

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВИСМУТА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.Н.Копылов, Л.П.Межов-Деилин

В настоящей работе обсуждаются результаты измерений теплопроводности совершенных монокристаллических образцов Вi при низких температурах.

Интерес к этим исследованиям обусловлен в первую очередь тем, что в Вi концентрация свободных носителей заряда мала ($\sim 10^{-5}$ на атом), и перенос тепла при низких температурах осуществляется, в основном, фононами, что позволяет, в принципе, оценить вклад в теплопроводность различных механизмов рассеяния фононов (фонон-фононное, фонон-электронное взаимодействия, рассеяние на границах). Однако, приводимые в работах [1–3] результаты измерений теплопроводности Вi при низких температурах заметно различаются.

Так, по измерениям Шалыта и др. [1] теплопроводность образцов диаметром $d = 2,5$ мм достигает максимума при температуре $T \approx 4^\circ\text{K}$ и с понижением температуры уменьшается по закону $K \sim T^{2,6}$ (рис.1, кривая 1). В то же время по данным Багата и др. [2] в интервале температур $1,3 \div 2^\circ\text{K}$ температурная зависимость K близка к $K \sim T^{3,1}$ (рис.1, кривая 2). Кроме того, при 2°K теплопроводность вдвое выше, чем в работе [1] при той же температуре.

Мы исследовали теплопроводность Вi при $T = 1,3 \div 6^\circ\text{K}$. Образцы

($d = 2,5 \text{ мм}$, $l = 50 \text{ мм}$) выращивались в разборной графитовой форме. Термометрами служили угольные сопротивления. Точность измерения T составляла 1%, погрешность в определении K не превышала 2%. Результаты наших измерений приведены на рис.1 (кривая 3). При $T \geq 4^\circ\text{K}$ наши данные совпадают с результатами [1], однако максимальная величина K превосходит максимальную теплопроводность лучших из известных образцов других авторов, а положение максимума сдвинуто в область более низких температур. В интервале $1,3 \div 2,5^\circ\text{K}$ $K \sim T^{3,15 \pm 0,07}$, т.е. температурная зависимость K близка к наблюдавшейся в работе [2] для образцов той же кристаллографической ориентации.

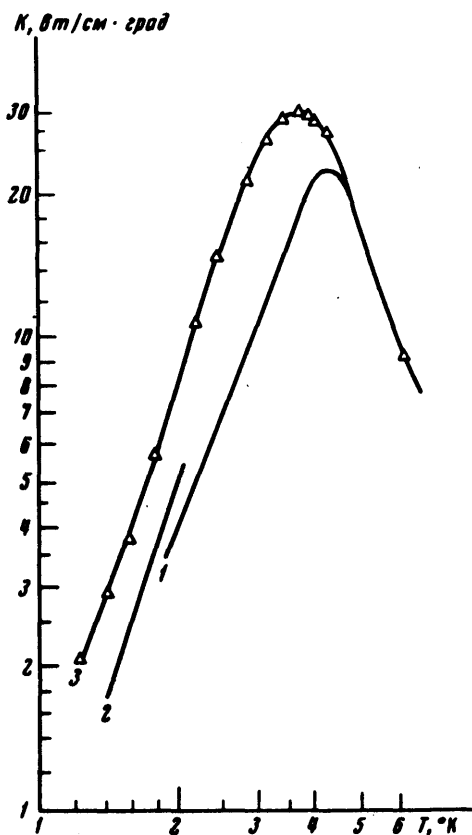


Рис. Температурная зависимость теплопроводности: 1 – данные работы [1], 2 – данные работы [2], 3 – результаты наших измерений (для всех кривых $\nabla T \perp C_3$)

При оценке влияния различных механизмов рассеяния фононов на процессы переноса тепла в кристаллической решетке удобно рассматривать температурную зависимость эффективной длины свободного пробега фононов $l_{эфф}$ (рис.2), определяемой по формуле

$$K = 1/3 C_s l_{эфф},$$

где $C = 5,5 \cdot 10^{-5} T^3 \text{ дж/см}^3 \cdot \text{град}$, теплоемкость на единицу объема, $s = 1,1 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ – дебаевская скорость звука в Bi .

Из теоретического рассмотрения [4] следует, что при самых низких температурах, когда тепловое сопротивление решетки обусловлено рассеянием фононов на границах, $\ell_{\text{эфф}}$ не зависит от температуры ($\ell_{\text{эфф}} \approx d$, где d – характерный размер образца). С повышением температуры, когда становится существенным неупругое рассеяние фононов в объеме образца (на фононах, на электронах, на дефектах кристаллической структуры), $\ell_{\text{эфф}}$ уменьшается с повышением температуры.

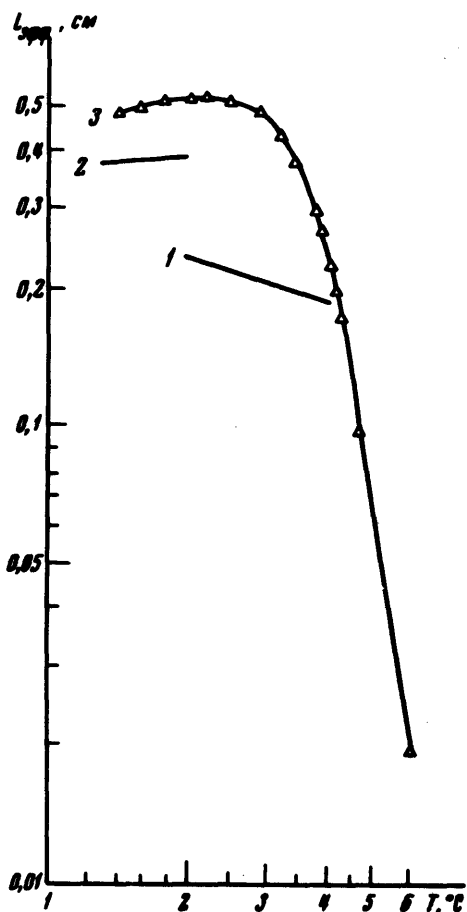


Рис.2. Температурная зависимость длины свободного пробега (обозначения кривых те же, что и на рис.1)

Небольшое уменьшение $\ell_{\text{эфф}}$, вычисленной по данным [1], (кривая 1) с ростом T в интервале $2,5 \pm 4^\circ\text{K}$ можно объяснить рассеянием фононов на несовершенствах кристаллической решетки.

Гораздо трудней объяснить рост $\ell_{\text{эфф}}$ при $T = 1,4 \pm 2,5^\circ\text{K}$, наблюдавшийся в наших измерениях и в работе [2]. Авторы [2] увеличение $\ell_{\text{эфф}}$ с ростом T связывают с влиянием фонон-электронного взаимодействия на теплопроводность. Длину свободного пробега фононов в Bi при рассеянии их на электронах ℓ_{pe} можно оценить, воспользовавшись результатами измерений температурной зависимо-

сти длины свободного пробега электронов ($\ell_{e\rho} \approx 1,5/T^2$ см) [5] и соотношением $n_p/\tau_{pe} = n_e/\tau_{ep}$ (при этом считается, что рассеяние фононов на электронах и электронов на фононах одинаково эффективно, поскольку при $T \leq 2^\circ\text{K}$ размеры фононной сферы и фермиевского эллипсоида – величины одного порядка): $\ell_{pe} \approx 0,15 T^2$ $\ell_{ep} = 0,15$ см. Таким образом, $\ell_{pe} \approx d$ и не зависит от температуры, что не позволяет объяснить наблюдаемый рост $\ell_{\text{эфф}}$ с температурой.

С другой стороны, по данным [1] время релаксации при нормальных столкновениях между фононами в Bi $\tau_{pp}^N \approx 10^{-9}$ см при 8°K и растет $\sim T^{-4}$ с понижением температуры. Отсюда, при 2°K эффективная длина свободного пробега фононов при нормальных столкновениях примерно на порядок меньше диаметра образца ($\ell_{pp}^N \approx 0,02$ см) и всех характерных фононных длин.

В диэлектрических кристаллах в случае, когда тепловое сопротивление возникает из-за рассеяния фононов на границах образца ($d \ll \ell^R$, где ℓ^R – длина пробега фонона между столкновениями в объеме с потерей квазимпульса), частые нормальные столкновения ($\ell_{pp}^N \ll d$) приводят к возникновению гидродинамического течения фононного газа ($\ell_{\text{эфф}} \approx d^2/\ell_{pp}^N \gg d$), проявляющегося в изменении величины и температурной зависимости теплопроводности. Из приведенных выше оценок следует, что в Bi при гелиевых температурах $\ell_{pp}^N \ll d \sim \ell_{pe}$, т.е. существенному росту $\ell_{\text{эфф}}$ препятствует рассеяние фононов на электронах. Таким образом, наблюдавшуюся в наших экспериментах более сильную, чем кубическую зависимость теплопроводности от температуры при $T \leq 2,5^\circ\text{K}$ (и, соответственно, рост $\ell_{\text{эфф}}$ в интервале $1,3 \div 2,5^\circ\text{K}$) можно объяснить влиянием частых нормальных столкновений между фононами в объеме образца.

Интересно отметить, что поскольку условие $\ell_{pp}^N \ll \ell^R$ достаточно хорошо выполняется для совершенных образцов Bi при гелиевых температурах в таких кристаллах, в принципе, может распространяться "второй звук" (т.е. слабо затухающие температурные волны) в газе фононов. В настоящее время мы ведем исследования в этом направлении.

Авторы признательны В.Т.Долгополову за ценные дискуссии и Э.И.Рашбе за стимулирующую критику.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 апреля 1971 г.
После переработки
31 мая 1971 г.

Литература

- [1] М.Е.Кузнецов, В.С.Оскотский, В.И.Польшин, С.С.Шалыт. ЖЭТФ, 57, 1112, 1969.
[2] S.M.Bhagat, P.D.Manchon. Phys. Rev., 164, 966, 1967.

- [3] C.Grenier, J.M.Reynolds, I.R.S.Sybert. Phys. Rev., 132, 58, 1963.
[4] H.B.G.Casimir. Physica, 5, 495, 1938.
[5] В.Ф.Гантмахер, Ю.С.Леонов. Письма в ЖЭТФ, 8, 264, 1968.
[6] Р.Н. Гуржи. УФН, 94, 689, 1968.
-