

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ InSb-GaSb ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С.А. ЗЕЙНАЛОВ

Институт Физики АН Азербайджана  
370143, г. Баку, пр. Г.Джавида, 33

Проведены исследования зависимости теплопроводности  $N$  от температуры в области 4,2-100 К в двух образцах  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  и  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  в системе твердых растворов InSb и GaSb. Показано, что максимум  $N$  в этих образцах лежит между значениями максимумов InSb и GaSb

Теплопроводность твердых растворов  $In_{1-x}Ga_xSb$  при различных значениях  $x$  в интервале температур 80-700 К впервые исследовалась в работах [1,2]. Показано, что в исходных бинарных соединениях решеточное тепловое сопротивление при высоких температурах ( $T > \theta_D$ ) подчиняется закону  $\kappa \sim T^{-1}$  [3,4]. С переходом в твердые растворы рассеяние фононов на носителях тока, примесях и точечных дефектах из-за сильного взаимозамещения атомов усиливается и приводит к отклонению от закона Дебая [1]. Теплопроводность InSb и GaSb как при низких, так и при высоких  $T$  исследованы достаточно. Теплопроводность же твердых растворов InSb-GaSb при низких температурах исследовалась в работе [5].

В настоящей работе рассматривается изменение механизма рассеяния фононов при низких температурах при переходе от бинарных соединений InSb и GaSb к их твердым растворам. В двух образцах, в которых после рентгеноструктурного анализа определены составы ( $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  и  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ ), измерялась теплопроводность  $N$  по методу, описанному в [6], в интервале от 4,2 до 60 К. Так как по составу  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  богат InSb, а  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ -GaSb, то естественно сравнить наши результаты с низкотемпературными измерениями в InSb и GaSb [7,8].

Предварительные измерения коэффициента Холла  $R$  и термо э.д.с.  $\alpha$  показали, что в указанном интервале  $T$  в явлениях участвует только один тип носителей тока и электропроводность  $\sigma$  имеет значение приблизительно  $10 \div 20 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ . Поэтому общая теплопроводность практически равна решеточной теплопроводности кристалла.

Как видно из рис. 1, значение теплопроводности InSb и GaSb при температурах 8 и 28 К достигает максимума и равно 20,1 и 3,6  $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}\text{К}^{-1}$ , соответственно. В этих соединениях  $N$  растет от гелиевых  $T$  до максимума в  $N(T)$  по классическому закону  $T^3$  [9]. После максимума теплопроводность из-за слабого рассеяния фононов сильно уменьшается по сравнению с теплопроводностью GaSb. С переходом в твердые растворы закон рассеяния фононов на границе в образцах  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  и  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  имеет вид  $T^{2,25}$  и  $T^{1,65}$ , соответственно. Ослабление степенной зависимости  $N$  в твердых растворах связано с рассеянием длинноволновых фононов на границах, на добавочных несовершенствах крупноблочных структурах кристалла и на токе носителей.

Рост  $N$  от  $T$  при низких температурах  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  более резкий по сравнению с  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ . Это связано с рассеянием длинноволновых фононов на границах и

крупноблочных образованиях. Если учитывать, что гео-

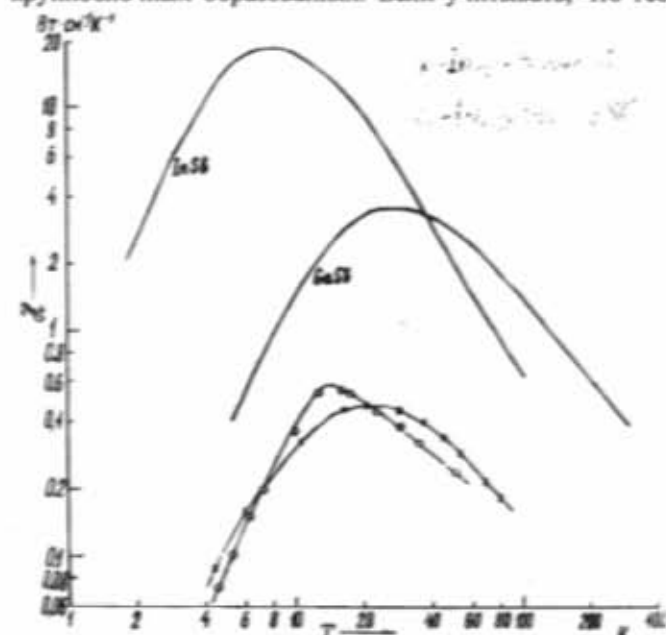


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности образцов  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  и  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ , а также чистых компонентов InSb и GaSb.

метрические размеры образцов почти равны, то различие в рассеянии длинноволновых фононов по-видимому связано с крупноблочными образованиями, которые имеют различные размеры в зависимости от состава. Кроме того, сильный рост  $N$  от  $T$  в  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ , по-видимому, связан и с концентрацией точечных дефектов. Образец  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  по сравнению с  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  богат GaSb и имеет больше точечных дефектов. InSb, введенный в GaSb, компенсирует концентрацию точечных дефектов, но их оставшаяся доля параллельно с заряженными частицами сильно влияет на рассеяние фононов при низких  $T$  в образце  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$ . Отметим, что рассеяние длинноволновых фононов на границах при низких  $T$  в обоих образцах примерно одинаково. Параллельно в рассеянии длинноволновых фононов преобладают  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  заряженные частицы, а в  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  - точечные дефекты. Примерно при 14 К в  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$   $N$  проходит через максимум, что для  $In_{0,35}Ga_{0,65}Sb$  происходит при 22 К. Температура, при которой  $N$  проходит через максимум в обоих образцах, смещалась к середине температурного интервала (8 и 28 К) исходных компонентов InSb и GaSb. При этом максимальные значения  $N$  уменьшались до

0,58 Вт·см<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  и до 0,47 Вт·см<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$ , что следовало ожидать по теории теплопроводности сильнолегированных полупроводников, т.е. твердых растворов. В  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  максимум в температурной зависимости  $\kappa$  размыт, что связано с продолжением граничного рассеяния фононов. В принципе зависимость  $\kappa$  от  $T$  в интервале от максимума до температуры Дебая со стороны высоких  $T$  для твердых тел, в частности и для твердых растворов, имеет вид:  $\kappa \sim T^{-2}$ . В твердых растворах  $\kappa$  уменьшается с ростом содержания другого компонента (рассеяние на беспорядках усиливается). В зависимости от степени замещения атомов In и Ga в образцах, последний может приобрести различные значения для показателя степени в законе  $\kappa \sim T^{-n}$ .

После максимума  $\kappa$  в зависимости от  $T$  в обоих образцах уменьшается с ростом  $T$  по различным причинам. Ими могут являться усиление ангармонизма, т.е. рассеяние фононов на фононах, точечных дефектах и примесях. В различных интервалах  $T$  один из этих механизмов рассеяния фононов может играть доминирующую роль. Известно, что закон  $\kappa \sim T^{-2}$  выполняется выше  $\theta_D$ . Нами для качественного анализа степенной зависимости  $\kappa$  от  $T$  ниже температуры Дебая в  $\text{InSb}$  (линия 1 на рис.2) и  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  с одной стороны и в  $\text{GaSb}$  (линия 2 на рис.2) и  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  с другой стороны были построены  $\kappa \sim T^{-n}$ . На представленной на рис.2 температурной зависимости теплового сопротивления возможно качественное сравнение механизма рассеяния фононов в твердых растворах с механизмом рассеяния фононов в бинарных соединениях  $\text{InSb}$  и  $\text{GaSb}$ . Как видно из рисунка, в  $\text{InSb}$  теплового сопротивление при  $T < \theta_D$  подчиняется закону  $\kappa \sim T^{-2,75}$ , а в твердом растворе, богатом  $\text{InSb}$  ( $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$ ) - закону  $\kappa \sim T^{-2,2}$ . Ниже температуры Дебая в  $\text{GaSb}$  и в его твердом растворе богатом  $\text{GaSb}$  ( $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$ ) теплового сопротивление пропорционально  $T^{1,18}$  и  $T^{0,8}$ , соответственно. Видно, что в обоих случаях с переходом в твердые растворы показатель степени зависимости теплового сопротивления от  $T$ ,  $n$  значительно уменьшается. Уменьшение  $n$  значительно сильнее со стороны  $\text{InSb}$ . Это связано с тем, что примеси и дефекты, которые рассеивают

фононы в  $\text{GaSb}$  [5] и в  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$ , где в составе 65 мол.%  $\text{GaSb}$  имеются в значительном количестве. Количество их в  $\text{InSb}$  и  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  мало, т.е. фононы в растворах богатых  $\text{InSb}$ , сравнительно слабо рассеиваясь, переносят тепло.

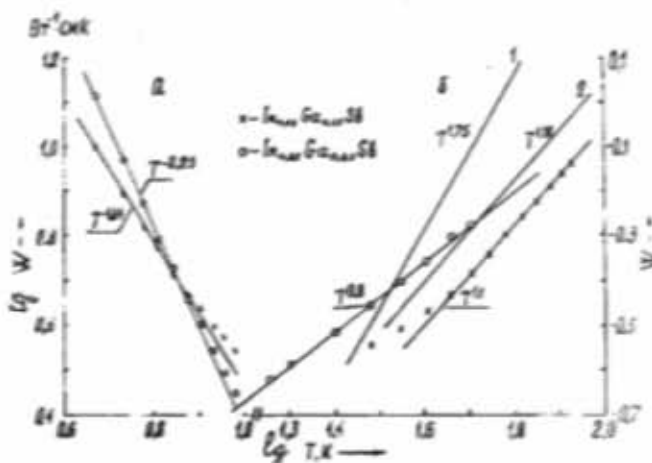


Рис.2. Температурная зависимость теплового сопротивления образцов  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  и  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$ . а-низко, б - высокотемпературные области. Линии 1 и 2 теплового сопротивления, соответственно,  $\text{InSb}$  и  $\text{GaSb}$ .

## Выводы

Установлено, что значения теплопроводности при одной и той же температуре в  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  и  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  в несколько раз меньше, чем в исходных  $\text{InSb}$  и  $\text{GaSb}$ .

Экспериментально для  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  и  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  определены максимальные значения  $\kappa$  (0,47 и 0,58 Вт·см<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>) и соответствующие им температуры (22 и 14 К).

Показатель  $n$  в зависимости  $\kappa \sim T^{-n}$  уменьшается с переходом от бинарных соединений  $\text{InSb}$  и  $\text{GaSb}$  к их твердым растворам.

- [1] S.A. Zeinalov S.A. and M.I. Aliev. Solid Solutions; Phys. St. Sol., 1967, № 22, p.153-156.
- [2] М.И. Алиев, С.А. Зейналов, Д.Г. Араслы, С.А. Алиев, Р.Н. Рагимов. Докл. АН Азерб. ССР, 1983, том XXXIX, № 8, стр. 21-24.
- [3] М.И. Алиев, Д.Г. Араслы, Р.Э. Гусейнов. Докл. АН Азерб. ССР, 1978, т. XXXIV, № 3, стр. 25-27.
- [4] М.И. Алиев, Д.Г. Араслы, Р.Э. Гусейнов, З.А. Джафаров. Анализ решеточной теплопроводности соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  при высоких температурах. В кн. "Термодинамические свойства металличе-

ских сплавов". Баку, "Элм", 1975, стр. 428.

- [5] A.G. Briggs and L.J. Challis. J.Phys.(C)(Solid St. Phys.), 1969, vol.2, № 2, p.1353.
- [6] А.М. Алиев. Теплопроводность полупроводников. Баку, Изд-во "Элм", 1963 г.
- [7] K.C. Sood and G.S. Verma. Phys. Rev.(B), 1972, vol.7, № 12, p.5316
- [8] П.В. Тамарин, В.В. Косарев, В.С. Ивлева. ФТТ, 1971, т.13, вып.6, стр.1844.
- [9] Дж. Дроби, Г. Голдсмит. Теплопроводность полупроводников. М., НЛ, 1963.

S.A. Zeinalov

## AŞAĞI TEMPERATURLARDA $\text{InSb-GaSb}$ BƏRK MƏHLULLARININ İSTİLİK KEÇİRMƏSİ

$\text{InSb-GaSb}$  tipli bərk məhlul sitemindən olan iki  $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{Sb}$  və  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{Sb}$  nümunələrində istilikkeçirmənin ( $\kappa$ ) temperatur asılılığı 4,2-100 K intervalında tədqiq olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, bu nümunələrdə istilikkeçirmənin maksimumu  $\text{InSb}$  və  $\text{GaSb}$ -in maksimum qiymətləri arasında yerləşir.

**THERMAL CONDUCTIVITY OF InSb-GaSb SOLID SOLUTIONS OF LOW TEMPERATURES.**

The thermal conductivity dependence on temperature  $\kappa(T)$  of two  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$  solid solution samples ( $x=0,45$  and  $x=0,65$ ) in the 4,2-100 K region has been investigated. It is shown that maximum values of the thermal conductivity of these samples are situated between maximum values once of InSb and GaSb compounds.

*Дата поступления: 08.10.97*

*Редактор: М.Н. Агуев*