Влияние фокусировки фононов на теплопроводность упруго анизотропных кристаллов при низких температурах

Кулеев И.Г., Кулеев И.И., Бахарев С.М.

Институт физики металлов УрО РАН, 620990, Екатеринбург, Россия

DOI 10.34077/Semicond2019-55

Рассмотрено влияние фокусировки на распространение и граничное рассеяние фононов в монокристаллических образцах с квадратным и прямоугольным сечениями и дано физическое объяснение эффектам МакКарди [1]. Рассчитаны отношения теплопроводностей образцов с квадратным сечением для симметричных направлений, характеризующие первый эффект МакКарди в упруго анизотропных кристаллах. Показано, что первый эффект обусловлен медленной поперечной модой, фокусировка которой обеспечивает максимум теплопроводности. При этом отношения теплопроводностей в кубических кристаллах с положительной $k-1 > 0$ ($k-1 = (c_{12} + 2c_{44} - c_{11}) / (c_{11} - c_{44})$, где c_{ij} – упругие модули второго порядка) и отрицательной $k-1 < 0$ анизотропией упругих модулей второго порядка качественно отличаются. Во всех кристаллах первого типа максимум теплопроводности достигается в направлении [001], а минимум – в направлении [111], тогда как в кристаллах второго типа – наоборот: максимум – в направлении [111], а минимум – в направлении [001]. Для большинства наиболее актуальных для технических приложений полупроводников первого типа таких, как Ge, Si, GaAs, GaSb, LiF, InSb, HgSe, MgO, с теми же геометрическими параметрами образцов, что и в [1], при $T=3\text{K}$ максимальная анизотропия теплопроводности достигает 50%. Для кристаллов второго типа NaCl, PbS, SrF₂ величины теплопроводности в направлении [111] на 30%, а для CaF₂, на 40% больше, чем в направлении [001] (см. подробнее [2]).

Рассчитан второй эффект МакКарди, который определяется отношением теплопроводностей образцов с прямоугольным сечением, имеющих одинаковое направление градиента температуры [110], но различную ориентацию широких граней {001} или {110}. Для таких образцов основной вклад в теплосопrotивление вносит рассеяние фононов на широких гранях образца (см. [3-4]). Нами проанализировано распределение теплового потока по поперечному сечению образца, перпендикулярному широким граням образца и показано, что второй эффект обусловлен фокусировкой быстрой поперечной моды в кристаллах обоих типов. Этот эффект качественно отличается в кристаллах с различным типом анизотропии упругой энергии. Для направления градиента температуры [110] теплопроводность образцов первого типа с отношением ширины к толщине пластины $\mu=3.45$ и геометрическими параметрами, как в [1], оказалась на 30% больше для ориентации широких граней {100}, чем для ориентации {110}. Показано, что увеличение параметра μ от 3.45 до 10 приводит к увеличению второго эффекта МакКарди в два раза (см. [2]). В кристаллах второго типа – ситуация обратная: теплопроводность для образцов с широкой гранью {001} будет меньше, чем для образцов с широкой гранью {110}. Хотя величина эффекта заметно меньше чем в кристаллах первого типа, однако увеличение отношения ширины пластины к ее толщине приводит к значительному возрастанию величины эффекта (см. подробнее [2]). Можно надеяться, что эта работа будет полезна в технических приложениях при конструировании полупроводниковых приборов.

[1] A.K. McCurdy, H.J. Maris, and C. Elbaum. *Phys. Rev. B*, **2**, 4077 (1970).

[2] И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, С.М. Бахарев. *ФТП*, **52**, 1543, (2018)

[3] И. Г. Кулеев, И.И. Кулеев, С.М. Бахарев, В. В. Устинов. *Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах. «Издательство УМЦ УПИ»*, Екатеринбург, (2018), 256 с.

[4] E.H. Sondheimer. *Adv. Phys.*, **1**, 1 (1952).