

Влияние дислокаций на теплопроводность монокристаллов германия

Мальшикина О.В.¹, Каплунов И.А.¹, Рогалин В.Е.², Кропотов Г.И.³

¹ТвГУ, 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33

²ИЭЭ РАН, 191186, Санкт Петербург, Дворцовая наб. 18

³ООО «Тидекс», 194292, Санкт Петербург, ул. Кавалергардская, д. 6

До недавнего времени считалось, что теплопроводность является константой материала, зависящей от параметров окружающей среды, прежде всего от температуры. В инженерных расчетах обычно использовалось справочное значение, полученное при первоначальном исследовании материала, что в ряде случаев не соответствовало действительности. Развитие силовой электроники и оптики выявило необходимость получения материалов с высокой теплопроводностью и это привело к более тщательному изучению этого параметра с целью выявления возможностей его увеличения.

Основной вклад в теплопроводность Ge вносит фононная составляющая. Свойства фононов заметно зависят от различных структурных дефектов, однако это чаще всего проявляется при низких температурах. Известно влияние изотопического беспорядка на теплопроводность Ge; изотопически чистый Ge при низких температурах имеет теплопроводность в 8.5 раза выше Ge природного состава. Из общих соображений понятно, что дислокации, будучи дефектом кристаллической решетки, должны оказывать влияние на фононные процессы, числу которых относится теплопроводность.

Измерения теплофизических характеристик проводились с использованием метода TSW (Thermal square wave method at single-frequency). В импульсном режиме были измерены значения коэффициентов теплопроводности и тепловой диффузии. Нагрев образцов осуществлялся непрерывным ИК лазером длиной волны 940 нм с мощностью на образце 74 мВт. Излучение модулировалось прямоугольными импульсами с помощью преобразователя мощности. Частота модуляции в экспериментах составляла 0,1 Гц, и в этом случае отклонения от стационарного случая являются незначительными.

Были сопоставлены тепловые характеристики кристаллов Ge, ориентированных в направлении $\langle 111 \rangle$ — дислокационного ($N_d=10^4 \text{ см}^{-2}$; $\rho = 0.75 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, концентрация примеси $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и бездислокационного (БД, $\rho = 0.01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, концентрация примеси $4.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) (таблица 1).

Таблица 1 – Теплофизические характеристики Ge		
Ge	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Коэффициент тепловой диффузии, м ² /с
дислокационный	50	$5.0 \cdot 10^{-6}$
БД	230	$6.0 \cdot 10^{-6}$

Возникновение неравновесных носителей заряда при воздействии лазерного излучения и их высокая концентрация не оказывают существенного воздействия на теплопроводность. Вклад в теплопроводность фононной составляющей в полупроводниках существенно выше, чем вклад носителей заряда (собственных или примесных); в Ge это различие составляет несколько порядков.

Теплопроводность исследуемого дислокационного Ge в 4.6 раза меньше, чем измеренные значения данного параметра в БД Ge, и при этом тепловой поток в процессе измерений совпадал с преимущественным направлением дислокаций в кристалле. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают существенное влияние структуры (в частности, наличия дислокаций) на фононные процессы в кристаллических материалах.

Работа выполнена в рамках государственных заданий по научной деятельности № FFGR-2022-0007, № 0817–2023–0006 с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ и ООО «Тидекс».