

УДК 536.2

Анизотропия теплопроводности наноструктур теллурида кадмия

М. В. САВВАТЕЕВА*, канд. техн. наук А. В. НОВОТЕЛЬНОВА

Университет ИТМО

*E-mail: mashanyasav@mail.ru

Композиционные материалы, содержащие нанотрубки CdTe, представляют значительный интерес и могут найти применение в электронике и фотонике. Данные об анизотропных тепловых свойствах нанотрубок CdTe и композитов их на базе необходимы для разработки наноразмерных электронных устройств. В данной работе проведены аналитические оценки влияния диаметра нанотрубок и температуры на анизотропию теплопроводности. Для оценки эффективной теплопроводности бездефектных одностенных наносвитков CdTe и влияния температуры на анизотропию коэффициента теплопроводности использован метод теории обобщенной проводимости. Метод предполагает рассмотрение теплообмена в дисперсной среде в рамках одной элементарной репрезентативной ячейки, моделирующей основные черты переноса тепла в среде в целом. Исследованы теплофизические свойства двумерных наноллистов CdTe, выращенных коллоидным методом, толщиной около 1 нм, равномерно сворачивающихся вдоль направления, образующих многослойные свиткообразные нанотрубки. Проведена оценка эффективной теплопроводности бездефектных одностенных наносвитков CdTe в продольном и поперечном направлениях относительно оси свертывания. В результате выявлена зависимость эффективной теплопроводности композитного материала от его диаметра и показано, что при увеличении диаметра наносвитков теплопроводность в продольном направлении нанотрубки падает за счёт уменьшения доли высокотеплопроводной стенки теллурида кадмия CdTe. Теплопроводность нанотрубки в поперечном направлении, более низкая по сравнению с теплопроводностью в продольном направлении. При увеличении диаметра нанотрубок от 5 нм до 30 нм продольная теплопроводность снижается от 5,7 до 1,2 Вт/(м·К), при этом поперечная теплопроводность изменяется в пределах от 1,5 до 0,6 Вт/(м·К). Проведена оценка влияния диаметра и температуры на анизотропию коэффициента теплопроводности наносвитков CdTe. Показано, что с повышением температуры коэффициент анизотропии теплопроводности снижается.

Ключевые слова: нанотрубки, наносвитки, теллурид кадмия, теплопроводность, анизотропия, метод обобщенной проводимости, моделирование.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.03.2025, одобрена после рецензирования 10.04.2025, принята к печати 16.04.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-110-117

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Савватеева М. В., Новотельнова А. В. Анизотропия теплопроводности наноструктур теллурида кадмия. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 110–117. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-110-117

Anisotropy of thermal conductivity for cadmium telluride nanostructures

M. V. SAVVATEEVA*, Ph. D. A. V. NOVOTELNOVA

ITMO University

*E-mail: mashanyasav@mail.ru

Composite materials containing CdTe nanotubes are of considerable interest and can be used in electronics and photonics. Data on the anisotropic thermal properties of CdTe nanotube-based composites are necessary for the development of nanoscale electronic devices. In this work, we analytically evaluated the effects of nanotube diameter and temperature on the anisotropy of thermal conductivity. A generalized conductivity theory method has been used to evaluate the effective thermal conductivity of defect-free single-walled CdTe nanoscroll and the effect of temperature on the anisotropy of the thermal conductivity coefficient. The method assumes analyzing heat transfer in a dispersed medium within one elementary representative cell modelling the main features of heat transfer in the medium as a whole. Thermophysical properties of two-dimensional CdTe nanosheets grown by colloidal method, about 1 nm thick, uniformly coiled along the direction forming multilayer scroll-shaped nanotubes have been investigated. The effective thermal conductivity of defect-free single-walled CdTe nanoscroll in the longitudinal and transverse directions relative to the coiling axis was evaluated. As a result, the dependence of the effective thermal conductivity of the composite material on its diameter is revealed and it is shown that the thermal conductivity in the longitudinal direction of the nanotube decreases as the nanoroll diameter increases due

to a decrease in the fraction of the highly thermally conductive wall of cadmium telluride CdTe. The thermal conductivity of the nanotube in the transverse direction is lower compared to the thermal conductivity in the longitudinal direction. When the nanotube diameter increases from 5 nm to 30 nm, the longitudinal thermal conductivity decreases from 5.7 to 1.2 W/(m·K), while the transverse thermal conductivity varies from 1.5 to 0.6 W/(m·K). The influence of diameter and temperature on the anisotropy of the thermal conductivity coefficient of CdTe nanoscroll has been evaluated. It is shown that the anisotropy of the thermal conductivity coefficient decreases with increasing temperature.

Keywords: nanotubes, nanoscrolls, cadmium telluride, thermal conductivity, anisotropy, generalised conductivity method, modelling.

Article info:

Received 13/03/2025, approved after reviewing 10/04/2025, accepted 16/04/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-110-117

Article in Russian

For citation:

Savvateeva M. V., Novotelnova A. V. Anisotropy of thermal conductivity for cadmium telluride nanostructures. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 110-117. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-110-117

Введение

Современные технологии требуют постоянного совершенствования материалов, используемых в различных отраслях, от аэрокосмической [1] и строительной [2, 3] до электронной [4]. Композитные материалы, обладающие уникальными свойствами, становятся все более популярными благодаря своей легкости, прочности и способности адаптироваться к специфическим условиям эксплуатации [5].

Разработка композитных материалов с контролируемыми теплофизическими характеристиками позволяет не только улучшить эксплуатационные свойства материалов, но и оптимизировать производственные процессы. Это особенно актуально в условиях растущих требований к энергоэффективности, экологичности и устойчивости к внешним воздействиям.

Для оценки теплофизических свойств композитных материалов с нанотрубками необходимо знание коэффициента теплопроводности нанотрубок как в продольном $\lambda_{\parallel}$, так и в поперечном направлении $\lambda_{\perp}$. Метод обобщенной проводимости [6, 7] может быть одним из эффективных инструментов для быстрого анализа теплофизических характеристик композитов. Метод предполагает рассмотрение теплообмена в дисперсной среде в рамках одной элементарной ячейки, моделирующей основные черты переноса тепла в среде в целом. Решаемая с помощью теории обобщенной проводимости, задача сводится к установлению эффективных характеристик гетерогенных систем по известным свойствам фазовых составляющих и сведениям об их структуре.

Метод обобщенной проводимости позволяет оценивать теплопроводность и другие связанные с ней параметры, что помогает оптимизировать состав и структуру материалов и получать прогнозные значения свойств новых материалов, для которых экспериментальные данные отсутствуют или получение их технически затруднено.

Одним из перспективных материалов может стать композиционный материал на основе бездефектных одностенных нанотрубок CdTe со структурой свитка-рулона [8]. Такие композиты представляют значительный интерес и могут найти применение в электронике и фотонике. С их помощью можно разработать активные светоизлучающие матрицы для дисплеев, которые уменьшат

энергопотребление и увеличат яркость и контрастность устройства.

Эти объекты представляют собой получаемые коллоидным методом нанолиты CdTe, размером в сотни нанометров с толщиной в один нанометр, при применении особого вида стабилизаторов — тиолов, сворачиваются в однородные трубки. Присоединение молекул тиола к поверхности листа вызывает механические напряжения, которые заставляют лист сворачиваться в определенном кристаллографическом направлении. Свертывание происходит одновременно у всех наночастиц, а радиус свертка одинаков для всех наноструктур. Толщина стенки нанотрубки, равна расстоянию между слоями, $b=1$ нм, диаметры наносвитков D составляют от 5 до 30 нм [8].

Теплофизические свойства данных наноструктур сегодня пока что не исследованы. Их экспериментальная оценка при современной приборной базе не представляется возможным. Таким образом, теплофизические свойства могут быть оценены аналитическим путем, чему и посвящена настоящая работа.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является оценка теплопроводности нанообъектов со структурой свитка-рулона из теллурида кадмия, влияющей на теплофизические характеристики создаваемых композитных материалов в различных областях промышленности (аэрокосмическая, строительная, электронная).

Задачи работы включают в себя:

1. Изучение влияния структурных особенностей наносвитков из теллурида кадмия (например, диаметр, толщина стенок) и температуры на теплофизические характеристики композитных материалов в температурном диапазоне 300–400 К.
2. Оценка и анализ теплопроводности наносвитков из теллурида кадмия в продольном и поперечном направлениях потока тепла.
3. Изучение влияния геометрических характеристик наносвитков из теллурида кадмия на анизотропию теплопроводности.
4. Анализ возможностей использования результатов исследований в разработку композитных материалов для

специализированных приложений, таких как электроника и фотонные устройства.

Эти цели и задачи направлены на создание инновационных решений в области разработки композитных материалов с высокой эффективностью и устойчивостью к различным внешним воздействиям.

Модель и метод

Для оценки эффективной теплопроводности наносвитков CdTe использован метод теории обобщенной проводимости. Метод предполагает рассмотрение теплообмена в дисперсной среде в рамках одной элементарной репрезентативной ячейки, моделирующей основные черты переноса тепла в среде в целом. Этот метод используется для оценки теплофизических свойств композитных материалов с гетерогенными структурами и позволяет учитывать влияние формы, размера и расположения включений, и их термических свойств на теплопроводность. С его помощью можно моделировать взаимодействие между различными компонентами композита, что критически важно для понимания того, как распределение и ориентация фаз влияют на теплопроводность. Это особенно актуально для материалов с неоднородной структурой.

Для расчетов использована методика, описанная в [9]. Она позволяет получить прогнозные приближенные оценки абсолютных значений теплопроводности в продольном и поперечном направлениях относительно оси свертывания нанотрубки, а также оценить анизотропию эффективной теплопроводности.

Упрощенная модель нанотрубки, использованная при математическом моделировании приведена на рис. 1. Элементарная ячейка длиной L_1 имеет квадратное поперечное сечение со стороной квадрата L_2 .

Для сохранения относительных размеров получим формулу для определения стороны поперечного сечения квадратной модели L_2 .

$$L_2 = \frac{D\sqrt{\pi}}{2} \quad (1)$$

где D — внешний диаметр наносвитка CdTe.

Расчет производится в предположении о параллельном переносе тепловой энергии вдоль стенок трубки [10] из теллурида кадмия CdTe. Теплоперенос осуществляет-

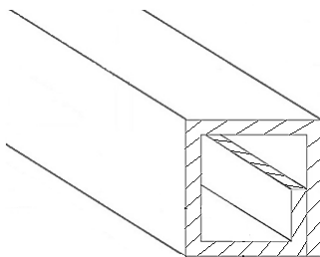


Рис. 1. Упрощенная модель структуры одностенного наносвитка CdTe с равной площадью квадратного поперечного сечения, толщиной стенки $b=1$ нм
Fig. 1. Simplified model for the structure of a single-walled CdTe nanowire with equal square cross-sectional area, wall thickness $b=1$ nm

ся с помощью кондуктивного переноса вдоль стенки нанотрубки с учетом коэффициента теплопроводности теллурида кадмия λ_{CdTe} [11]. В объеме ее внутренней полости нанотрубки происходит молекулярный перенос в воздухе и лучистый перенос с учетом коэффициента теплопроводности воздуха $\lambda_{\text{в}}$, равного $0,026$ Вт/(м·К) [12, 13].

Описание эксперимента и его результаты

Эффективная теплопроводность наносвитка CdTe в продольном (вдоль нанотрубки) направлении $\lambda_{\parallel}$ рассчитывается как сумма произведений относительных долей площади CdTe и воздуха в поперечном сечении на их коэффициенты теплопроводности.

Примем $L=1$ (наносвитки единичной длины), в результате получим:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\text{CdTe}} S_{\text{CdTe}} + \lambda_{\text{в}} S_{\text{в}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{CdTe}} + S_{\text{в}} = 1$; S_{CdTe} — относительная площадь листа теллурида кадмия в поперечном сечении нанотрубки; $S_{\text{в}}$ — относительная площадь сечения газовой полости внутри нанотрубки, вычисляемая по формуле:

$$S_{\text{в}} = \frac{(L_2 - 2b)^2 - b \left(\frac{L_2}{2} - b \right)}{L_2^2}. \quad (3)$$

Теплопроводность полости, заполненной воздухом, $\lambda_{\text{в}}$ оценивается как теплопроводность в порах гетерогенных материалов λ_g , заполненных прозрачным для излучения веществом [14]:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda_g}{1 + \frac{B}{H \cdot L_2}} + 4\epsilon\sigma_0 T^3 D, \quad (4)$$

здесь ϵ — степень черноты CdTe, равная 1; σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); B — параметр взаимодействия воздуха с поверхностью, зависящий от показателя адиабаты воздуха C_p/C_v , коэффициента accommodation α_i молекул воздуха к поверхности и средней длины свободного пробега молекул в воздухе $\Lambda_{\text{в}}$, равный $1,75 \cdot 10^4$; H — давление воздуха, равное 760 мм. рт. ст.

Для приближенной оценки теплопроводности одностенных наносвитков CdTe со структурой свитка-рулона в поперечном направлении используем приёмы расчёта, развитые в теории обобщенной проводимости [6, 7] для аналитической оценки предельных (максимальных и минимальных) значений теплопроводности макро-, и микрокомпозиционных материалов.

Формула для расчета эффективной теплопроводности одностенного наносвитка CdTe в поперечном направлении при разбиении адиабатическими плоскостями $\lambda_{a_{\text{eff}}}$:

$$\lambda_{a_{\text{eff}}} = \frac{\sigma_a L_2}{S}. \quad (5)$$

Формула для расчета эффективной теплопроводности модели в поперечном направлении при разбиении изотермическими плоскостями $\lambda_{i_{\text{eff}}}$:

$$\lambda_{i_{\text{eff}}} = \frac{L_2}{R_t S}. \quad (6)$$

В качестве итоговой величины поперечной эффективной/эквивалентной теплопроводности используем среднее арифметическое значение величин, полученных при разбиении вспомогательными адиабатическими а-а и изотермическими i-i плоскостями [6, 7]:

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_{a_{eff}} + \lambda_{i_{eff}}}{2}.$$
 (7)

Расчет исходной теплопроводности листа теллурида кадмия при температуре 300 К принималась равной $\lambda_{CdTe}=6$ Вт/(м·К), при $T=350$ К равной $\lambda_{CdTe}=4$ Вт/(м·К), при $T=400$ К равной $\lambda_{CdTe}=3$ Вт/(м·К) [16]. Геометрические параметры свитка: толщина стенки нанотрубки $b=1$ нм, расстояние между слоями наносвитка принималось равным толщине стенки нанотрубки [8]. Диаметр наносвитков D варьировал от 5 до 30 нм с шагом 5 нм.

Для расчета длины свободного пробега фононов вдоль листа теллурида кадмия Λ_{CdTe} , необходимой для расчета теплопроводности участков, используем классическое выражение [15, 16] по известным справочным данным о теплопроводности листов CdTe, его удельной объемной теплоемкости C_v и скорости звука в теллуриде кадмия $U_{зв}$:

$$\lambda_{CdTe} = \frac{1}{3} C_v U_{зв} \Lambda_{CdTe};$$
 (8)

Таблица 1
Значения удельной теплопроводности и средней длины свободного пробега фононов CdTe

Table 1
Specific thermal conductivity and average free path length of CdTe phonons

<i>T</i> , К	λ_{CdTe} , Вт/(м·К)	Λ_{CdTe} , м
300	6	$4,9 \cdot 10^{-9}$
350	4	$3,3 \cdot 10^{-9}$
400	3	$2,4 \cdot 10^{-9}$

$$\Lambda_{CdTe} = \frac{3\lambda_{CdTe}}{C_v U_{зв}}.$$
 (9)

Значения удельной теплопроводности λ_{CdTe} и средней длины свободного пробега фононов CdTe Λ_{CdTe} представлены в табл. 1.

Результаты расчетов коэффициента теплопроводности наносвитков CdTe в продольном и поперечном направлениях при температурах $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К, проведенные с использованием метода теории обобщенной проводимости [6, 7], представлены на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 3 показаны зависимости эффективной теплопроводности наносвитка CdTe в продольном направлении

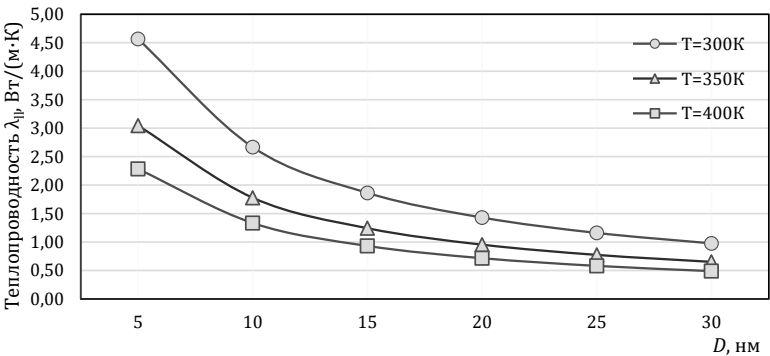


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективной продольной теплопроводности наносвитка CdTe $\lambda_{||}=f(D)$ от диаметра при $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

Fig. 2. Dependence of the effective longitudinal thermal conductivity coefficient of the CdTe nanofilament $\lambda_{||}=f(D)$ on the diameter at $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

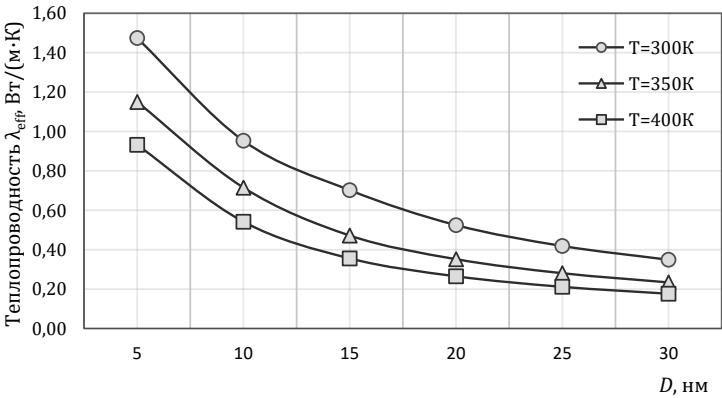


Рис. 3. Зависимость эффективной поперечной теплопроводности наносвитка CdTe $\lambda_{eff}=f(D)$ от диаметра при $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

Fig. 3. Dependence of effective transverse thermal conductivity of CdTe nanowire $\lambda_{eff}=f(D)$ on diameter at $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

потока тепла от его диаметра. На графике видно, что при увеличении диаметра наноситки теплопроводность снижается. Причем, чем меньше диаметр нанотрубки, тем значительнее изменение теплопроводности, находящейся в диапазонах от 4,57 до 0,98 Вт/(м·К) при $T=300$ К, от 3,04 до 0,65 Вт/(м·К) при $T=350$ К и от 2,28 до 0,49 Вт/(м·К) при $T=400$ К, соответственно. Снижение теплопроводности происходит за счет уменьшения доли стенки теллурида кадмия в продольном направлении и означает, что при большем диаметре меньше материала участвует в передаче тепла, что приводит к снижению теплопроводности. В малых нанотрубках атомы материала стенок находятся ближе друг к другу, что усиливает взаимодействие между ними и способствует более эффективной передаче тепловой энергии. Увеличение диаметра нанотрубок приводит ослабеванию взаимодействия атомов материала стенок, что снижает теплопроводность.

На рис. 3 показана зависимость эффективной теплопроводности наноситки CdTe в поперечном направлении потока тепла от его диаметра при температурах $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что теплопроводность в поперечном направлении ниже, чем теплопроводность в продольном направлении относительно нанотрубки. Можно заметить, что так же, как и продольная, поперечная теплопроводность с увеличением диаметра нанотрубок не растет, а слабо падает в пределах от 1,47 до 0,35 Вт/(м·К) при $T=300$ К, от 1,15 до 0,23 Вт/(м·К) при $T=350$ К и от 0,93 до 0,18 Вт/(м·К) при $T=400$ К, соответственно. Это связано с увеличением плотности материала при меньшем диаметре, что способствует более эффективной передаче тепла.

Снижение значений теплопроводности в наноситках CdTe при повышении температуры, вероятно, происходит по причине того, что атомы начинают колебаться с большей амплитудой, что приводит к увеличению вероятности столкновений между фононами и дефектами, а также между самими фононами. Это затрудняет передачу тепла через материал, так как фононы, отвечающие за теплопроводность, теряют координацию и эффективность передачи энергии. Кроме того, при высоких температурах могут возникать дополнительные механизмы рассеяния, такие как рассеяние на свободных носителях заряда, что

также способствует снижению теплопроводности. Таким образом, с повышением температуры теплопроводность теллурида кадмия уменьшается из-за увеличения рассеяния фононов и снижения их подвижности.

На основе расчетов теплопроводности наноситков CdTe вдоль и поперек оси нанотрубки рассчитан коэффициент анизотропии теплопроводности ρ :

$$\rho = \frac{\lambda_{\parallel \text{eff}}}{\lambda_{\perp \text{eff}}} \quad (10)$$

Зависимость коэффициента анизотропии теплопроводности от диаметра наноситки приведена на рис. 4.

Наноситки из теллурида кадмия обладают выраженной анизотропией теплопроводности — различия в значениях продольной и поперечной теплопроводности при 300 К свитков диаметром 5 нм достигают 3,10 (рис. 5).

С увеличением диаметра наноситков коэффициент анизотропии снижается. То есть, чем больше диаметр наноситки, тем меньше различие в его теплопроводности в разных направлениях.

Увеличение температуры сопровождается снижением коэффициента анизотропии при диаметрах наноситков CdTe 5 нм и 10 нм. При увеличении температуры с 300 К до 400 К коэффициент анизотропии снижается с 3,10 до 2,45 при диаметре 5 нм и с 2,80 до 2,46 при диаметре 10 нм. При диаметрах наноситки CdTe от 15 нм до 30 нм коэффициент теплопроводности не изменяется с изменением температуры.

Обсуждение результатов

Теллурид кадмия обладает кубической структурой типа сфалерита. Теплопроводность чистого монокристаллического CdTe изотропна и обусловлена фононами и ограничена рассеянием фононов на границах кристаллов [17].

Возможность появления анизотропии появляется в случае локальных ориентированных дефектов кристаллической решетки. Такие дефекты могут появляться при выращивании кристаллов сублимационно-конденсационными методами. В этом случае в ходе роста возникают дислокации, обусловленные текстурой роста. В поликристаллическом теллуриде кадмия, полученном осаждением из паровой фазы, анизотропию теплопроводности наблюдали при низких температурах [16]. Так при 100 К коэф-

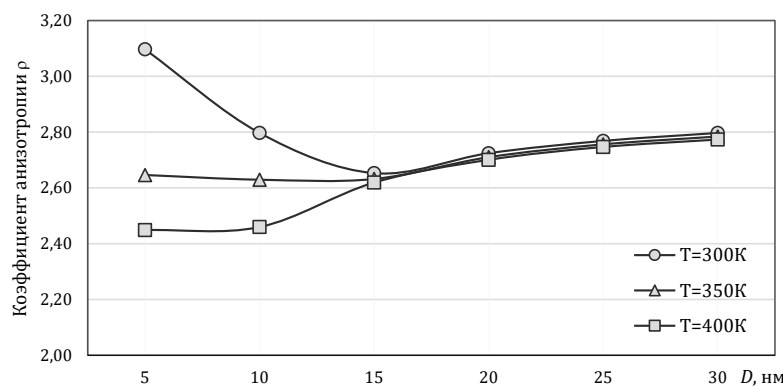


Рис. 4. Зависимость коэффициента анизотропии теплопроводности наноситки CdTe от диаметра при $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

Fig. 4. Dependence of anisotropy coefficient of thermal conductivity of CdTe nanowire on diameter at $T=300$ К, $T=350$ К, $T=400$ К

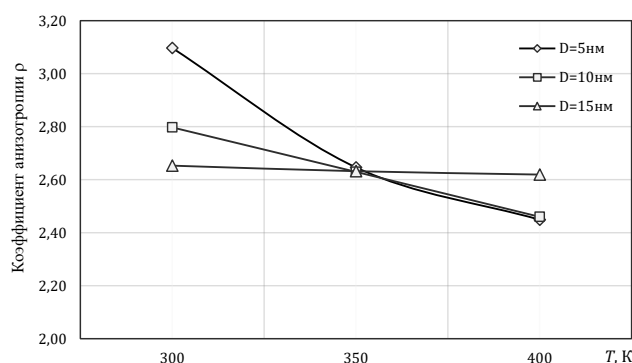


Рис. 5. Зависимость коэффициента анизотропии теплопроводности наносвитка CdTe диаметрами от 5 нм до 30 нм от температуры

Fig. 5. Temperature dependence of thermal conductivity anisotropy coefficient of CdTe nanofilament with the diameters of from 5 nm to 30 nm on temperature

коэффициент анизотропии не превышал 1,16. При 300 К и выше анизотропия практически исчезала и коэффициент анизотропии снижался до 1. Появление анизотропии теплопроводности в образцах поликристаллического теллурида кадмия связывали с наличием протяженных структурных дефектов (винтовых дислокаций), вызывающих деформацию решетки и рассеивающих фононы.

Наноструктурирование теллурида кадмия в виде наносвитка существенно повышает анизотропию теплопроводности. Основной механизм переноса тепла в наносвитках CdTe осуществляется фононами — квазичастицами, представляющими колебания атомной решетки [18]. Эффективность переноса фононами зависит от длины свободного пробега фонона в материале. Наноразмерные геометрические параметры свитков и изгиб слоев изменяют динамику фононов, которые переносят тепло внутри материала. Изогнутая форма наносвитка и наличие внутренних интерфейсов приводят к уменьшению эффективной теплопроводности. Фононы сталкиваются с дополнительными препятствиями, такими как границы между слоями и изгибы, что уменьшает их среднюю длину свободного пробега.

Сравнение данных о измерении коэффициентов теплопроводности образцов поликристаллических образцов CdTe методом осаждения из паровой фазы [16] и с расчетами, полученными расчетными данными для наносвитков, показывает, что наноструктурирование снижает теплопроводность. Коэффициент теплопроводности поликристаллических образцов измеряли при тепловом потоке, направленном параллельно и перпендикулярно росту кристалла. Он составил около 6 Вт/(м·К) при $T=300$ К, 4 Вт/(м·К) при $T=350$ К и 3 Вт/(м·К) при 400 К. Эти значения выше, чем полученные нами оценки коэффициента эффективной теплопроводности наносвитка CdTe (рис. 2, рис. 3), среднее значение которого составляет 0,56 Вт/(м·К). Это еще раз подтверждает особенность структуры наносвитка CdTe и позволяет рассматривать этот материал как новый с низкой теплопроводностью.

Анизотропия теплопроводности наносвитков CdTe снижается при повышении температуры из-за увеличения тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке. При повышении температуры атомы начинают

колебаться с большей амплитудой, что приводит к более равномерному распределению их положений. Это уменьшает различия в свойствах материала в разных направлениях, что, в свою очередь, снижает анизотропию. Кроме того, при высоких температурах могут происходить изменения в электронной структуре и подвижности носителей заряда, что также может способствовать уменьшению анизотропии. В результате при повышении температуры свойства материала становятся более изотропными, то есть более однородными во всех направлениях.

Выводы

Проведены расчеты теплопроводности одностенных нанотрубок из теллурида кадмия CdTe со структурой свитка-рулона при температурах от 300 К до 400 К. При расчете использована упрощенная модель и методика расчета, основанная на методах теории обобщенной проводимости. Анизотропия теплопроводности наносвитков CdTe снижается при повышении температуры, то есть свойства материала становятся более однородными во всех направлениях.

Представлена оценка зависимости эффективной теплопроводности композитного материала от диаметра наносвитка и температуры. Показано, что при увеличении диаметра нанотрубок, как и при увеличении температуры, теплопроводность в продольном направлении нанотрубки падает за счет уменьшения доли высокотеплопроводной стенки теллурида кадмия CdTe. Теплопроводность нанотрубки в поперечном направлении существенно ниже теплопроводности в продольном направлении.

Формирование материала в виде наноструктур типа свитков-рулонов имеют тенденцию к существенному понижению теплопроводности по сравнению с исходным материалом и усилению анизотропии коэффициента теплопроводности. Это обстоятельство будет полезно в поиске технологий создания эффективных термоэлектрических материалов, требующих пониженные значения коэффициента теплопроводности [19].

Анализ тепловых свойств нанотрубок CdTe расширяет понимание их фундаментальных характеристик и открывает новые перспективы для практического применения нанотрубок функциональных материалов в современных технологиях.

Литература

References

1. Kaggwa Anthony P. Advanced Composite Materials for Aerospace Applications. // *Research Output Journal of Engineering and Scientific Research*. 2024, 3 (2). p. 1–4.
2. Меретуков З. А. Перспективы использования композитных материалов при строительстве и реконструкции зданий и сооружений. // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1.
3. Cui K, Chang J, Feo L, Chow CL and Lau D. Developments and Applications of Carbon Nanotube Reinforced Cement-Based Composites as Functional Building Materials. // *Front. Mater.* 2022;9:861646. DOI: 10.3389/fmats. 2022.861646
4. Потанов С. Композитные теплопроводящие материалы для изделий электроники. // *Электроника НТБ*. 2015. № 9. 00149.
5. Laeth Hussain, Praveen, Sreerench Ragavu, Shilpa Pahwa, Alok Jain, Anandhi RJ, K Praveena. The Development of Composites Materials: From Conventional to Innovative Uses. // *E3S Web of Conferences*. 2024, 529, 01050.
6. Karol Pietrak, Tomasz S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. // *Wi'sniewski, Journal of Power Technologies*. 2015, 95 (1), p. 14–24.
7. Эдвабник В. Г. Теория обобщенной проводимости. Новосибирск, Наука, 2019. 212 с.
8. Roman B. Vasiliev et al. Spontaneous Folding of CdTe Nanosheets Induced by Ligand Exchange. // *Chem. Mater.* 2018, 30, 5, p. 1710–1717.
9. Заричняк Ю. П., Аливердиев А. А., Алексеев Е. В., Савватеева М. В., Ходунков В. П. Экстремальная анизотропия теплопроводности одностенных углеродных нанотрубок со структурой свитка-рулона, Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2024. № 3. 2430701.
10. Крайнов А. Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества. Учеб. пособие. Томск: STT, 2016. 48 с.
11. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. Физические величины. Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1991, с. 1232.
12. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е, М.: Наука, 1972. 720 с.
13. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. 344 с.
14. Motoo Fujii, Xing Zhang et al. Measuring the Thermal Conductivity of a Single Carbon Nanotube. // *Phys. Rev. Lett.* 95, 065502. Published 2 August 2005, Huaqing. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 95.065502
15. Шевченко О. Ю. Основы физики твердого тела. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010, с. 76.
16. Лугуева Н. В., Лугуев С. М., Гусейнов А. А. Теплопроводность текстурированного поликристаллического CdTe. // *Неорганические материалы*. 2004. Том 40, № 2, с. 166–171.
17. Glen A. Slack and S. Galginaitis. Thermal Conductivity and Phonon Scattering by Magnetic Impurities in CdTe. // *Phys. Rev.* 133, A253 — Published 6 January, 1964.
18. Хвесьюк В. И. Перенос теплоты в наноструктурах. // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 5.
19. Макагонов В. А., Калгин А. В., Костюченко А. В., Королёв К. Г., Копытин М. Н. Перспективные композиционные термоэлектрические и магнитоэлектрические материалы. Учебное пособие. Воронеж. 2022. 92 с.
1. Kaggwa Anthony P. Advanced Composite Materials for Aerospace Applications. *Research Output Journal of Engineering and Scientific Research*. 2024, 3 (2). p. 1–4.
2. Meretukov Z. A. Prospects of using composite materials in the construction and reconstruction of buildings and structures. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018. No 1.
3. Cui K, Chang J, Feo L, Chow CL and Lau D. Developments and Applications of Carbon Nanotube Reinforced Cement-Based Composites as Functional Building Materials. *Front. Mater.* 2022;9:861646. DOI: 10.3389/fmats. 2022.861646
4. Potapov S. Composite heat-conducting materials for electronics products. *Electronics NTB*. 2015. No. 9. 00149.
5. Laeth Hussain, Praveen, Sreerench Ragavu, Shilpa Pahwa, Alok Jain, Anandhi RJ, K Praveena. The Development of Composites Materials: From Conventional to Innovative Uses. *E3S Web of Conferences*. 2024, 529, 01050.
6. Karol Pietrak, Tomasz S. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. *Wi'sniewski, Journal of Power Technologies*. 2015, 95 (1), p. 14–24.
7. Edvabnik V. G. Theory of generalized conductivity. Novosibirsk, Nauka 2019, 212 p.
8. Roman B. Vasiliev et al. Spontaneous Folding of CdTe Nanosheets Induced by Ligand Exchange. *Chem. Mater.* 2018, 30, 5, p. 1710–1717.
9. Zarichnyak Yu. P., Aliverdiev A. A., Alekseev E. V., Savvateeva M. V., Khodunkov V. P. Extreme anisotropy of thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes with a scroll-roll structure. *Scien. zap. phys. the fact. is that Moscow University*. 2024. No. 3. 2430701.
10. Krainov A. Y. Fundamentals of heat transfer. Heat transfer through a layer of substance. Study guide. Tomsk: STT, 2016. 48 p.
11. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. Physical quantities. Guide. Moscow, Energoatomizdat, 1991, p. 1232.
12. Vargaftik N. B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. 2nd Ed., Moscow, Nauka, 1972. 720 p.
13. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of heat transfer. 2nd ed., stereotype, Moscow, Energiya, 1977. 344 p.
14. Motoo Fujii, Xing Zhang et al. Measuring the Thermal Conductivity of a Single Carbon Nanotube. *Phys. Rev. Lett.* 95, 065502. Published 2 August 2005, Huaqing. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 95.065502
15. Shevchenko O. Y. Fundamentals of solid state physics. The training manual. St. Petersburg: St. Petersburg State University of ITMO, 2010, p. 76.
16. Lugueva N. V., Luguev S. M., Huseynov A. A. Thermal conductivity of textured polycrystalline CdTe. *Inorganic materials*. 2004. Volume 40, No. 2, pp. 166–171.
17. Glen A. Slack and S. Galginaitis. Thermal Conductivity and Phonon Scattering by Magnetic Impurities in CdTe. *Phys. Rev.* 133, A253 — Published 6 January, 1964.
18. Khvesyuk V. I. Heat transfer in nanostructures. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. Issue 5.
19. Makagonov V. A., Kalyagin A. V., Kostyuchenko A. V., Korolev K. G., Kopytin M. N. Promising composite thermoelectric and magnetoelectric materials. The training manual. Voronezh. 2022. 92 p.

Сведения об авторах**Савватеева Мария Витальевна**

Аспирант, Образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, mashanyasav@mail.ru.
ORCID: 0009-0009-2562-1173

Новотельнова Анна Владимировна

К. т. н., доцент Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы», Университет ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, novotelnova@yandex.ru.
ORCID: 0000-0003-0073-2415

Information about authors**Savvateeva Mariya V.**

Postgraduate student, Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, mashanyasav@mail.ru.
ORCID: 0009-0009-2562-1173

Novotelnova Anna V.

Ph. D., Associate professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, novotelnova@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-0073-2415



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

**XVI Международная
специализированная выставка****7 – 10 октября 2025 г.**

Уникальный отраслевой проект, способствующий комплексному решению проблем энергетики в промышленности и ЖКХ, инфраструктурного развития территорий, энерго- и экологической безопасности, демонстрирующий научно-технические разработки и достижения в области энергосбережения, прогрессивные решения для энергетического сектора и современные эффективные технологии энергокомплекса.

Выставка «**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**» традиционно пройдет совместно с международными специализированными выставками «**РОС-ГАЗ-ЭКСПО**» и «**КОТЛЫ И ГОРЕЛКИ**». Тематики всех мероприятий логически дополняют друг друга.

Тематики выставки:

- Энергоэффективность и энергосбережение при транспортировке энергетических ресурсов и выработке тепловой и электрической энергии.
- Энергосберегающие технологии в инженерных системах промышленных предприятий, зданий и сооружений.
- Энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы.
- Ресурсосберегающее ведение строительно-монтажных работ.
- Обеспечение безопасности при транспортировке, хранении и использовании топливно-энергетических ресурсов. Промышленная безопасность и экология.
- Учет и мониторинг энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов.
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами в промышленности, энергетике и в сфере потребления ТЭР.
- Диагностика. Неразрушающий контроль.
- Возобновляемые источники энергии (ВИЭ).
- Альтернативные источники энергии (АИЭ).
- Переработка и утилизация промышленных и бытовых отходов.
- Светотехника.

Место проведения:

Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1, КВЦ "Экспофорум"
Бесплатный трансферный автобус от станции метро "Московская"

Организатор выставки:

ООО "ФАРЭКСПО"

Подробная информация на сайте:

<https://energysaving-expo.ru/>