

ГИРОТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ В КРИСТАЛЛАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б.Н. Шкловский, А.Л. Эфрос

Цель этой работы – привлечь внимание к новому эффекту, заключающемуся в том, что под действием градиента температуры кристалл может вращаться. Например, если на концах длинного стержня с теплоизолированной боковой поверхностью создать разность температур, то стержень приобретет момент количества движения M , направленный вдоль его оси и пропорциональный возникшему потоку тепла q

$$M = \beta q. \quad (1)$$

Величину M мы назовем гиротепловым коэффициентом стержня.

Как показано в работах [1, 2], при низких температурах фононный газ, осуществляя перенос тепла по длинному стержню – вращается, т. е. его линии тока образуют спирали обвивающие ось стержня. Вращение фононов в идеальном кристалле не приводит к вращению тела как целого. Это видно, например, из того, что тензор плотности потока импульса кристалла с тепловым потоком симметричен [1]. Как указывалось в [3] при низких температурах дефекты и примеси в квантовых кристаллах следует рассматривать как квазичастицы. Если их атомная концентрация мала, они слабо влияют на движение фононов

и увлекаются ими, приобретая дрейфовую скорость $v_i = v_p \left(1 + \frac{\tau_{ip}}{\tau_{ib}} \right)^{-1}$,

где v_p – дрейфовая скорость фононов, а τ_{ip} и τ_{ib} – времена релаксации примесей на фононах и границах. (Для определенности мы будем говорить о примесях, хотя все сказанное применимо и к дефектам). Вращающиеся фононы сообщают примесям момент количества движения порядка $m_i v_i d$ на атом примеси. Здесь m_i – масса примеси, d – поперечный размер стержня. Согласно закону сохранения момента количества движения кристаллическая решетка приобретает момент, равный по величине и обратный по знаку. Соответствующая ему угловая скорость по порядку величины есть $c \frac{v_i}{d}$, где c – отношение полной массы примесей к массе всего стержня. При достаточно больших градиентах температуры v_i может приближаться к скорости звука. Поэтому, несмотря на необходимую малость c эффект может быть большим (значительно больше эффекта Эйнштейна – де Гааза). Предыдущие оценки относились к случаю очень низких температур, когда неопределенность в энергии примеси $\hbar \tau_{ip}^{-1}$ мала по сравнению с шириной примесной зоны. В обла-

сти более высоких температур, когда выполняется обратное неравенство, волновая функция примеси не успевает расплываться по зоне и локализована на узле [3]. При этом увлечение примесей фононами значительно уменьшается. Дальнейшее повышение температуры делает существенными надбарьерные переходы, так что коэффициент диффузии возрастает как $\exp \left(- \frac{u}{T} \right)$, где

u — высота барьера. Эффект вращения в этой области также возрастает. Угловая скорость по порядку величины есть $c v_p d^{-1} \exp(-\frac{u}{T})$, поскольку увлекаются только надбарьерные частицы. Тем не менее, эффект наблюдаем и в этой области. Соображения симметрии накладывают некоторые ограничения на существование соотношения (1). Так как при отражениях M и q преобразуются как компоненты псевдовектора и вектора соответственно, коэффициент β обращается в ноль если в кристалле есть плоскость симметрии, перпендикулярная оси стержня, или есть плоскость симметрии, проходящая через ось стержня и являющаяся плоскостью симметрии его сечения или, наконец, если кристалл имеет центр симметрии и сечение также центросимметрично.

Работы [1, 2] относились к случаю гидродинамического режима теплопроводности, т. е. к тому диапазону температуры, в котором длина свободного пробега фононов по отношению к нормальным столкновениям l_N мала по сравнению с d , а процессами переброса можно пренебречь. Причиной вращения является нелокальная связь между потоком тепла и градиентом температуры. Нелокальность, разумеется, имеет место и в бесстолкновительном режиме, когда $l_N \gg d$. Таким образом, вращение сохраняется при сколь угодно низких температурах. В твердом гелии для образцов обычных размеров вращение должно существовать при $T < 1^\circ\text{K}$. К сожалению, мы не можем точно предсказать величину вращательного момента, так как степень локализации примесей при этих температурах не известна. Измерение гиротеплового эффекта может пролить свет на этот вопрос.

В заключение заметим, что кроме описанного выше гиротеплового эффекта, существует гирозлектрический эффект. Он состоит в том, что при протекании электрического тока по монокристаллическому металлическому стержню в бесстолкновительном или гидродинамическом режиме [2, 4] стержень приобретает вращательный момент. Подобно фононам, электронный газ, двигаясь вдоль стержня вращается, а вследствие сохранения момента количества движения кристаллическая решетка вращается в обратную сторону. Регистрировать этот эффект вероятно удобнее не по вращению стержня, а по магнитному полю, направленному вдоль оси стержня и создаваемому вращающимися электронами. Это поле может быть значительным, так как длинный стержень эквивалентен соленоиду с большим числом витков.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 января 1970 г.

Литература

- [1] А.Л.Эфрос. ЖЭТФ, 54, 1764, 1968.
- [2] Х.Нильсен, Б.И.Шкловский. ФТТ, 10, 3602, 1968.
- [3] А.Ф.Андреев, И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 56, 2057, 1969.
- [4] Р.Н.Гуржи. ЖЭТФ, 47, 1415, 1964.