

Кинетические эффекты в полупроводниковых кристаллах германия, кремния и алмаза с различным изотопическим составом

Кулеев И.Г., Кулеев И.И.



Развит новый подход к описанию релаксации импульса в неравновесной фононной системе. На основе предложенного метода проанализирована теплопроводность, термоэдс и поглощение ультразвука кристаллов германия и кремния с различным изотопическим составом.

Изучение физических процессов, определяющих электрический и тепловой транспорт в кристаллах германия, кремния и алмаза с различным изотопическим составом, является важным как с фундаментальной, так и практической точки зрения. Максимальные значения теплопроводности этих кристаллов существенно возрастают с уменьшением изотопического беспорядка. Поэтому использование изотопически обогащенных кристаллов в качестве подложек для микросхем позволило бы существенно увеличить стабильность работы микропроцессоров и значительно увеличить плотность элементов в микросхемах за счет более быстрого отвода тепла. Максимальные величины теплопроводности этих кристаллов в значительной степени зависят от механизма релаксации импульса фононов различных колебательных ветвей в ангармонических процессах рассеяния. Для исследования влияния этих процессов на кинетические эффекты в изотопически модифицированных кристаллах германия, кремния и алмаза нами развит новый подход к описанию релаксации импульса в неравновесной фононной системе [1]. В предложенном методе в неравновесной фононной системе выделяются подсистемы продольных и поперечных фононов, учитывается перераспределение импульса фононов в нормальных процессах фонон-фононного рассеяния как внутри каждой колебательной ветви, так и между различными колебательными ветвями фононов. В этом приближении неравновесность фононной системы описывается шестью параметрами: частотами релаксации фононов в резистивных и нормальных процессах рассеяния и средними скоростями дрейфа для каждой

из ветвей фононного спектра. Описание неравновесной фононной системы в расширенном базисе позволяет более корректно исследовать особенности релаксации импульса квазичастиц и их влияние на кинетические эффекты.

На основе предложенного метода проанализирована теплопроводность кристаллов германия и кремния с различным изотопическим составом для двух вариантов релаксации импульса фононов в ангармонических процессах рассеяния [2,3]. Рассмотрено влияние перераспределения импульса фононов в нормальных процессах рассеяния как внутри каждой колебательной ветви (обобщенная модель Каллавея), так и между различными колебательными ветвями фононов (механизм Херринга) на дрейфовое движение фононов и решеточную теплопроводность. Показано, что механизм Херринга, обуславливающий перераспределение импульса между продольными и поперечными фононами, приводит к существенному подавлению дрейфового движения продольных фононов и является эффективным механизмом, ограничивающим максимальные значения теплопроводности в изотопически чистых кристаллах. Предложенная модель перераспределения импульса фононов в ангармонических процессах рассеяния Херринга позволила описать экспериментальные данные по теплопроводности кристаллов Ge и Si с различным изотопическим составом более адекватно, нежели использованная ранее обобщенная модель Каллавея (см. рис. 1).

На основе предложенного подхода развита теория увлечения электронов фононами, учитывающая особенности релаксации импульса фо-

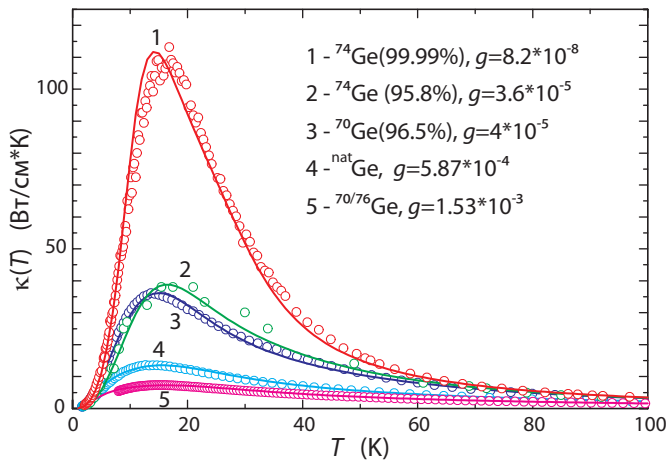


Рис.1

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для кристаллов Ge с различным составом изотопов

нонов в нормальных процессах фонон-фононного рассеяния и дано качественное объяснение изотопического эффекта в термоэдс увлечения в кристаллах германия при низких температурах [4]. Экспериментальные данные показывали, что абсолютные значения термоэдс возрастали более чем в два раза в изотопически высокообогащенных кристаллах германия, тогда как в теории херринговского увлечения термоэдс оказывалась нечувствительной к изотопическому обогащению. Из проведенных нами исследований следует, что изотопический эффект в термоэдс увлечения связан с дрейфовым движением фононов, которое оказывается весьма чувствительным к изотопическому беспорядку в кристаллах германия.

Исследование влияния изотопического беспорядка на поглощение ультразвука в изотопически модифицированных кристаллах германия, кремния и алмаза позволило получить два важных результата [5]. Во-первых, предсказан «гигантский» изотопический эффект в коэффициенте поглощения ультразвука в этих кристаллах, в отличие от изотопического эффекта в теплопроводности и термоэдс. Так, например, величина объемного коэффициента поглощения ультразвука может уменьшаться более чем в 7000 раз при переходе от кристаллов германия с природным составом изотопов к изотопически обогащенным до 99.99% по изотопу ^{70}Ge . Рассмотрена возможность экспериментального наблюдения

этого эффекта. Во-вторых, показано, что для изотопически разупорядоченных кристаллов германия, кремния и алмаза с природным составом коэффициенты поглощения поперечного ультразвука являются монотонно возрастающими функциями волнового вектора ультразвуковой волны. В этих кристаллах доминирует рассеяние ультразвука на изотопическом беспорядке, и особенности коэффициента поглощения, связанные с ангармоническими процессами рассеяния, не проявляются. В противоположность этому, для высокообогащенных кристаллов, таких как ^{70}Ge (99.99%), ^{28}Si (99.983%) и для кристаллов алмаза ^{12}C (99.99%) доминируют ангармонические процессы рассеяния, и зависимости коэффициентов поглощения ультразвука от приведенного волнового вектора $z = \hbar\omega_{\text{qt}}/k_{\text{B}}T$ качественно меняются. Они приобретают немонотонный характер с двумя максимумами и двумя минимумами (рис. 2).

Указаны область изотопического обогащения, область температур и волновых векторов ультразвуковой волны, где рассчитанные нами особенности коэффициентов поглощения ультразвука наиболее значительны. Полученные результаты открывают новое направление исследований динамики фононов и физических свойств изотопически модифицированных кристаллов германия, кремния и алмаза.

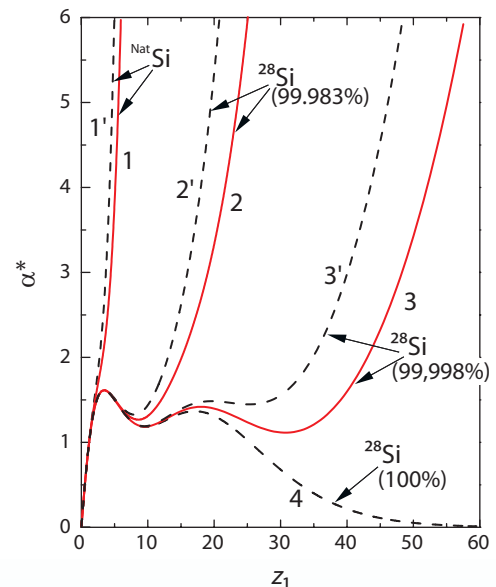


Рис.2

Зависимость коэффициента поглощения ультразвука от приведенного волнового вектора для кристаллов кремния

¹ И.Г. Кулеев, ФТТ 42 (2000) 649; ФТТ 44 (2002) 215.

² И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, ЖЭТФ 120 (2001) 649.

³ И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, ЖЭТФ 121 (2002) 558.

⁴ И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев, А. Н. Талденков, А. В. Инюшкин, В. И. Ожогин, К. Ито, Ю. Халлер, ЖЭТФ 123 (2003) 1227.

⁵ И.Г. Кулеев, И.И. Кулеев, А.В. Инюшкин, В. И. Ожогин. ЖЭТФ 128, (2005) 370