

УДК 539.14

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ GaP ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С. К. НИКОГОСЯН, В. А. СААКЯН, А. С. САРОЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 25 марта 1982 г.)

Исследована температурная зависимость теплопроводности различных образцов n - и p - GaP вблизи азотной температуры. Обнаружен заметный сдвиг максимума теплопроводности в монокристаллах n - GaP промежуточного легирования по сравнению с p - GaP . Найдено также, что теплопроводность более сильно легированных образцов n - GaP непосредственно за максимумом, в сторону высоких температур, выше, чем для чистого образца. Оба эти явления объясняются особенностями рассеяния фононов на примесях.

Механизмы рассеяния фононов в полупроводниковых соединениях $A_{III}B_V$ достаточно полно изучены как теоретически, так и экспериментально [1].

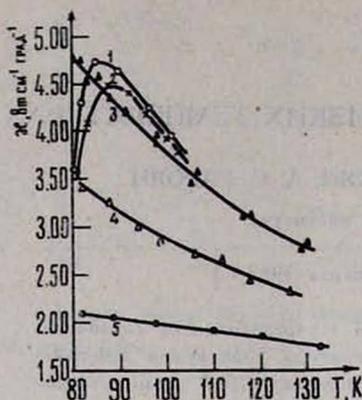
С учетом ангармонического, изотопического и граничного рассеяния и при надлежащем подборе параметров (расчет ведется обычно по модели Каллавея [2]) теория хорошо согласуется с экспериментом ниже максимума температурной зависимости теплопроводности и в области максимума. Однако при более высоких температурах экспериментальные точки расходятся выше расчетных. В работе [3] путем раздельного расчета «поперечной» χ_i и «продольной» χ_l составляющих теплопроводности для $GaAs$ и $InSb$ удалось устранить отмеченное расхождение. Для других соединений $A_{III}B_V$, в частности GaP , такие расчеты не проведены. Более того, насколько нам известно, в литературе отсутствуют экспериментальные данные по теплопроводности n - GaP при низких (вблизи азотной) температурах. Имея в виду известные отличия структуры зоны проводимости GaP от соответствующих структур $GaAs$ и $InSb$, которые могут повлиять на его тепловые свойства, мы исследовали температурную зависимость теплопроводности n - GaP вблизи азотной температуры.

Для измерения использовались монокристаллические образцы n - GaP , легированные Te (обр. 1,2) и S (обр. 3), с концентрацией свободных электронов $n_1 \approx 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n_2 \approx 9,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $n_3 \approx 5,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а также p - GaP , легированные Zn (обр. 4, $p \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и Fe (обр. 5, $N_{Fe} > 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

Теплопроводность измерялась на описанной в работе [4] установке, использующей стационарный тепловой поток. Ошибки измерений не превышают $\pm 5\%$. Результаты измерений приведены на рисунке.

Низкотемпературные измерения [5] показали, что максимум теплопроводности p - GaP находится в интервале температур 30—40 К. В то же

время из наших измерений следует, что для некоторых образцов n -GaP в зависимости от степени легирования максимум теплопроводности сдвигнут в сторону высоких температур (см. рисунок, обр. 1 и 2). Максимумы



Температурная зависимость теплопроводности различных образцов n - и p -GaP:

- 1 — n -GaP ($n \approx 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, Te);
- 2 — n -GaP ($n \approx 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, Te);
- 3 — n -GaP ($n \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, S);
- 4 — p -GaP ($p \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$, Zn);
- 5 — p -GaP ($N_{Fe} > 10^{19} \text{ см}^{-3}$, Fe);

теплопроводности этих образцов лежат соответственно при температурах 85 и 88 К. Наблюдается резкое снижение теплопроводности в сторону низких температур. Для третьего образца, который наиболее чистый, в исследованном температурном интервале максимум теплопроводности не наблюдается. Обычный температурный ход имеет и теплопроводность образцов p -типа, данные для которых приведены для сравнения, хотя из-за высокой концентрации примесей теплопроводность значительно меньше, чем у образцов n -типа.

Большой сдвиг максимума теплопроводности образцов n -типа промежуточного легирования по сравнению с образцами p -типа невозможно объяснить упомянутыми выше механизмами рассеяния фононов. Хотя большая концентрация примесей может сместить максимум теплопроводности в сторону высоких температур, однако в нашем случае наблюдаемый эффект нельзя объяснить этим, так как, например, у образцов 1 и 2 концентрации примесей отличаются почти на порядок, а сдвиг максимумов теплопроводности составляет всего 3 К. Кроме того концентрация примесей в образцах 4 и 5 p -типа выше, чем в образцах 1 и 2 n -типа, однако у них теплопроводность в измеренном температурном интервале вообще не обнаруживает максимума.

Оценки показывают, что для образцов n -GaP промежуточного легирования в области азотной температуры становится заметным рассеяние фононов на связанных электронах донорных состояний. Этот механизм рассеяния фононов, предложенный в работе [6], имеет резонансный характер. Интенсивность рассеяния достигает максимального значения, когда размер орбиты связанного электрона (пропорциональный эффективному боровскому радиусу) становится равным длине волны рассеиваемого фонона. Эффективный боровский радиус, определяемый из формулы

$$a^* = \frac{m}{m^*} \frac{\epsilon}{\epsilon_0} a_0$$
 для n -GaP (где $m^* = 0,34 m$, $\epsilon/\epsilon_0 = 10,2$, $a_0 \approx 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см}$) равен $a^* \approx 16 \text{ \AA}$; длина волны фононов в GaP при 80 К ($v \approx 5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$) составляет примерно 30 \AA , т. е. $\lambda \approx 2 a^*$.

С увеличением концентрации примесей энергия активации донорных электронов уменьшается [7], эффективный боровский радиус увеличивается и резонансное условие нарушается, что в конечном итоге приводит к исчезновению отмеченного механизма рассеяния.

Отметим еще один экспериментальный факт. Теплопроводность за максимумом, в сторону высоких температур, для более сильно легированных образцов 1 и 2 больше, чем для образца 3, который содержит меньше электрически активных примесей. Вблизи комнатной температуры соотношение обратное, т. е. чистый образец имеет более высокую теплопроводность: например, при 280 К $\chi_3 = 1,00$ Вт/см·град, а $\chi_2 = 1,15$ Вт/см·град. По-видимому в узком температурном интервале вблизи азотных температур это явление обусловлено рассеянием фононов на примесях. Фононы рассеиваются не только на примесях, но и друг на друге (N - и U -процессы), причем интенсивность последнего механизма рассеяния с повышением температуры растет экспоненциально. U -процессы, дающие основной вклад в тепловое сопротивление кристалла, имеют место тогда, когда модули волновых векторов фононов K_1 , K_2 и их взаимная ориентация таковы, что

$$K_1 + K_2 = K_3 + 2\pi b, \quad (1)$$

где b — вектор обратной решетки. При наличии примесей фононы, рассеиваясь на них упруго, изменяют свое направление так, что сумма их волновых векторов уже не удовлетворяет соотношению (1), т. е. для таких фононов U -процессы рассеяния становятся невозможными.

Следовательно, из-за того, что интенсивность рассеяния U -процессов намного выше, чем интенсивность примесного рассеяния, в некотором ограниченном интервале температур и концентраций примесей теплопроводность более сильно легированного образца может быть больше, чем для чистого образца.

При комнатных температурах число фононов с большими волновыми векторами становится преобладающим и на фоне их взаимного рассеяния примесное рассеяние играет второстепенную роль. Однако теплопроводность более сильно легированных образцов меньше теплопроводности чистых, так как те немногочисленные длинноволновые фононы (не участвующие в U -процессах), которые существуют при этих температурах, рассеиваются на примесях по закону Релея.

Таким образом, во-первых, обнаружен заметный сдвиг в сторону высоких температур максимума теплопроводности в монокристаллах n -GaP промежуточного легирования по сравнению с p -GaP. Во-вторых, теплопроводность более сильно легированных образцов n -GaP непосредственно за максимумом, в сторону высоких температур, выше, чем для чистого образца. Эти явления объясняются особенностями рассеяния фононов на примесях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Могилевский Б. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводников, Изд. Наука, М., 1972.
2. Callaway J. Phys. Rev., 113, 1146 (1959).
3. Bhandary C. M., Verma G. S. Phys. Rev., 140, 2101 (1965).
4. Девяткова Е. Д. и др. ФТТ, 2, 738 (1960).

5. Мухадаба В. М. и др. ФТТ, 10, 2866 (1968).
 6. Keyes R. W. Phys. Rev., 122, 1171 (1961).
 7. Иллицын М. И. и др. ФТП, 3, 25 (1969).

GaP -ի Ջերմաշարժառիթմային Ֆոնոնային Ցանցի ՋերմաՍտեճաններում

Ս. Կ. ՆԻԿՈԳՍՅԱՆ, Վ. Հ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Ա. Ս. ՏԱՐՈՅԱՆ

Աշխատանքում բերված են n - և p -պիտի GaP մոնոքրիստալների չերմաշարժառիթմային շարժումների առկայությունը: Ցույց է արված, որ միջանկյալ լեգիրացումով $n-GaP$ քրիստալներում չերմաշարժառիթմային մաքսիմումի շեղումը բարձր չերմաստիճանների կողմը, համեմատած $p-GaP$ -ի հետ, պայմանավորված է կապված էլեկտրոնների վրա ֆոնոնների ցրումով: Որոշակի չերմաստիճանային ինտերվալում նույն n -տիպի նմուշների չերմաշարժառիթմային մեծ արժեքները, համեմատած մաքուր նմուշի հետ, բացատրվում են յառանուրդների վրա ֆոնոնների ցրումով:

THERMAL CONDUCTION OF GaP AT LOW TEMPERATURES

S. K. NIKOGOSYAN, V. A. SAHAKYAN, A. S. SAROYAN

The temperature dependence of thermal conduction of different n - and p -type GaP monocrystals at low temperatures has been investigated. A notable shift of thermal conduction maximum in n -type GaP samples of intermediate doping with respect to the p -type GaP maximum was detected. It was also found out that the thermal conduction of strongly doped n -type GaP immediately beyond the maximum to higher temperatures was higher than for the pure sample. These effects are explained as being due to the peculiarities of phonon scattering on the impurities.