)$ этой системы, богатой арсенидом галлия (до 10 моль% GaAs) исследована нами в широком интервале температур при 80÷300K [4] и при 300÷700K [5]. Следует отметить, что наряду с твердыми растворами $Ge_{1-x}Si_x$, $Ga_{1-x}In_xAs$ является удобным объектом для проверки различных моделей теплопроводности. Экспериментальные результаты работ [1, 3] обсуждались Клеменсом [6] и Абелесом [7] на основе предложенных ими моделей. Данные, полученные нами в [4], рассмотрены Адачи [8] в рамках его модели.

Сведения о температурной зависимости теплопроводности твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs$ при $0,01 < x < 0,15$ в литературе отсутствуют. Исследования температурной зависимости теплопроводности этих твердых растворов в широком интервале температур и анализ результатов в рамках существующих теоретических моделей дали бы возможность определить интенсивности различных механизмов рассеяния фононов. С этой целью исследована теплопроводность твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs$ при $0 \leq x \leq 0,03$ в интервале температур 80-300K.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Измерения проведены на монокристаллах, полученных методом Чохральского. Образцы имели концентрацию электронов $n = (2 \div 4) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и плотность дислокаций $10^3 \div 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Теплопроводность измерена абсолютным стационарным методом продольного теплового потока. Откачка паров азота позволила обеспечить температурный диапазон измерений. Погрешность измерения составляет 4%.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурная зависимость теплопроводности исследованных образцов представлена на рис.1. Как видно, с увеличением содержания компоненты InAs в твердом растворе значение теплопроводности уменьшается и ослабляется ее температурная зависимость. Уменьшение величины K и показателя степени в зависимости $K(T) \sim T^\alpha$ по мере увеличения состава характерно и для твердого раствора, богатого арсенидом индия, и связано с увеличением вклада рассеяния фононов на беспорядке сплава.

Анализ температурной зависимости фоновой теплопроводности проведен в рамках двухпараметрического приближения Холланда [9]. Поскольку в соединениях A^3B^5 , в частности и GaAs, акустические моды имеют сильную дисперсию и дебаевские температуры для продольных и поперечных фононов существенно различаются, то фоновая теплопроводность определяется как

$$K_f = K_l + K_t \quad (1)$$

где, индексами l и t обозначены вклады в фоновую теплопроводность продольных и поперечных фононов, соответственно.

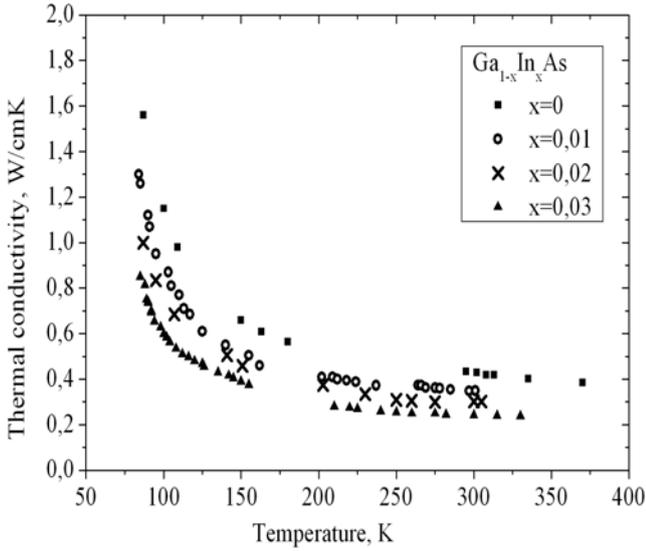


Рис.1. Температурная зависимость теплопроводности $Ga_{1-x}In_xAs$.

Эти составляющие описываются следующими выражениями [10, 11]

$$K_i = \gamma_i \frac{k_0^4 T^3}{2 \pi^2 \hbar^3 v_i} T^3 \int_0^{\theta_i/T} \tau_{ci} \frac{z^4 e^z}{(e^z - 1)^2} dz \quad (2)$$

где $i=l, t$, γ_i - в случае продольных и поперечных мод равны соответственно 1/3 и 2/3; $z = \frac{\hbar \omega_i}{k_B T}$, величины

\hbar и k_B - постоянные Планка и Больцмана, ω_i - максимальные значения частот продольных и поперечных акустических фононов на границе зоны Бриллюэна, v_i - групповая скорость звука соответствующих фононов. Здесь τ_c - полное время релаксации для возможных процессов рассеяния фононов:

$$\tau_c^{-1}(\omega_i) = \sum_i \tau_i^{-1}(\omega)$$

При расчетах $K(T)$ мы учли рассеяние фононов на границах, на дефектах, резонансное рассеяние, процессы фонон-фононного перебора и нормальные процессы. Время релаксации граничного рассеяния определяли по формуле:

$$\tau_B^{-1} = \frac{v_B}{L} \quad (3)$$

где L -длина образца, v_B -скорость звука в кристалле

$$v_B^{-1} = \frac{1}{3} [2v_l^{-1} + v_t^{-1}] \quad (4)$$

Время релаксации рассеяния фононов на беспорядке сплава определялось как $\tau_{al}^{-1} = A\omega^4$,

где параметр A рассчитан по формуле Абелеса:

$$A = \frac{v}{4\pi} x(1-x) \left[\left(\frac{\Delta M}{M} \right)^2 + \varepsilon \left(\frac{\Delta \delta}{\delta} \right)^2 \right] \quad (5)$$

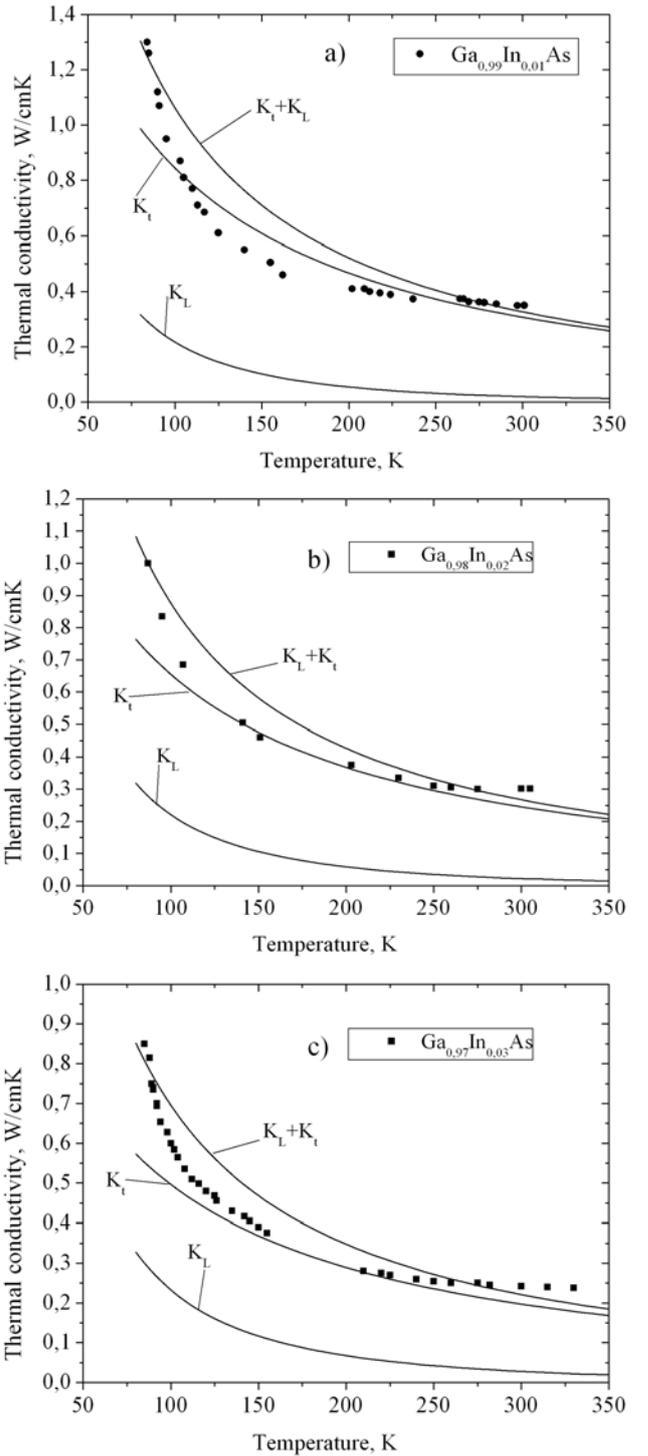


Рис.2. Температурная зависимость фононной теплопроводности $Ga_{1-x}In_xAs$ разного состава: точки - эксперимент, сплошные кривые - расчет по формулам (1)-(7). K_t - вклад поперечных фононов, K_L - вклад продольных фононов.

При расчетах учтены как локальные изменения плотности ($\frac{\Delta M}{M}$), так и упругие свойства среды ($\frac{\Delta \delta}{\delta}$) при замене атома галлия индием. Следует отметить, что в $Ga_{1-x}In_xAs$ существенный вклад в параметр

неупорядоченности вносит член, связанный с локальным изменением упругих свойств среды.

В связи с тем, что в твердом растворе дефектом является примесь замещения и в исследуемом температурном интервале превалируют трехфононные процессы, то для времени релаксации резонансного рассеяния использовали выражение Волкера и Пола [12]:

$$\tau_R^{-1} = R \frac{\omega^2 T}{(\omega^2 - \omega_R^2)^2} \quad (6)$$

где ω_R - резонансная частота.

Релаксационные соотношения для трехфононных U - и N - процессов для продольных и поперечных фононов в различных моделях разные. Модель Холланда справедлива в случае, когда для каждой из ветви фононного спектра частоты релаксации фононов в N-процессах гораздо меньше резистивных частот релаксации фононов. В этом случае время релаксации трехфононных процессов для продольных и поперечных фононов согласно [9] имеет вид:

$$\frac{1}{\tau_L} = B_L^{U,N} \omega^2 T^3$$

$$\frac{1}{\tau_t} = B_t^N \omega T^4 + B_t^U \frac{\omega^2}{sh(\hbar\omega / kT)} \quad (7)$$

На рис.2 приведены для сравнения экспериментальные данные (точки) и рассчитанные по формулам (1) - (7) значения $K(T)$ для сплавов Ga_{1-x}In_xAs при x=0,01, x=0,02 и x=0,03 (сплошные кривые). Интенсивность этих процессов определена в результате подгонки расчетных кривых к экспериментальным данным. Параметры аппроксимации приведены в таблице 1. Данные о частотах и скоростях продольных и поперечных фононов взяты из [13] для арсенида галлия.

Таблица 1.

Параметры температурной зависимости фононной теплопроводности Ga_{1-x}In_xAs в соответствии с выражениями (1)-(7).

	Ga _{1-x} In _x As x=0.01	Ga _{1-x} In _x As x=0.02	Ga _{1-x} In _x As x=0.03
$A_{exp} \times 10^{44} (s^3)$	14	18.1	27
$A_{cal} \times 10^{44} (s^3)$	4	7.94	11.83
$B_L^{U,N} \times 10^{22} (s K_3)$	0.1	0.085	0.06
$B_t^U \times 10^{18} (s K_3)$	7	9.5	12
$B_t^N \times 10^{18} (s K_3)$	15,4	21,78	26,4
$\omega_R \times 10^{13} (s^{-1})$	1.4	1.4	1.4
R $\times 10^{-29} (s^3 K^{-2})$	5	5	5

Как видно из рисунков вклад продольных акустических фононов в $K(T)$ при T~100K составляет ~ 20% и уменьшается с температурой, а при 300K незначителен. Выше 200K основной вклад в $K(T)$ вносят поперечные акустические фононы.

- | | |
|--|--|
| <p>[1]. M.S. Abrahams, R.Braunstein, F.D.Rossi J.Phys.Chem.Solids 10 (1959) 204.</p> <p>[2]. E.F.Hockings, I.Kudman, T.E.Seidel, E.F.Steigmeier, J.Appl.Phys, 17 (1966) 7, 2879.</p> <p>[3]. M.C.Ohmer, W.C.Mitchel, G.A.Graves, D.T.Holmes, H.Kuwamoto and P.W.Yu, J.Appl.Phys. 64 (1988) 2775-2777.</p> <p>[4]. Д.Г.Араслы, Р.Н.Рагимов, М.И. Алиев, ФТП, 24 (1990) №2, 365-367.</p> <p>[5]. М.И.Алиев, Д.Г.Араслы, Р.Э.Гусейнов, Х.А.Халилов, ФТП, 7 (1973) №9, 1846-1848.</p> <p>[6]. F.Szmulowicz, F.L.Madarasz, P.G.Klemens, J.Diller, J.Appl.Phys. 66 (1) (1989) 252-255.</p> <p>[7]. V.Abeles, Phys.Rev. 131 (1963) 1906-1911.</p> | <p>[8]. S. Adachi, Physical Properties of III-V Semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP (Wiley-Interscience, New York, 1992, 296p); S.Adachi, J.Appl.Phys. 102,(2007)063502(1-7).</p> <p>[9]. M.G.Holland, Phys.Rev., 134 (1964) 2, A471-480.</p> <p>[10]. M. Asen-Palmer, K. Bartkowski, E. Gmelin, and M. Cardona, A. P. Zhernov, A. V. Inyushkin, A. Taldenkov, and V. I. Ozhogin, K. M. Itoh and E. E. Haller, Phys. Rev. B 56 (1997) 9431 - 9447</p> <p>[11]. А.П.Жернов, ФТП, 41 (1999) №7, 1185-1189. ; ЖЭТФ, 120 (2001) 5(1), 1237-1245.</p> <p>[12]. C.T. Walker, R.O. Pohl, Phys.Rev., 131 (1963) 1433-1442.</p> <p>[13]. C.M. Bhandari, G.S.Verma, Phys.Rev. , 140, (1965) A2101-A2104..</p> |
|--|--|