

На правах рукописи

Мейлахс Александр Павлович

**Электрон-фононное взаимодействие вблизи
границы металл-диэлектрик в композитах на
основе углеродных наноструктур**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в лаборатории Физики кластерных структур отделения твердотельной электроники Физико-Технического института им. А. Ф. Иоффе.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Физико-Технического института им. А. Ф. Иоффе
Эйдельман Евгений Давидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Санкт-Петербургского
Академического университета
Дубровский Владимир Германович

доктор физико-математических наук,
профессор Санкт-Петербургского
государственного университета
Чарная Елена Владимировна

Ведущая организация: Петербургский институт ядерной
физики им. Б. П. Константинова

Защита состоится "25" мая 2017 года на заседании Диссертационного Совета Д 002.205.01 при Физико-Техническом институте им. А. Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-Технического института им. А. Ф. Иоффе, а также на сайте института <http://www.ioffe.ru/>.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.205.01
кандидат физико-математических наук

Петров Александр Александрович

Исследование переноса тепла в твердых телах является классической задачей физики конденсированного состояния. Проблема переноса тепла в однородных средах была всесторонне исследована и изложена в ряде монографий (см. например [1]). Однако проблема переноса тепла в неоднородных средах, таких как нанокompозитные материалы, все еще нуждается в тщательном исследовании. Принципиальным препятствием к построению теории переноса тепла в неоднородных средах является проблема теплосопrotивления на границе между фазами, граничного теплосопrotивления.

Граничным теплосопrotивлением, или сопrotивлением Капицы, называется коэффициент пропорциональности между тепловым потоком через границу и скачком температуры на границе [2]. Первоначально существование резкого скачка температур на границе между фазами при тепловом потоке было открыто для границы жидкого гелия с твердыми телами и исследовался именно этот случай [3], как наиболее простой для экспериментального изучения. Однако, позже был найден способ измерения теплосопrotивления Капицы на границе двух твердых тел [4]. В последние годы именно этот случай исследуется чаще всего, как экспериментально [5–7], так и теоретически [8, 9]. С другой стороны, продолжаютс я и исследования сопrotивления Капицы на границе жидкого гелия с твердым телом [10]. Несмотря на обилие работ, посвященных исследованию сопrotивления Капицы, до сих пор не существует единой теории, которая давала бы общий метод расчета граничного теплосопrotивления для границ любых пар материалов, как это делает, например, метод Чепмена-Энскога в теории кинетических коэффициентов в однородных средах. В диссертационной работе представлены результаты решения ряда задач, связанных с электрон-фононным взаимодействием вблизи границы металл-диэлектрик в композитах на основе углеродных наноструктур. Эти результаты можно рассматривать как первые шаги к созданию об-

щей теории теплосопrotивления на границе фаз.

Исследование граничного теплосопrotивления приводит к задаче о прохождении фонона через границу двух кристаллов, так как основным механизмом переноса тепла через границу является передача энергии через границу фононами. В настоящее время эта область активно развивается, основным методом изучения является компьютерное моделирование динамики решетки вблизи границы [11–14]. Однако в ряде случаев, например, в случае границы алмаз-медь, или в случае границ между графитоподобной и алмазоподобной фазами в углеродных наноструктурах, механизма переноса тепла фононами через границу недостаточно, чтобы объяснить весь имеющийся набор экспериментальных данных [7]. Требуется учет электрон-фононного взаимодействия. Изучение электрон-фононного взаимодействия вблизи границы металл-диэлектрик является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в исследовании теплосопrotивления Капицы [8, 9, 15, 16].

Теория теплосопrotивления Капицы привлекает внимание исследователей также из-за ее важности для практических применений, в первую очередь, для расчета свойств композитных наноматериалов. К примеру, важной задачей современного материаловедения является создание материала для эффективного отвода тепла от электронных устройств, например, компьютерных процессоров и полупроводниковых лазеров [17]. Перспективными материалами для этих целей являются композитные материалы на основе наноалмазов [18–22]. Кроме того, углеродные наноструктуры являются одним из наиболее многообещающих материалов для создания термоэлектрического генератора [23, 24]. Отметим, что исследование прохождения фононов через границу интересно и потому, что в последнее время был предложен целый ряд устройств, позволяющих передавать и обрабатывать информацию с помощью тепла, переносимого фононами. В их числе температурные

транзисторы и температурная память [25–27]. Все это обуславливает **актуальность** темы диссертационной работы.

Цель работы состоит в исследовании электрон-фононного взаимодействия вблизи границы металл-диэлектрик в композитах на основе углеродных наноструктур, расчете кинетических свойств нанокompозитных материалов и решении следующих задач:

- расчет амплитуд прохождения фононов через границу кристаллов.
- строгий вывод уравнений описывающих кинетику передачи тепла через границу кристаллов.
- расчет граничного теплосопrotивления (сопротивления Капицы) для границ различных материалов.
- учет влияния границ на теплопроводность нанокompозитных материалов и оптические свойства наночастиц.

Научная новизна работы определяется следующим:

1. Найден новый тип затухающих колебаний кристаллической решетки вблизи границы кристаллов. Предложен новый механизм передачи тепла через границу металл-диэлектрик, за счет взаимодействия электронов металла с затухающими колебаниями кристаллической решетки.
2. Впервые рассмотрено влияние рассогласования кристаллических решеток на прохождение фононов через границу кристаллов. Показано, что рассогласование кристаллических решеток приводит к упругому рассеянию фононов на границе, а коэффициент прохождения поперечно поляризованных фононов через границу выше, чем у продольно поляризованных.
3. Предложен новый метод расчета сопротивления Капицы, основанный на обобщении метода Энского-Чепмена на случай границы кристаллов.

4. Впервые рассмотрен процесс релаксации температур электронов и фононов вблизи границы металла и диэлектрика и его влияние на определяемое в эксперименте значение сопротивления Капицы.

Практическая значимость работы состоит в определении свойств границы кристаллов, которые позволяют добиться оптимального теплосопrotivления в композитном материале. Показано, что при некоторых условиях теплосопrotivление границы не зависит от свойств диэлектрика и поэтому, при выборе диэлектрической составляющей для композитного материала, можно руководствоваться только соображениями технологической простоты. Предложен новый дизайн термоэлектрических преобразователей на основе углеродных наноструктур, позволяющий получить преобразователь с рекордным термоэлектрическим параметром. Предложен новый способ определения размеров наночастиц по данным комбинационного рассеяния света.

Положения, выносимые на защиту.

1. Рассогласование кристаллических решеток контактирующих кристаллов приводит к упругому рассеянию фононов на границе, даже в отсутствие дефектов кристаллической решетки.

2. Рассогласование кристаллических решеток контактирующих кристаллов приводит к тому, что коэффициент прохождения поперечно поляризованных фононов через границу выше, чем у продольно поляризованных.

3. Тепловой поток через границу металла и диэлектрика приводит к перегреву/переохлаждению электронов металла относительно решетки, что дает дополнительный вклад в сопротивление Капицы, который не зависит от свойств диэлектрика.

4. Механизм теплосопrotivления в композитах на основе углеродных наноструктур определяется в основном теплосопrotivлением границ между

частицами, причем в таких композитах с квазибаллистическим увлечением электронов фононами, возможно достижение термоэлектрического параметра до 3,5.

Апробация работы. Результаты, полученные диссертационной работой, многократно докладывались на семинарах в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе, международном симпозиуме "Nanostructures: Physics and Technology" (Санкт-Петербург, Россия, 2013), всероссийской, молодежной конференции "Молодые ученые России" (Москва, Россия, 2014), Международной зимней школе по физике полупроводников (Зеленогорск, Россия, 2015 г.), а также на международных конференциях "Advanced Carbon NanoStructures (ACNS) 2011" (Санкт-Петербург, Россия, 2011), "ACNS 2013" (Санкт-Петербург, Россия, 2013), "ACNS 2015" (Санкт-Петербург, Россия, 2015), "Hasselt Diamond Workshop 2015 - SBDD XX" (Хассельт, Бельгия, 2015), "International Conference on Diamond and Carbon Materials" (Монпелье, Франция, 2016), "The 13th Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures ACSIN 2016" (Рим, Италия, 2016).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 14 работ, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень научных изданий ВАК. Список публикаций автора по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Вклад соискателя в работы по электрон-фононному взаимодействию вблизи границы металла и диэлектрика (главы 1, 4) заключался в решении поставленных задач и сопоставлении теории с экспериментом. В ходе подготовки работ, посвященных расчету амплитуд прохождения фононов через границу кристаллов и расчету теплосопrotivления

границ (главы 2, 3) соискатель проявил себя как самостоятельный исследователь, от постановки задачи до выполнения всех расчетов и представления результатов в публикации. В работах, посвященных объяснению и предсказанию свойств углеродных наноструктур на основе теории, развитой в предыдущих работах автора (глава 5), соискатель выполнил все расчеты, провел тщательное сопоставление теории и экспериментальных данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 116 страниц текста включая 20 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 116 наименований.

Содержание работы.

В **первой главе** диссертации рассматривается простейшая модель границы между двумя кристаллами – две полубесконечных одномерных цепочки атомов соединенных на границе. На примере этой модели рассматривается постановка задачи о прохождении фонона через границу кристаллов. Поставленная задача аналитически решается, приводятся точные выражения для амплитуд отражения и прохождения фононов.

Показано, что если со стороны данного кристалла на границу падает фонон с частотой большей, чем максимальная частота колебаний другого кристалла, то возбуждаются затухающие вглубь от границы колебания. Выведено соотношение между декрементом затухания таких колебаний q и частотой падающего фонона ω

$$\omega = \omega_m \cosh \frac{qa}{2}, \quad (1)$$

где ω_m – максимальная частота колебаний того кристалла, в котором происходит затухание, a – вектор решетки кристалла.

Предложен новый механизм передачи тепла через границу металл-диэлектрик, связанный с взаимодействием электронов с затухающими вглубь от границы колебаниями.

Во **второй главе** производится теоретическое исследование более сложной модели границы кристаллов – двух кубических решеток, разделенных плоскостью $(1,0,0)$. При этом, постоянные решеток предполагаются произвольными. Показано, что смещения атомов на границе, вызванные взаимным влиянием кристаллов друг на друга, не влияют на уравнения движения решетки в гармоническом приближении.

Рассматривается квазиодномерный случай – падение волны перпендикулярно плоскости границы без учета рассеяния. Для описания взаимодействия атомов, находящихся по разные стороны границы вводятся матрицы граничного взаимодействия

$$K_{\mathbf{n},\alpha\beta} = \sum_{\mathbf{n}'} \frac{\partial^2 U}{\partial u_{\mathbf{n},\alpha}^L \partial u_{\mathbf{n}',\beta}^R}. \quad (2)$$

Эти матрицы зависят от номера атома на границе. В квазиодномерном случае рассматривается задача прохождения фонона через границу без учета рассеяния. Для этого вводится усредненная матрица граничного взаимодействия

$$K_{\alpha\beta} = \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{n}} K_{\mathbf{n},\alpha\beta}, \quad (3)$$

где N – полное число атомов на границе. При таком усреднении теряется информация о рассеянии.

Доказывается, что из девяти компонент усредненной матрицы граничного взаимодействия отлична от нуля лишь одна

$$K_{\alpha\beta} = \beta \delta_{\alpha x} \delta_{\beta x}. \quad (4)$$

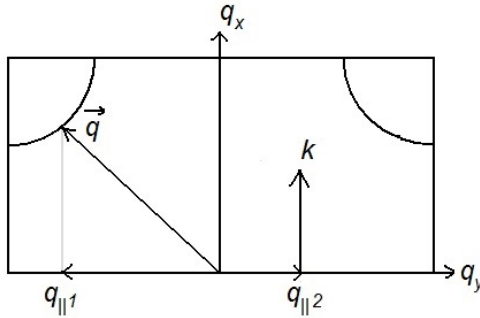


Рис. 1. На рисунке отмечен волновой вектор, упавшей на границу волны, ($q_{||1}$, $q_{||2}$) и эквифаза для фононов кристалла, на который падает волна. Видно, что при высоких частотах может оказаться, что волны, падающие на границу перпендикулярно, не проходят через границу, а возбуждают колебания, затухающие вглубь от границы. Напротив, фононы, упавшие на границу под острым углом, проходят через границу, в полной противоположности тому, что происходит при низких частотах (Рэлеевские волны).

Это означает, что колебания атомов на границе, параллельные плоскости границы, не влияют на колебания атомов по другую сторону границы. Это дает возможность получить точное аналитическое решение в квазиодномерном случае. Полученное решение качественно совпадает с решением, полученным для одномерной цепочки, что обосновывает применимость результатов, полученных для одномерной цепочки, к трехмерному случаю. Доказанная теорема объясняет, почему поперечно поляризованные фононы имеют много больший коэффициент прохождения через границу, чем продольно поляризованные.

Далее, вводится преобразование Фурье матрицы граничного взаимодей-

СТВИЯ

$$\begin{aligned}
 K_{\mathbf{k},\alpha\beta} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{n}} K_{\mathbf{n},\alpha\beta} e^{2\pi i \mathbf{k}\mathbf{n}(a^L/a^R)} \\
 K_{\mathbf{n},\alpha\beta} &= \sum_{\mathbf{k}=-\infty}^{+\infty} K_{\mathbf{k},\alpha\beta} e^{2\pi i \mathbf{k}\mathbf{n}(a^L/a^R)},
 \end{aligned} \tag{5}$$

что позволяет описать рассеяние фононов на границе из-за рассогласования решеток. Видно, что отраженные от границы фононы рассеиваются на вектор обратной решетки правого кристалла (в случае, если фонон падает на границу слева), а прошедшие фононы – на вектор обратной решетки левого кристалла. Таким образом, рассогласование кристаллических решеток, даже при отсутствии дефектов, приводит к рассеянию фононов на границе. Однако такое рассеяние не хаотично, а имеет вполне определенную структуру.

С помощью введенной техники выводится полная система уравнений, описывающая прохождение фонона через границу при произвольном угле падения и с учетом рассеяния. Для проверки правильности полученных уравнений рассматривается предельный случай – произвольная плоскость $(1,0,0)$ в однородной кубической решетке формально рассматривается как граница. В заключении графически исследуются колебания решетки вблизи границы. Вводится общее представление о затухающих вглубь от границы колебаниях, обобщающее широко известные Рэлеевские волны, и затухающие колебания, описанные в предыдущей главе (см. Рис. 1). Также показано, что преломление фонона на границе может произойти в обратную сторону в случае, если одновременно с преломлением фонон испытывает Брэгговское отражение.

В **третьей главе** рассчитывается граничное теплосоппротивление (сопротивление Капицы) в модели одномерной цепочки. Объясняется некорректность общепринятого подхода, в котором не учитывается принципиальная неравновесность функции распределения фононов при тепловом потоке

вблизи границы. Предлагается новый метод расчета, который обобщает общеизвестный метод расчета кинетических коэффициентов в однородных средах, метод Чепмена-Энскога, на случай границы сред. Выводятся условия сшивки функций распределения фононов на границе. Выводится аналитическое выражение для сопротивления Капицы r в одномерной цепочке

$$r^{-1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{t}{1-t} \frac{\partial n_0}{\partial T} \hbar \omega \, d\omega, \quad (6)$$

где t – коэффициент прохождения фонона через границу, ω – частота фонона, n_0 – равновесное число фононов в состоянии с соответствующей частотой, определяемое через распределение Бозе-Эйнштейна.

От расчетной формулы, выведенной классическим методом, полученное выражение отличается множителем $(1-t)^{-1}$. Как видно из приведенной формулы, в случае высоких, близких к единице, коэффициентов прохождения фононов через границу, это выражение велико. Рассчитанное по выведенной формуле сопротивление Капицы, оказывается много меньше, чем рассчитанное по общепринятой формуле, что позволяет снизить расхождение между теорией и экспериментом.

Четвертая глава посвящена изучению переноса тепла через границу в трехмерном случае. Выводятся условия сшивки функций распределения фононов на границе в трехмерном случае:

$$\begin{aligned} n_{\alpha}^{L+} &= \sum_{\beta} |A_{\beta\alpha}^L|^2 n_{\beta}^{L-} + \sum_{\beta} |B_{\beta\alpha}^L|^2 n_{\beta}^{R+} \\ n_{\alpha}^{R-} &= \sum_{\beta} |A_{\beta\alpha}^R|^2 n_{\beta}^{R+} + \sum_{\beta} |B_{\beta\alpha}^R|^2 n_{\beta}^{L-}. \end{aligned} \quad (7)$$

здесь n – числа заполнения фононов, α, β – квантовые числа фононов, L, R – индекс, обозначающий кристалл (левый и правый), $-, +$ – индекс, обозначающий направление движения фонона (слева направо или справа налево),

A, B – амплитуды отражения и прохождения фононов через границу, соответственно.

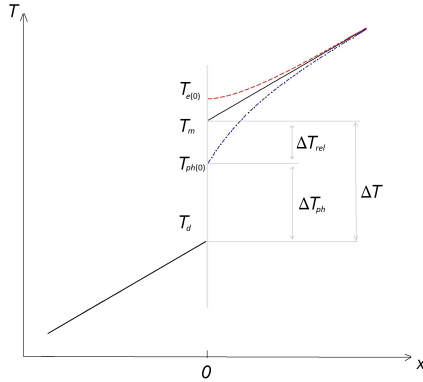


Рис. 2. Профиль температур на границе диэлектрика (слева) и металла (справа). В металле пунктиром изображена температурная зависимость электронов, пунктиром с точками изображена температура фононов. Сплошная линия - экстраполяция, приводящая к температуре металла на границе T_m . Обозначено: ΔT_{ph} – разница температур фононов на границе; ΔT_{rel} – релаксационный вклад в скачок температур.

Уравнение (3) выражает числа заполнения фононов, летящих от границы, через числа заполнения фононов летящих к границе. Система уравнений (3) совместно с уравнениями Больцмана для фононов правого и левого кристаллов дают полную систему уравнений описывающую перенос тепла фононами через границу.

Отдельно рассматривается случай границы металла и диэлектрика. Показывается, что вследствие того, что тепло через границу переносится только фононами, а электроны не проходят через границу, температуры и градиен-

ты температур фононов и электронов вблизи границы различны. Так как электроны вовлекаются в перенос тепла только на некотором расстоянии от границы, вблизи границы перенос тепла осуществляется не оптимально, что приводит к дополнительному вкладу в сопротивление Капицы (см. Рис. 2).

Профиль температур электронной T_e и фоновой T_{ph} подсистем рассчитывается аналитически

$$\begin{aligned} T_{ph} &= T_b - \frac{1}{\kappa}qx + \frac{\Lambda\kappa_e q}{\kappa\kappa_{ph}} \exp\left(-\frac{x}{\Lambda}\right) \\ T_e &= T_b - \frac{1}{\kappa}qx - \frac{\Lambda q}{\kappa} \exp\left(-\frac{x}{\Lambda}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

где введено обозначение $\Lambda = \sqrt{\frac{\kappa_e\kappa_{ph}}{\theta(\kappa_e + \kappa_{ph})}}$ – характерное расстояние выравнивания температур. Здесь $\kappa_e\kappa_{ph}$ – теплопроводности электронной и фоновой подсистем, θ – коэффициент теплообмена между подсистемами, T_b – усредненная температура на границе, которая измеряется в эксперименте.

В случае, если коэффициент прохождения фононов через границу велик, такой вклад становится основным. Данный вклад не зависит от свойств диэлектрика, что объясняет имеющиеся в литературе экспериментальные результаты [28].

В **пятой главе** развитая ранее теория применяется для теоретического исследования кинетических свойств нанокompозитных материалов и оптических свойств наночастиц. Производится сравнение механизмов теплосопротивления в композитах, полученных при спекании микроалмазов с композитами на основе наноалмаза. На основе анализа экспериментальных данных, делается вывод о том, что основным механизмом теплосопротивления в углеродных наноструктурах, полученных спеканием наноалмазов, является теплосопротивление на границах между графитоподобной и алмазоподобной фазами.

Предсказывается, что углеродные наноструктуры могут обладать ре-

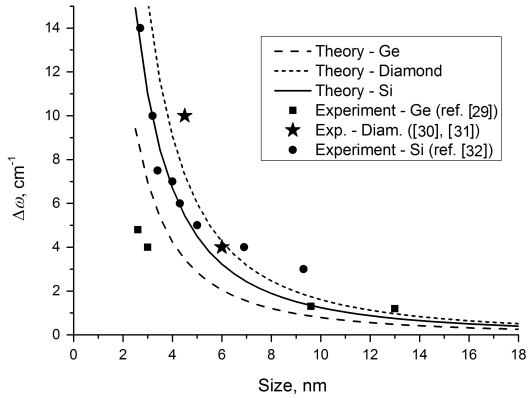


Рис. 3. Представлены теоретические кривые зависимости сдвига частоты рамановского рассеяния от размеров наночастицы, для германия, алмаза и кремния. Для сравнения приведены экспериментальные данные из работ [29–32].

кордным значением термоэлектрического параметра, за счет баллистического увлечения электронов фононами и нарушения в таких структурах закона Видемана-Франца, являющегося универсальным ограничителем термоэлектрической эффективности.

Предлагается новая модель, объясняющая уменьшение частоты пика комбинационного рассеяния света в наноструктурах, дискретностью колебательного спектра наноструктур. Предложенная модель с высокой точностью воспроизводит результаты многочисленных экспериментов (Рис. 2).

В **заклучении** диссертации подводится итог работы, кратко излагаются основные результаты диссертационной работы.

Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] *А. П. Мейлахс, Е. Д. Эйдельман.* Новая модель передачи тепла через границу металл-диэлектрик на примере границ в композите алмаз-медь// Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Том. 9. – С. 38.
- [A2] *А. П. Мейлахс, Е. Д. Эйдельман.* Перегрев или переохлаждение электронов в металле из-за влияния границы с диэлектриком// Письма в ЖЭТФ/ – 2014. – Vol. 100, no. 2. – С. 89-93.
- [A3] *А. П. Мейлахс.* Неравновесная функция распределения при тепловом потоке вблизи границы двух кристаллов// ФТТ. – 2015. – Том. 57. – Сс. 148-152.
- [A4] *Ф. М. Шахов, А. П. Мейлахс, Е. Д. Эйдельман.* Изменение механизма распространения тепла при переходе от микро к наночастицам// Письма в ЖТФ. – 2016. – Том. 42, В. 3. – Сс. 252–255.
- [A5] *E. D. Eidelman, A. P. Meilakhs.* Prediction of giant thermoelectric efficiency of carbon nanocomposites// Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2016. – Vol. 7. – P. 919.
- [A6] *A. P. Meilakhs.* Phonon transmission across an interface between two crystals// Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2016. – Vol. 7. – P. 971.

Список литературы

1. Займан Дж. Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах / Дж. Займан – Москва: Издательство иностранной литературы, 1962.
2. Kapitza P. L. The study of heat transfer in helium II // J. Phys. USSR. – 1941. – Vol. 4. – P. 181.
3. Pollack L. G. Kapitza Resistance // Rev. Modern Phys. – 1969. – Vol. 41. no. 1.
4. Swartz E. T. and Pohl R. O. Thermal resistance at interfaces // Appl. Phys. Lett. – 1989. – Vol. 51. – P. 2200
5. Donovan B. F., Szwejkowski C. J., Duda J. C. et. al. Thermal boundary conductance across metal-gallium nitride interfaces from 80 to 450K // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. 105. – P. 203502
6. Zhan T., Xu Y., Goto M., Tanaka Y., Kato R. and Sasaki M. Thermal boundary resistance at Au/Ge/Ge and Au/Si/Ge interfaces // RSC Adv. – 2015. – Vol. 5. – P. 49703.
7. Stoner R. J. and Maris H. J. Kapitza conductance and heat flow between solids at temperatures from 50 to 300 K // Phys. Rev. B. – Vol. 48. – P. 16373.
8. Mahan G. D. Kapitza thermal resistance between a metal and a nonmetal // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 79. – P. 075408.
9. Reich K. V. Kapitza resistance between electron and phonon gases in the 1D case // Prog. Theor. Exp. Phys. – 2013. – P. 013I01.
10. Ramiere A., Volz S. and Amrit J. Thermal resistance at a solid/superfluid helium interface // Nature Materials. – 2016. – Vol. 15. – P. 512.
11. Saaskilahti K., Oksanen J., Tulkki J. and Volz S. Role of anharmonic phonon

- scattering in the spectrally decomposed thermal conductance at planar interfaces // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 90. – P. 134312.
12. Yang N., Luo T. et. al. Thermal Interface Conductance between Aluminum and silicon by molecular dynamics simulations // J. Comp. and Theor. Nanosci. – 2015. – Vol. 12. – P. 168.
 13. Bi K., Liu Y., Zhang C., Li J., Chen M., Chen Y. Thermal transport across symmetric and asymmetric solid–solid interfaces // Appl. Phys. A. – 2016. – Vol. 122. – P. 883.
 14. Kakodkar R. R. and Feser J. P. Probing the validity of the diffuse mismatch model for phonons using atomistic simulations // arXiv:1607.08572v1
 15. Huberman M. L. and Overhauser A. W. Electronic Kapitza conductance at a diamond-Pb interface // Phys. Rev. B. – 1994. – Vol. 50. – P. 2865
 16. Sergeev A. V. Electronic Kapitza conductance due to inelastic electron-boundary scattering // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 58. – P. 10199(R)
 17. Kidalov S. V., Shakhov F. M. Thermal Conductivity of Diamond Composites // Materials. – 2009. – Vol. 2. – P. 2467.
 18. Abyzov A. M., Kidalov S. V., Shakhov F. M. High thermal conductivity composites consisting of diamond filler with tungsten coating and copper (silver) matrix // J. Mater. Sci. – 2011. – Vol. 46. – P. 1424.
 19. Абызов А. М., Кидалов С. В., Шахов Ф. М. Теплопроводность композита алмаз-парафин // ФТТ. – 2011. – Vol. 53. – P. 196.
 20. Abyzov A. M., Kidalov S. V., Shakhov F. M. High thermal conductivity composite of diamond particles with tungsten coating in a copper matrix for heat sink application // Appl. Therm. Eng. – 2012. – Vol. 48. – P. 72.
 21. Xue C., Yu J. K. Enhanced thermal conductivity in diamond/aluminum composites: Comparison between the methods of adding Ti into Al matrix and coating Ti onto diamond surface // Surface and Coatings Technology. –

2013. – Vol. 217. – P. 46.
22. Schubert T., Ciupinski L., Zielinski W., Michalski A., Weisgarber T., Kieback B. Interfacial characterization of Cu /diamond composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications // *Scr. Mater.* – 2008. – Vol. 58. – P. 263.
23. Heremans J. P. Thermoelectricity: The ugly duckling // *Nature.* – 2014. – Vol. 508 – P. 327.
24. The thermoelectric element. Invention. Patent 2,376,681 Russia // Vul A.Ya., Eidelman E.D. – 2008. – The legal owner of Physics - Technical Institute. AF Ioffe RAS.
25. Li B., Wang L. and Casati G. Negative differential thermal resistance and thermal transistor // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 88. – P. 143501.
26. Terraneo M., Peyrard M., and Casati G. Controlling the energy flow in nonlinear lattices: a model for a thermal rectifier // *Phys. Rev. Lett.* – 2002. – Vol. 88. – P. 094302.
27. Wang L. and Li B. Thermal memory: a storage of phononic information // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – Vol. 101. – P. 267203.
28. Costescu R. M., Wall M. A., Cahill D.G. Thermal conductivity of thin films. Measurements and understanding // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 67. – P. 054302-1-8.
29. Bottani C. E., Mantini C., Milani P., Manfredini M., Stella A. et al. Raman, optical absorption, and transmission electron microscopy study of size effects in germanium quantum dots // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – Vol. 69. – P. 2409.
30. Shenderova O. A., Vlasov I. I., Turner S. et. al. Nitrogen control in nanodiamond produced by detonation shock-wave-assisted synthesis // *J. Phys. Chem. C.* – 2011. – Vol. 115. – P. 14014.

31. Алексенский А. Е., Байдакова М. В., Вуль А. Я., Давыдов В. Ю., Певцова Ю. А. Фазовый переход алмаз–графит в кластерах ультрадисперсного алмаза // ФТТ. – 1997. – Vol. 39. – P. 1125.
32. Xia H., He Y. L., Wang L. C., Zhang W., Liu X. N., Zhang X. K., Feng D., and Jackson H. E. Phonon mode study of Si nanocrystals using micro Raman spectroscopy // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 78. – P. 6705.