

Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья
УДК 538.93, 536.241
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16409>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В НАНОСТРУКТУРАХ

К. Р. Трофимович, П. Г. Габдуллин, А. В. Архипов ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
✉ arkhipov@rphf.spbstu.ru

Аннотация. Представлены общая схема и конструкция экспериментальной установки для изучения термоэлектрических явлений в точечных контактах разнородных материалов и в наноструктурах. Точечные контакты регулируемого размера формируются с помощью атомно-силового микроскопа, определяются зависимости термоэдс от разности температур и от силы воздействия зонда на образец. Проведено численное моделирование распределения температуры в такой системе для различных условий, оценено влияние воздушной среды и жидкого слоя, формирующегося на поверхностях в условиях естественной атмосферы. Моделирование показало, что это влияние не является существенным, что делает необязательным проведение экспериментов в высоком вакууме.

Ключевые слова: термоэлектрический эффект, точечный контакт, наноструктуры, нанотеплофизика, атомно-силовой микроскоп

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10027 (<https://rscf.ru/project/23-29-10027/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 23-29-10027.

Для цитирования: Трофимович К. Р., Габдуллин П. Г., Архипов А. В. Экспериментальная установка для исследования особенностей термоэлектрического эффекта в наноструктурах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 101–117. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16409>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16409>

AN EXPERIMENTAL APPARATUS FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC EFFECT IN NANOSTRUCTURES

K. R. Trofimovich, P. G. Gabdullin, A. V. Arkhipov ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ arkhipov@rphf.spbstu.ru

Abstract. We present an experimental setup for the study of thermoelectric effect in point contacts between different materials and in nanostructures. Point contacts of controlled size are formed with the use of an atomic force microscope (AFM), thermopower dependences against the temperature drop and against the contact spot size determined from the force applied to

the probe. Computer simulations of heat transport in the system were performed to evaluate influence of atmospheric air and of a liquid layer covering solid surfaces in the atmospheric conditions onto temperature distributions. This influence was found to be insubstantial, which makes it possible to conduct experiments on the atmosphere and not in high vacuum.

Keywords: thermoelectric effect, point contact, nanostructures, atomic force microscope

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 23-29-10027 (<https://rscf.ru/project/23-29-10027/>)) and by St. Petersburg Science Foundation (Grant No. 23-29-10027).

For citation: Trofimovich K. R., Gabdullin P. G., Arkhipov A. V., An experimental apparatus for studying the characteristics of thermoelectric effect in nanostructures, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (4) (2023) 101–117. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16409>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Проблема повышения энергоэффективности становится все более актуальной для электроники. Сообщалось, в частности, что более 10 % электроэнергии в мире уже сейчас потребляется компьютерами и телекоммуникационным оборудованием, и эта доля быстро растет [1]. Потребляемая электронными устройствами энергия в конечном итоге выделяется в виде тепла, и обратное преобразование части этого тепла в электроэнергию могло бы заметно повысить общую энергоэффективность. Наиболее естественным способом утилизации тепловой энергии электронных компонентов представляется использование твердотельных термоэлектрических генераторов (ТЭГ). Разработка и совершенствование ТЭГ ведется в течение многих лет (по меньшей мере, с 40-х гг. XX века), и успехи здесь весьма значительны. Однако на пути повышения эффективности ТЭГ имеются фундаментальные физические ограничения.

Термоэлектрические материалы принято оценивать параметром термоэлектрической эффективности (качества) Z или, чаще, одноименной безразмерной величиной ZT , где T – абсолютная температура. Этот параметр характеризует отличие КПД термоэлектрического преобразования, достижимого с использованием данного материала, от КПД идеальной тепловой машины. Зависимость термоэлектрической эффективности от свойств материала задается формулой [1 – 4]:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa_{el} + \kappa_{ph}}, \quad (1)$$

где S – коэффициент Зеебека (определяется как коэффициент пропорциональности между термоэдс и перепадом температуры); σ – электрическая проводимость; κ_{el} , κ_{ph} – электронная и решеточная (фононная) составляющие коэффициента теплопроводности.

По имеющимся оценкам, широкое использование ТЭГ в энергетике окажется экономически оправданным при достижении $ZT = 3 - 4$. Полученные к настоящему времени значения ZT лучших термоэлектрических материалов (в частности, теллурид висмута Bi_2Te_3) при комнатной температуре близки к единице. Из формулы (1) очевидно, что для повышения термоэлектрического качества следует добиваться уменьшения теплопроводности материала и увеличения его электропроводности и коэффициента Зеебека. Металлы, обладая высокой электропроводностью, не являются оптимальными материалами для ТЭГ, поскольку значения коэффициента Зеебека у них невелики: в большинстве случаев не превышают по модулю 10 мкВ/К. Кроме того, поток тепла в металлах переносится преимущественно носителями электрического заряда, вследствие чего коэффициенты тепло- и электропроводности металлов, стоящие в формуле (1) в знаменателе и в числителе соответственно, пропорциональны друг другу (закон Видемана – Франца), что затрудняет оптимизацию параметра ZT . В противоположность этому, полупроводники



обладают низкой электронной теплопроводностью, а тепловой поток в них переносится почти исключительно фононами. Коэффициент Зеебека полупроводящих материалов, как правило, достаточно велик (сотни мкВ/К), что определяется значительными вариациями функции энергетической плотности состояний электронов вблизи уровня Ферми [3 – 5]. Термоэлектрические свойства полупроводников можно оптимизировать выбором степени их легирования [6, 7] или смещением уровня Ферми иными способами [8]. В целом, полупроводники характеризуются наилучшими термоэлектрическими параметрами среди однородных объемных материалов, однако возможности их радикального совершенствования все же ограничены.

В последние десятилетия перспективы создания коммерчески успешных термоэлектрических устройств связывают с наноструктурами и наноструктурированными материалами. Многие эксперименты (см., например, статьи [9 – 12]) принципиально подтвердили теоретические предсказания, сделанные авторами работ [4, 13], о возможности использования размерных эффектов для селективного уменьшения теплопроводности за счет рассеяния фононов границами и дефектами при меньшем их влиянии на электропроводность.

Не менее перспективным считается путь использования в термоэлектрических устройствах наночастиц, отдельных молекул или молекулярных слоев [2, 3, 12 – 16], обладающих дискретным спектром разрешенных электронных состояний, который можно оптимизировать для достижения высоких значений S и ZT . Разрабатываются наноструктуры, где есть возможность создать условия одновременно для деструктивной интерференции возбуждений решетки и конструктивной интерференции электронных волн [1, 2]. Расчет термоэлектрических параметров устройств, использующих наноразмерные элементы, представляет собой сложную задачу, что повышает роль эксперимента в таких исследованиях.

Постановка задачи исследования

В данной работе представляются результаты первого, начального этапа нового исследовательского проекта, цель которого состоит в экспериментальной проверке одной из теоретических моделей, предсказывающих возможность построения ТЭГ с повышенной эффективностью на основе использования особенностей переноса тепла и термоэлектрических явлений в наноструктурах на основе углерода.

Углерод в состоянии sp^2 -гибридизации (однослойный и многослойный графен, углеродные нанотрубки, графит) обладает уникальными характеристиками [4, 17, 18]: низкой эффективной массой носителей заряда, высокой теплопроводностью, высоким коэффициентом поглощения оптического излучения. Электронные свойства графена и углеродных нанотрубок легко модифицируются не только легированием и дефектами, но и электрическим полем, что делает углерод в состоянии sp^2 -гибридизации перспективным материалом электроники. Среди прочего, рассматривалась и возможность его использования в составе термоэлектрических устройств [5, 19].

Е. Д. Эйдельман, автор работ [20, 21], предложил конструкцию ТЭГ на основе структуры из нанометровых слоев алмазоподобного и графитоподобного углерода. Принцип ее действия базируется на предложенной им ранее теоретической модели [22, 23], которая обосновывает возможность получения повышенных значений коэффициента Зеебека S и параметра ZT при использовании явления увлечения носителей заряда баллистическим потоком фононов, причем даже при комнатной и более высокой температуре. В этом случае для достижения положительного результата требуется локализация электрического поля и перепада температуры в плоском нанослое sp^2 -углерода, где поток фононов остается баллистическим. Алмазоподобный слой играет роль «холодильника», отводя неиспользованную часть этого потока. В качестве необходимого условия указывается также наличие резких (не более нескольких периодов решетки) межфазных границ. На наш взгляд, экспериментальная демонстрация предсказанного эффекта в статье [21] была не вполне убедительной. Причиной этого, вероятно, стала объективная технологическая сложность формирования идеальной структуры, требуемой теорией; наличие дефектов, практически неизбежное при указанных значениях толщины и площади, могло приводить к электрическому закорачиванию реальной структуры и снижению регистрируемого для нее термоэлектрического напряжения.

Наше исследование нацелено на проведение экспериментальной проверки работоспособности концепции, предложенной в статьях [20, 21], с использованием более простой в реализации структуры, основной частью которой может являться, например, углеродный наноостровок на поверхности кремниевой подложки (служащей в данном случае холодильником или, наоборот, нагревателем). Второй термический и электрический контакт с островком должен устанавливаться посредством зонда атомно-силового микроскопа (АСМ). Островковые углеродные пленки требуемой структуры изучались нами ранее в связи с их способностью к эмиссии электронов [24 – 26].

Достоинством предлагаемого подхода является возможность проведения оперативного независимого тестирования термоэлектрических свойств многих островков, которые различаются размерами и свойствами интерфейса с подложкой. Это кажется необходимым, поскольку мы ожидаем, что высокую термоэлектрическую эффективность покажут лишь немногие из островков.

Такие ожидания связаны с важными особенностями, привносимыми тепловыми контактами малых латеральных размеров.

Известно явление снижения термоэдс в наноконтактах [27 – 30], которое объясняют как раз подавлением фононного увлечения носителей заряда. Его причину видят в рассеянии неравновесных фононов на «апертуре» наноконтакта, что снижает вероятность передачи их импульса электронам или дыркам. Поэтому, согласно теории, изложенной в статье [27], при малых диаметрах d контакта, в формуле для термоэдс увлечения появляется дополнительный множитель d/Λ_p , где Λ_p – длина пробега фонона.

В планируемых экспериментах предполагается исследование островков, высота которых имеет порядок длины пробега фонона, приблизительно равной 5 нм (согласно оценке в статье [21]). Их латеральный размер будет в несколько раз большим, но размер контакта с зондом АСМ может оказаться малым и плохо контролируемым.

Однако граничное рассеяние фононов, по мнению многих исследователей, является лишь одной из причин зависимости коэффициента Зеебека и других кинетических коэффициентов от размера области контакта. В частности, теорией предсказывается и уже экспериментально наблюдалось отклонение кинетических зависимостей от линейного вида при нарушении условия $L_T > \Lambda_p$, где L_T – расстояние, на котором температура меняется существенным образом; его можно определить, например, как

$$L_T^{-1} = \max \left(\frac{|\text{grad } T|}{T} \right). \quad (2)$$

Причину этого явления видят в нелокальности взаимодействия носителей заряда с решеткой [31 – 37]. При нарушении условия $L_T > \Lambda_p$ нельзя считать, что взаимодействие происходит в точке с определенными координатами. Зачастую при этом и значение температуры нельзя корректно определить, поскольку распределения фононов и носителей заряда оказываются существенно неравновесными [5, 38]. Одно из проявлений нелокальности – это зависимость величины термоэдс не только от приложенной разности температур, но и от ее профиля распределения, от максимальной величины ее градиента, т. е. от характеристик, которые едва ли можно предсказать для теплового контакта зонда с островком.

Еще одной областью со свойствами, сильно изменяющимися от островка к островку, может оказаться область интерфейса с подложкой, поскольку островки формировались на слое естественного оксида; хотя в литературных источниках [30, 39, 40] и утверждается, что тонкие промежуточные слои не оказывают влияния на результаты измерения термоэлектрических параметров покрытий и наноструктур.

По указанным причинам, надежная регистрация факта получения высоких значений коэффициента Зеебека (в статье [21] оценка его ожидаемой величины составляет 50 мВ/К) хотя бы для небольшой части углеродных наноостровков (или других аналогичных тестируемых объектов), приводимых в контакт с имеющим отличную температуру зондом АСМ, может рассматриваться как подтверждение теоретических предсказаний работ [20 – 23] и станет стимулом для последующих работ по практической реализации концепции ТЭГ, предлагаемой в работе [21].

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для решения вышеописанной задачи создается на базе ACM NanoDST (Pacific Nanotechnology, США). Такой подход не стоит считать новым: схемы на основе зондовых микроскопов с успехом использовались в аналогичных исследованиях, в частности, для картирования распределений тепловых и термоэлектрических параметров [5, 6, 39 – 44] и при изучении свойств молекулярных слоев и отдельных молекул [1, 5, 16, 39, 45]. Особенности создаваемой установки являются минимальные доработки серийного АСМ и использование при ее работе стандартных АСМ-зондов, что возможно, поскольку на начальном этапе исследований будет решаться ограниченный круг задач.

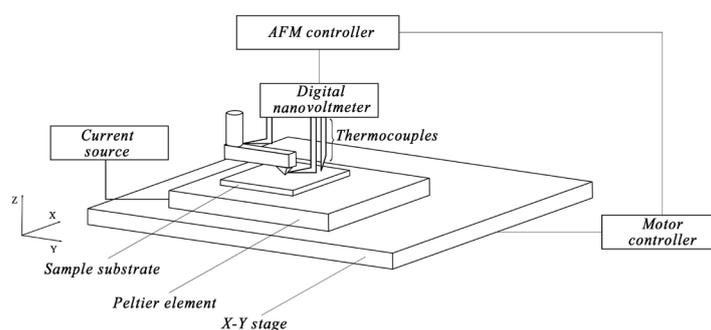


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Массивный координатный столик (X - Y stage) и держатель зонда играют роль термостатов с температурой, равной температуре окружающей среды T_0 . Подложка изучаемого образца (Sample substrate) размещается на верхней поверхности элемента Пельтье (Peltier element), температура которой поддерживается (с помощью питающего элемента источника тока (Current source)) на заданном значении $T = T_0 + \Delta T$. Значения температуры контролируются при помощи термопар (Thermocouples). В ходе опыта зонд АСМ, начальная температура которого равна T_0 , приводится в контакт с точкой образца, выбранной в ходе предварительного сканирования его поверхности. Формирующееся при контакте термоэлектрическое напряжение регистрируется цифровым вольтметром (Digital nanovoltmeter), синхронизированным с контроллером АСМ (AFM controller). Одновременная регистрация его показаний и «кривой подвода» АСМ (*англ.* force-distance) позволит определить зависимость термоэлектрического напряжения от силы взаимодействия зонда с поверхностью, а значит, и от размера d области их контакта. Для выделения составляющей напряжения, связанной с контактной разностью потенциалов, эксперимент будет проводиться и для $\Delta T = 0$.

Задача определения чисто тепловых параметров – величин тепловых потоков, тепловых сопротивлений, теплопроводности и теплопроводности – с точки зрения техники измерений представляет обычно наибольшую сложность [38, 46, 47]. На данном этапе исследований мы отказались от их определения, поскольку для оценки релевантности концепции ТЭГ, предложенной в работе [21], достаточно нахождения максимальных значений коэффициента Зеебека S , т. е. измерений температуры и термоэдс. В случае обнаружения воспроизводимых зависимостей $S(\Delta T)$ и $S(d)$, получаемые результаты дадут дополнительную информацию о физике процессов переноса тепла и электрического заряда в изучаемой системе.

В дальнейшем планируется расширить возможности установки.

Объекты исследования

Для первых экспериментов были выбраны следующие объекты исследования (ниже они даны в последовательности от простых к более сложным).

Наноконтакт АСМ-зонда с металлической пластиной или толстой пленкой (Cu, Au).

Поскольку значения коэффициента Зеебека для кремния существенно превосходят его значения для металлов, при контакте кремниевого зонда с металлической пластиной естественно ожидать, что величина термоэдс будет в основном определяться процессами в зонде. Таким образом, главная цель таких опытов состоит в определении вклада в термоэдс зондов разного типа: с металлическим покрытием и без покрытия, при разном размере пятна контакта. Такие данные необходимы для проведения последующих экспериментов с другими объектами – для учета вклада АСМ-зонда в регистрируемые значения термоэдс.

Наноконтакт АСМ-зонда с кремниевой пластиной. Измерения термоэлектрических характеристик наноконтактов, формируемых между АСМ-зондами и подложками, весьма важны для корректной интерпретации прочих экспериментальных результатов, так как углеродные nanoостровки (это основные объекты экспериментов на данном этапе исследований) сформированы на кремниевых подложках. Однако существует и дополнительная мотивация для проведения таких опытов.

В проведенных ранее экспериментах была зарегистрирована способность к низковольтной полевой эмиссии островковых пленок углерода и металлов (молибден, цирконий, вольфрам), сформированных на кремниевых подложках [24, 25, 48]. Было высказано предположение о важной роли термоэлектрических потенциалов в физическом механизме эмиссионного процесса [26, 48, 49]. При этом отсутствие существенных различий эмиссионных параметров углеродных и металлических островков свидетельствовало в пользу того, что термоэлектрические потенциалы формируются не в самих островках, а в подложках вблизи островков. Теоретическое рассмотрение такого процесса с применением модели увлечения носителей заряда баллистическим потоком фононов [21] позволило дать оценку эффективности термоэлектрического преобразования такой структурой. Результаты этого рассмотрения будут опубликованы позднее, они могут быть важными и в связи с задачами данного исследования. Это определяет дополнительный интерес к результатам планируемого экспериментального тестирования термоэлектрических характеристик наноконтактов металлизированных зондов с кремниевыми подложками.

Следует признать, что свойства точечных контактов кремния уже изучались и ранее, с 1980 – 1990 гг. Однако эти ранние эксперименты проводились преимущественно с контактами микронных и субмикронных размеров (20 – 0,3 мкм) [29, 30, 50], которые формировались между заостренными кромками кремниевых клиньев, прижимаемых друг к другу с силой 1 – 100 мН [50]. Механическое сжатие приводило к появлению существенных деформаций в приконтактной области, которые, по мнению самих авторов работ [30], были способны вызывать дополнительное рассеяние фононов и влиять на распространение потоков тепла. Размер контакта зонда АСМ с плоской поверхностью и силу их взаимодействия можно существенно снизить, чтобы более корректно имитировать контакт подложки со сформированным на ней nanoостровком. Паспортное значение упругой постоянной АСМ-зонда типа CSG01 (НТ МДТ, Россия), предназначенного для контактной моды измерений, составляет 0,03 Н/м. На типичной «кривой подвода» зонда АСМ переход от сил притяжения к силам отталкивания (когда устанавливается непосредственный контакт зонда с поверхностью) происходит на дистанции порядка 100 нм [41, 42]. По этим значениям можно оценить силу механического взаимодействия зонда с поверхностью образца как $F \approx 3 \cdot 10^{-9}$ Н. Диаметр пятна контакта d можно вычислить путем решения задачи об упругом взаимодействии сферы радиуса R и плоскости [41]:

$$d = \left(\frac{6FR}{E} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга (для кремния $E = 109$ ГПа), R – радиус острия зонда.

Для паспортного значения $R = 10$ нм это дает нам оценку минимального диаметра пятна контакта $d \approx 1,2$ нм. При достижении давлением порога пластической деформации (например, для случая металлической пластины) эта величина может несколько возрасти, но заведомо не превысит радиуса острия [41]. Таким образом, размер пятна контакта между зондом АСМ и кремниевой (или металлической) пластиной могут быть сделаны существенно меньшими, чем соответствующие величины, реализованные в классических

работах [29, 30, 50]. Сопоставление их результатов может представлять значительный интерес.

Углеродные наноструктуры и листки графена (sp^2 -углерод). Как уже указывалось выше, термоэлектрические свойства углеродных наноструктур рассматриваются в качестве основного объекта данного исследования. Другим объектом станут листки многослойного графена, имеющие большую площадь интерфейса с подложкой и представляющие собой более близкий аналог предлагаемой в структуры прототипа ТЭГ. Использование АСМ позволяет установить тепловой и электрический контакт с локальной областью отдельного листка многослойного графена и варьировать силу его прижатия к поверхности подложки.

Изображения и профили поверхности образцов естественно окисленных пластин кремния с углеродными наноструктурами и листками графена разной площади приведены на рис. 2, *a* – *c*. Они получены с помощью АСМ NanoDST (Pacific Nanotechnology), который планируется использовать и в термоэлектрических экспериментах.

Металлические наночастицы. Особенностью наноразмерных частиц в сравнении с объемными материалами является дискретный характер спектра разрешенных состояний. Эта особенность является благоприятной с точки зрения возможности достижения высокой термоэлектрической эффективности. В соответствии с известной формулой Мотта, коэффициент Зеебека определяется величиной производной энергетической плотности состояний на уровне Ферми [4]:

$$S = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left\{ \frac{d[\ln(\sigma(\epsilon))]}{d\epsilon} \right\}_{\epsilon=\epsilon_F}, \quad (4)$$

где k_B – постоянная Больцмана, ϵ_F – энергия Ферми, $\sigma(\epsilon)$ – величина дифференциального вклада носителей заряда с энергией ϵ в электропроводность.

Следует учитывать, что формула (4), вообще говоря, относится к металлам и вырожденным полупроводникам и может быть не вполне корректной для sp^2 -углерода. Однако она полезна для понимания общих тенденций: в окрестности дискретного энергетического уровня все производные по энергии велики, что, при оптимальном положении уровня Ферми, может обеспечить большую величину коэффициента Зеебека [3]. Варьирование параметров, а именно – размера частицы, электрического потенциала и т. п. – позволяет осуществлять «настройку» относительного положения уровня Ферми и разрешенных энергетических уровней, оптимизируя его для достижения высокой термоэлектрической эффективности.

Сопоставление термоэлектрических свойств углеродных и металлических

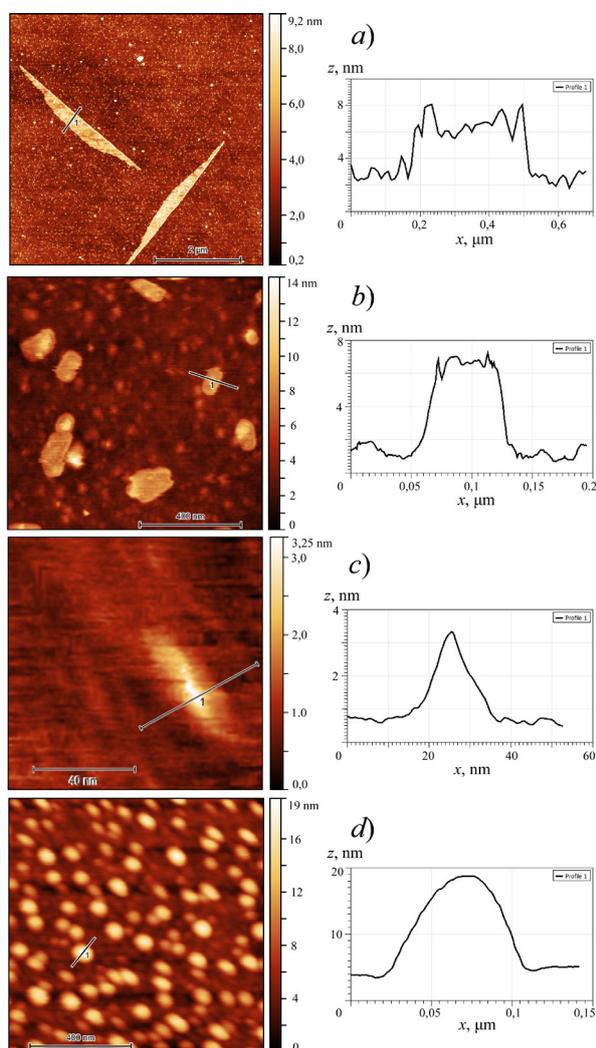


Рис. 2. АСМ-изображения (слева) и профили топографии поверхности нанобъектов (справа) на естественно окисленных кремниевых подложках.

Нанобъекты: листки многослойного графена большого (*a*) и малого (*b*) размеров, малый углеродный наноструктур (*c*) и металлические наночастицы вольфрама (*d*)

наночастиц может позволить отделить влияние размерных эффектов от влияния электронной структуры конкретных материалов. На рис. 2, *d* представлены АСМ-изображение и профиль поверхности наночастиц вольфрама для образца, сформированного на кремниевой подложке и приготовленного для исследования; подложка идентична таковым, используемым в остальных случаях.

Численное моделирование

В ходе общего планирования эксперимента было проведено численное моделирование распределения температуры по области контакта АСМ-зонда с плоской подложкой. Использовался программный пакет COMSOL Multiphysics, реализующий метод конечных элементов. При заданных геометрии и наборе граничных/начальных условий, пакет в принципе позволяет проводить поиск численных решений систем дифференциальных уравнений практически любого вида, в том числе систем, учитывающих размерные эффекты и нелокальность; например, уравнений из теоретических работ [32 – 37]. Однако на данном этапе исследований моделировалось лишь распределение температуры (но не термоэлектрического потенциала), причем использовались стандартные уравнения макроскопической теории теплопереноса и табличные значения тепловых параметров материалов. Такой подход определяется тем, что задачи моделирования на данном этапе (планирования эксперимента) были ограниченными.

Представим основные требования к этим задачам.

Во-первых, следовало установить, необходимы ли локальные измерения температуры вблизи области наноконтакта или достаточно определить температуры подложки образца и массивной части держателя зонда АСМ. Для этого фактически было необходимо оценить, какая часть общего перепада температуры между этими деталями (температуру которых измерить несложно) приходится на кантилевер стандартного зонда в типичных условиях эксперимента.

Во-вторых, требовалось определить, необходимы ли измерения в условиях вакуума или допустим эксперимент в атмосферных условиях. Для этого следовало оценить степень влияния воздушной среды и равновесного слоя адсорбата на свободных поверхностях на распределение температуры в области наноконтакта.

В-третьих, было необходимо определить, возможно ли использование стандартного металлизированного зонда в качестве металлического электрода наноконтакта металл/*sp*²-углерод или металл/полупроводник.

В-четвертых, требовалось оценить время установления температурного распределения после формирования наноконтакта в условиях планируемых экспериментов.

Для решения этих задач была необходима оценка перепадов температуры прежде всего на вспомогательных элементах экспериментального прибора (в первую очередь, на кантилевере АСМ-зонда), характерные размеры которых достаточно велики, чтобы вычисления по стандартной теории обеспечивали достаточную точность. Существенных погрешностей расчетов при этом можно было ожидать для самой области наноконтакта (вероятнее всего, в сторону меньшей теплопроводности), что учитывалось при анализе результатов. При выборе экспериментальной конфигурации требовалось, чтобы большая часть создаваемого перепада температуры концентрировалась в области наноконтакта. В этом случае максимальную оценку ожидаемой величины термоэдс можно получить простым умножением перепада температуры ΔT на даваемое теорией эффективное значение термоэлектрического коэффициента S (по данным статьи [21], для рассмотренной там структуры оно может достигать 50 мВ/К).

Расчеты распределения температуры проводили путем решения стандартного уравнения теплопроводности вида

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q, \quad (5)$$

где ρ , C_p – массовая плотность и теплоемкость вещества; \mathbf{u} – его локальная скорость (полагалась тождественно равной нулю); \mathbf{q} – плотность потока тепла; Q – плотность источников тепла.

На данном этапе исследований постулировалась линейная связь величины q с градиентом температуры (закон Фурье):

$$q = -\kappa \nabla T, \quad (6)$$

где κ – коэффициент теплопроводности.

Использовались значения параметров материалов, приведенные в табл. 1. Был задействован модуль “Heat Transfer in Solids and Fluids” пакета COMSOL Multiphysics, а при расчете переноса тепла через воздушную среду – также и модуль “Laminar Flow”.

Таблица 1

Тепловые параметры материалов, использованные при моделировании

Параметр	Значение параметра для материала			
	Si	Cu	Pt	Адсорбат (вода)
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	700	375	133	4200
Плотность, кг/м ³	2329	8960	21450	1000
Теплопроводность, Вт/(м·К)	130	394	71,6	0,56

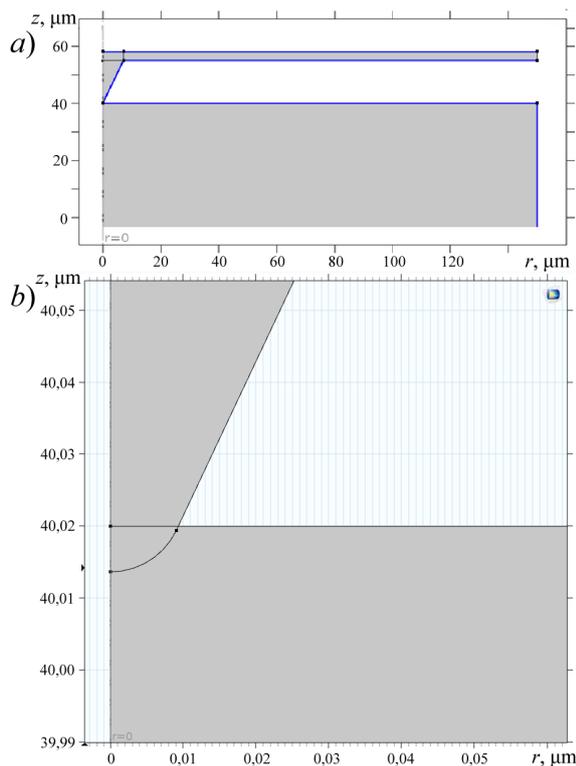


Рис. 3. Геометрия задачи численного моделирования распределения температуры по области наноконтакта АСМ-зонда с плоской подложкой: *a* – общий вид, *b* – область наноконтакта

Моделировался контакт кремниевого зонда АСМ с медной подложкой (толстая пластина). Геометрия острия и кантилевера (рис. 3,*a*, табл. 2) была задана в соответствии с параметрами и изображением зонда NSG10, приведенными на сайте производителя (НТ-МДТ, Россия). Для упрощения расчетов решалась 2D-задача с осью симметрии, проходящей через центр площадки контакта зонда с плоской подложкой. Форма острия зонда задавалась как конус, сопряженный со сферой (рис. 3,*b*). Радиус сферы брался равным 10 нм. Эта же сферическая поверхность считалась границей острия с подложкой; предполагалось, что механическое прижимное действие зонда было достаточно сильным для пластической деформации меди в области контакта. Отклонение 2D-геометрии от истинной 3D-геометрии компенсировалось через задание параметров материала кантилевера: его теплопроводность и теплоемкость в левой части (см. рис. 3,*a*) задавались табличными данными, а далее уменьшались по радиальной координате по закону $1/r$.

В начальный момент времени температура подложки задавалась равной 0°C, температура всех частей зонда – равной 100°C (при использовании линейных уравнений конкретные значения этих параметров не влияют на вид распределения). Граничные условия Дирихле ставились для нижней границы подложки (0°C) и для правого торца кантилевера (100°C). При решении задачи теплопроводности вычислялись стационарное распределение температуры, а также динамика установления этого стационарного состояния.

Таблица 2

**Геометрические параметры зонда АСМ,
использованные при моделировании**

Размер балки, мкм			Размер острия, нм		Угол при вершине конуса, град
Длина	Ширина	Толщина	Высота	Радиус кривизны	
125	27	3	$1,5 \cdot 10^4$	10	50

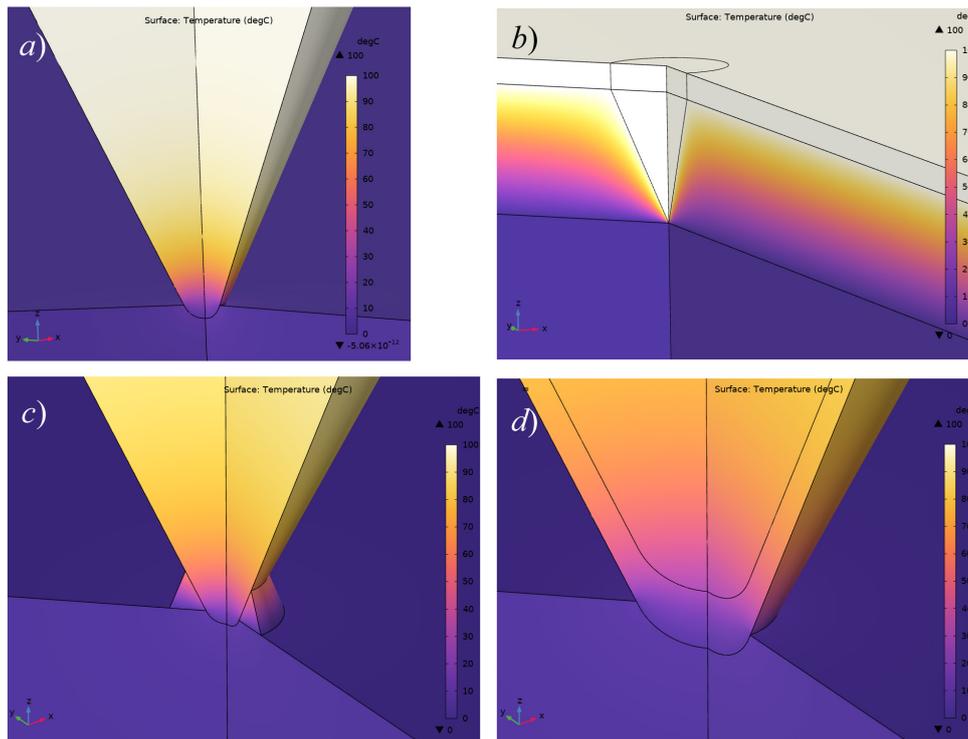


Рис. 4. Результаты решения задачи теплопроводности в области наноконтакта кремниевого зонда АСМ с медной подложкой. Представлены распределения температуры в условиях вакуума (а), с учетом теплопроводности через воздух (b) и присутствия на поверхности слоя жидкости (с), а также при наличии слоя металлизации зонда платиной (d)

На рис. 4 представлены результаты проведенного моделирования. Температурное распределение (см. рис. 4,а) было получено для кремниевого зонда, находящегося в контакте с чистой поверхностью медной пластины в условиях вакуума; перенос тепла электромагнитным излучением считался несущественным [41]. Как и ожидалось, в этих условиях доминирующая часть перепада температуры приходится на зонд, материал которого характеризуется меньшей теплопроводностью; геометрический фактор (коническая форма) также несколько увеличивает его тепловое сопротивление. Температура существенным образом изменяется лишь в области зонда вблизи наноконтакта, до расстояний порядка нескольких величин его радиуса. Перепад температуры на кантилевере пренебрежимо мал: заведомо не превосходит 1 % от полной разности температур.

Результаты моделирования стационарного распределения температуры в присутствии воздуха представлены на рис. 4,б. Были учтены потоки тепла через воздух за счет теплопроводности и конвекции. Здесь можно видеть непрерывное и приблизительно линейное изменение температуры в промежутке между пластиной и кантилевером. Из литературы известно [41, 51], что полный поток тепла между АСМ-зондом и подложкой при атмос-

ферном давлении в большой степени определяется именно конвекцией. Однако расчет показал, что теплопроводность кантилевера достаточна для того, чтобы конвективный поток тепла не искажал заметным образом температурное распределение вблизи наноконтакта и не изменял температуру основания (широкой части) зонда более чем на доли процента от ее полного перепада.

Сказанное выше относится и к влиянию слоя воды и адсорбированных газов, покрывающих свободные поверхности при нормальных условиях [41, 42]. Для оценки степени влияния адсорбата на распределение температуры, в модель был введен кольцевой слой (толщина 20 нм) с теплопроводностью воды, в область наноконтакта (см. рис. 4,с). Из сравнения результата расчета, представленного на рис. 4,с, с данными рис. 4,а видно, что влияние жидкого слоя на распределение температуры в наноконтакте минимально.

И наконец, была проведена оценка влияния металлизации зонда. Результат расчета температурного распределения для зонда, покрытого слоем платины толщиной 30 нм, показан на рис. 4,д. Видно, что значительная часть перепада температуры приходится именно на слой платины, имеющей относительно низкую теплопроводность. Следовательно, использование зондов с платиновым покрытием в планируемых экспериментах нежелательно. Предпочтительнее использовать зонды с другим покрытием, например из золота (его теплопроводность – 317 Вт/(м·К)) или другого металла с высокой теплопроводностью (например, из меди или серебра).

Таблица 3

Результаты моделирования времени установления стационарного распределения температуры при варьировании условий

Условие	Время установления, мкс	
	Зонд без покрытия	Зонд с покрытием из платины
Базовая модель (вакуум)	3,0	4,0
Атмосферный воздух	1,3	4,0
Слой жидкости на поверхности	$4,0 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$
Воздух + жидкость	$4,0 \cdot 10^3$	—

Результаты моделирования динамики установления температурного распределения после приведения зонда в контакт с поверхностью показали, что в отсутствие воздуха характерное время такого процесса не превышает нескольких микросекунд (табл. 3). В экспериментах в режиме регистрации кривых подвода (force-distance) АСМ такая задержка может быть проигнорирована. При моделировании теплопереноса через воздух время установления распределения температуры в воздушной среде оказалось существенно большим – миллисекунды. Однако и это, по всей видимости, не должно препятствовать измерениям, поскольку сам поток тепла через воздух должен слабо влиять на температуру зонда и подложки, а для приконтактной области время стабилизации температуры по-прежнему измеряется микросекундами. Этот вывод согласуется с литературными данными [45].

Таким образом, проведенное численное моделирование в упрощенной COMSOL-модели позволило решить его основную задачу: получить положительный ответ на вопрос о возможности постановки экспериментов по выявлению особенностей термоэлектрического эффекта в атмосферных условиях с использованием АСМ NanoDST и стандартных зондов.

Заключение

В работе представлены результаты начального этапа исследования, проводимого в Высшей инженерно-физической школе СПбПУ Петра Великого и посвященного

изучению наноразмерных особенностей термоэлектрического эффекта. Конечной его целью является создание термоэлектрических генераторов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В качестве первоочередной задачи выбрана экспериментальная проверка известной из литературы теории, описывающей возможность достижения высоких значений термоэлектрической эффективности за счет использования феномена увлечения носителей электрического заряда баллистическим потоком фононов в пленочной наноструктуре. Мы считаем, что проверка данной концепции может быть проведена относительно простыми средствами, а именно – измерением термоэлектрических характеристик нанополупроводниковых наноструктур и листов графена, сформированных на кремниевой подложке.

Результаты численного моделирования показали, что такие измерения можно провести с использованием атмосферного атомно-силового микроскопа со стандартными зондами после его дооборудования системами регулирования и измерения температуры образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sadeghi H.** Quantum and phonon interference-enhanced molecular-scale thermoelectricity // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2019. Vol. 123. No. 20. Pp. 12556–12562.
2. **Karlström O., Linke H., Karlström G., Wacker A.** Increasing thermoelectric performance using coherent transport // *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. No. 11. P. 113415.
3. **Mahan G. D., Sofo J. O.** The best thermoelectric // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1996. Vol. 93. No. 15. Pp. 7436–7439.
4. **Дмитриев А. С.** Введение в нанотеплофизику. 2-е изд., электронное. М.: Лаборатория знаний, 2020. 793 с.
5. **Zevalkink A., Smiadak D. M., Blackburn J. L., et al.** A practical field guide to thermoelectrics: Fundamentals, synthesis, and characterization // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. No. 2. P. 021303.
6. **Lyeo H. K., Khajetoorians A. A., Shi L., Pipe K. P., Ram R. J., Shakouri A., Shih C. K.** Profiling the thermoelectric power of semiconductor junctions with nanometer resolution // *Science*. 2004. Vol. 303. No. 5659. Pp. 816–818.
7. **Ikeda H., Salleh F.** Influence of heavy doping on Seebeck coefficient in silicon-on-insulator // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96. No. 1. P. 012106.
8. **Salleh F., Suzuki Y., Miwa K., Ikeda H.** Modulation of Seebeck coefficient for silicon-on-insulator layer induced by bias-injected carriers // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. No. 6. P. 062107.
9. **Tretiakov O. A., Abanov Ar., Sinova J.** Holey topological thermoelectrics // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99. No. 11. P. 113110.
10. **Krali E., Durrani Z. A. K.** Seebeck coefficient in silicon nanowire arrays // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 102. No. 14. P. 143102.
11. **Taniguchi T., Terada T., Komatsubara Y., Ishibe T., Konoike K., Sanada A., Naruse N., Mera Y., Nakamura Y.** Phonon transport in the nano-system of Si and SiGe films with Ge nanodots and approach to ultralow thermal conductivity // *Nanoscale*. 2021. Vol. 13. No. 9. Pp. 4971–4977.
12. **Bergfield J. P., Solis M. A., Stafford C. A.** Giant thermoelectric effect from transmission supernodes // *ACS (American Chemical Society) Nano*. 2010. Vol. 4. No. 9. Pp. 5314–5320.
13. **Хвесьюк В. И., Скрыбин А. С.** Теплопроводность наноструктур // *Теплофизика высоких температур*. 2017. Т. 55. № 3. С. 447–471.
14. **Dubi Y., Di Ventra M.** Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions // *Reviews of Modern Physics*. 2011. Vol. 83. No. 1. Pp. 131–155.
15. **Sadeghi H., Sangtarash S., Lambert C. J.** Oligoynes molecular junctions for efficient room temperature thermoelectric power generation // *Nano Letters*. 2015. Vol. 15. No. 11. Pp. 7467–7472.
16. **Cui L., Miao R., Wang K., Thompson D., Zotti L. A., Cuevas J. C., Meyhofer E., Reddy P.** Peltier cooling in molecular junctions // *Nature Nanotechnology*. 2018. Vol. 13. No. 2. Pp. 122–127.
17. **Liu C., Lu P., Chen W., Zhao Y., Chen Y.** Phonon transport in graphene based materials // *Physical Chemistry, Chemical Physics*. 2021. Vol. 23. No. 46. Pp. 26030–26060.

18. Варламов А. А., Кавокин А. В., Лукьянчук И. А., Шарапов С. Г. Аномальные термоэлектрические и термомагнитные свойства графена // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182. № 11. С. 1229–1234.
19. Wu Q., Sadeghi H., García-Suárez V. M., Ferrer J., Lambert C. J. Thermoelectricity in vertical graphene-C₆₀-graphene architectures // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 15 September. P. 11680.
20. Эйдельман Е. Д. Термоэлектрический преобразователь с рекордными параметрами на основе углеродных наноструктур: разработка научных основ // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. № 7. С. 944–947.
21. Эйдельман Е. Д. Термоэлектрический эффект и термоэлектрический генератор на основе углеродных наноструктур: достижения и перспективы // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191. № 6. С. 561–585.
22. Eydelman E. D., Vul' A. Ya. The strong thermoelectric effect in nanocarbon generated by ballistic phonon drag of electrons // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2007. Vol. 19. No. 7. Pp. 266210–266223.
23. Koniakhin S. V., Eidelman E. D. Phonon drag thermopower in graphene in equipartition regime // *Europhysics Letters*. 2013. Vol. 103. No. 3. P. 37006.
24. Andronov A., Budylna E., Shkitun P., Gabdullin P., Gnuchev N., Kvashenkina O., Arkhipov A. Characterization of thin carbon films capable of low-field electron emission // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2018. Vol. 36. No. 2. P. 02C108.
25. Gabdullin P., Zhurkin A., Osipov V., Besedina N., Kvashenkina O., Arkhipov A. Thin carbon films: Correlation between morphology and field-emission capability // *Diamond & Related Materials*. 2020. Vol. 105. May. P. 107805.
26. Эйдельман Е. Д., Архипов А. В. Полевая эмиссия из углеродных наноструктур: модели и эксперимент // *Успехи физических наук*. 2020. Т. 190. № 7. С. 693–714.
27. Богачек Э. Н., Кулик И. О., Омелянчук А. Л., Шкорбатов А. Г. Термоэдс увлечения в металлических системах, содержащих микроконтакт // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1985. Т. 41. № 12. С. 519–521.
28. Shklyarevskii O. I., Jansen A. G. M., Hermesen J. G. H., Wyder P. Thermoelectric voltage between identical metals in a point-contact configuration // *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 57. No. 11. Pp. 1374–1377.
29. Trzcinski R., Gmelin E., Queisser H. J. Quenched phonon drag in silicon microcontacts // *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 56. No. 10. Pp. 1086–1089.
30. Weber L., Lehr M., Gmelin E. Reduction of the thermopower in semiconducting point contacts // *Physical Review B*. 1992. Vol. 46. No. 15. 9511–9514.
31. Mahan G. D., Claro F. Nonlocal theory of thermal conductivity // *Physical Review B*. 1988. Vol. 38. No. 3. Pp. 1963–1969.
32. Mahan G. D. The Benedicks effect: Nonlocal electron transport in metals // *Physical Review B*. 1991. Vol. 43. No. 5. Pp. 3945–3951.
33. Grigorenko A. N., Nikitin P. I., Jelski D. A., George T. F. Thermoelectric phenomena in metals under large temperature gradients // *Journal of Applied Physics*. 1991. Vol. 69. No. 5. Pp. 3375–3377.
34. Vermeersch B., Shakouri A. Nonlocality in microscale heat conduction. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118469205> (Дата обращения 11.09.2023).
35. Koh Y. K., Cahill D. G., Sun B. Nonlocal theory for heat transport at high frequencies // *Physical Review B*. 2014. Vol. 90. No. 20. P. 205412.
36. Ezzahri Y., Joulain K., Ordonez-Miranda J. Heat transport in semiconductor crystals: Beyond the local-linear approximation // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 128. No. 10. P. 105104.
37. Baratifarimani R., Shomali Z. Implementation of nonlocal non-Fourier heat transfer for semiconductor nanostructures. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259317109> (Дата обращения 11.09.2023).
38. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E., Mahan G. D., Majumdar A., Maris H. J., Merlin R., Phillpot S. R. Nanoscale thermal transport // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93. No. 2. Pp. 793–818.
39. Wang C., Chen F., Sun K., Chen R., Li M., Zhou X., Sun Y., Chen D., Wang G. Instruments for measuring Seebeck coefficient of thin film thermoelectric materials: A mini-review // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. No. 10. P. 101501.

40. **Kim S. J., We J. H., Kim G. S., Cho B. J.** Simultaneous measurement of the Seebeck coefficient and thermal conductivity in the cross-sectional direction of thermoelectric thick film // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. No. 10. P. 104511.
41. **Majumdar A.** Scanning thermal microscopy // *Annual Review of Materials Science*. 1999. Vol. 29. No. 1. Pp. 505–585.
42. **Shi L., Plyasunov S., Bachtold A., McEuen P. L., Majumdar A.** Scanning thermal microscopy of carbon nanotubes using batch-fabricated probes // *Applied Physics Letters*. 2000. Vol. 77. No. 26. Pp. 4295–4297.
43. **Fletcher P. C., Lee B., King W. P.** Thermoelectric voltage at a nanometer-scale heated tip point contact // *Nanotechnology*. Vol. 23. No. 3. P. 035401.
44. **Nakamoto G., Nakabayashi Y.** Development of a two dimensional scanning Seebeck coefficient measurement system by a micro-probe method // *Intermetallics*. 2013. Vol. 32. January. Pp. 233–238.
45. **Tan A., Sadat S., Reddy P.** Measurement of thermopower and current-voltage characteristics of molecular junctions to identify orbital alignment // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96. No. 1. P. 013110.
46. **Cahill D. G., Braun P. V., Chen G., et al.** Nanoscale thermal transport. II. 2003–2012 // *Applied Physics Reviews*. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 011305.
47. **De Boor J., Müller E.** Data analysis for Seebeck coefficient measurements // *Review of Scientific Instruments*. 2013. Vol. 84. No. 6. P. 065102.
48. **Bizyaev I., Gabdullin P., Chumak M., Babyuk V., Davydov S., Osipov V., Kuznetsov A., Kvashenkina O., Arkhipov A.** Low-field electron emission capability of thin films on flat silicon substrates: Experiments with Mo and general model for refractory metals and carbon // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 3350.
49. **Arkhipov A. V., Eidelman E. D., Zhurkin A. M., Osipov V. S., Gabdullin P. G.** Low-field electron emission from carbon cluster films: Combined thermoelectric/hot-electron model of the phenomenon // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2020. Vol. 28. No. 4. Pp. 286–294.
50. **Weber L., Gmelin E.** A new device for transport measurements on point contacts // *Review of Scientific Instruments*. 1992. Vol. 63. No. 1. Pp. 211–217.
51. **Williams C. C., Wickramasinghe H. K.** Scanning thermal profiler // *Applied Physics Letters*. 1986. Vol. 49. No. 23. Pp. 1587–1589.

REFERENCES

1. **Sadeghi H.**, Quantum and phonon interference-enhanced molecular-scale thermoelectricity, *J. Phys. Chem. C*. 123 (20) (2019) 12556–12562.
2. **Karlström O., Linke H., Karlström G., Wacker A.**, Increasing thermoelectric performance using coherent transport, *Phys. Rev. B*. 84 (11) (2011) 113415.
3. **Mahan G. D., Sofo J. O.**, The best thermoelectric, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 93 (15) (1996) 7436–7439.
4. **Dmitriyev A. S.**, *Vvedeniye v nanoteplofiziku, 2-e izdaniye, elektronnoye* [Introduction to nanothermophysics, Second electronic edition], “Laboratoriya Znaniy” Publishing, Moscow, 2020 (in Russian).
5. **Zevalkink A., Smiadak D. M., Blackburn J. L., et al.**, A practical field guide to thermoelectrics: Fundamentals, synthesis, and characterization, *Appl. Phys. Rev.* 5 (2) (2018) 021303.
6. **Lyeo H. K., Khajetoorians A. A., Shi L., et al.**, Profiling the thermoelectric power of semiconductor junctions with nanometer resolution, *Science*. 303 (5659) (2004) 816–818.
7. **Ikeda H., Salleh F.**, Influence of heavy doping on Seebeck coefficient in silicon-on-insulator, *Appl. Phys. Lett.* 96 (1) (2010) 012106.
8. **Salleh F., Suzuki Y., Miwa K., Ikeda H.**, Modulation of Seebeck coefficient for silicon-on-insulator layer induced by bias-injected carriers, *Appl. Phys. Lett.* 103 (6) (2013) 062107.
9. **Tretiakov O. A., Abanov Ar., Sinova J.**, Holey topological thermoelectrics, *Appl. Phys. Lett.* 99 (11) (2011) 113110.
10. **Krali E., Durrani Z. A. K.**, Seebeck coefficient in silicon nanowire arrays, *Appl. Phys. Lett.* 102 (14) (2013) 143102.

11. **Taniguchi T., Terada T., Komatsubara Y., et al.**, Phonon transport in the nano-system of Si and SiGe films with Ge nanodots and approach to ultralow thermal conductivity, *Nanoscale*. 13 (9) (2021) 4971–4977.
12. **Bergfield J. P., Solis M. A., Stafford C. A.**, Giant thermoelectric effect from transmission supernodes, *ACS Nano*. 4 (9) (2010) 5314–5320.
13. **Khvesyuk V. I., Scriabin A. S.**, Thermal conductivity of nanostructures, *High Temperature*. 55 (3) (2017) 428–450.
14. **Dubi Y., Di Ventura M.**, Colloquium: Heat flow and thermoelectricity in atomic and molecular junctions, *Rev. Mod. Phys.* 83 (1) (2011) 131–155.
15. **Sadeghi H., Sangtarash S., Lambert C. J.**, Oligoynes molecular junctions for efficient room temperature thermoelectric power generation, *Nano Lett.* 15 (11) (2015) 7467–7472.
16. **Cui L., Miao R., Wang K., et al.**, Peltier cooling in molecular junctions, *Nat. Nanotechnol.* 13 (2) (2018) 122–127.
17. **Liu C., Lu P., Chen W., et al.**, Phonon transport in graphene based materials, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 23 (46) (2021) 26030–26060.
18. **Varlamov A. A., Kavokin A. V., Luk'yanchuk I. A., Sharapov S. G.**, Anomalous thermoelectric and thermomagnetic properties of graphene, *Phys.–Usp.* 55 (11) (2012) 1146–1151.
19. **Wu Q., Sadeghi H., García-Suárez V. M., et al.**, Thermoelectricity in vertical graphene-C₆₀-graphene architectures, *Sci. Rep.* 7 (15 Sept) (2017) 11680.
20. **Eidelman E. D.**, On a carbon nanostructure-based thermoelectric converter with record parameters, *Semicond.* 51 (7) (2017) 906–908.
21. **Eidelman E. D.**, Thermoelectric effect and a thermoelectric generator based on carbon nanostructures: Achievements and prospects, *Phys.–Usp.* 64 (6) (2021) 535–557.
22. **Eidelman E. D., Vul' A. Ya.**, The strong thermoelectric effect in nanocarbon generated by ballistic phonon drag of electrons, *J. Phys. Condens. Matter*. 19 (7) (2007) 266210–266223.
23. **Koniakhin S. V., Eidelman E. D.**, Phonon drag thermopower in graphene in equipartition regime, *Europhys. Lett.* 103 (3) (2013) 37006.
24. **Andronov A., Budylnina E., Shkitun P., et al.**, Characterization of thin carbon films capable of low-field electron emission, *J. Vac. Sci. Technol. B*. 36 (2) (2018) 02C108.
25. **Gabdullin P., Zhurkin A., Osipov V., et al.**, Thin carbon films: Correlation between morphology and field-emission capability, *Diam. Relat. Mater.* 105 (May) (2020) 107805.
26. **Eidelman E. D., Arkhipov A. V.**, Field emission from carbon nanostructures: Models and experiment, *Phys.–Usp.* 63 (7) (2020) 648–667.
27. **Bogachek E. N., Kulik I. O., Omel'yanchuk A. N., Shkorbatov A. G.**, Drag-related thermo-emf in metallic systems containing a point contact, *JETP Lett.* 41 (12) (1985) 633–636.
28. **Shklyarevskii O. I., Jansen A. G. M., Hermsen J. G. H., Wyder P.**, Thermoelectric voltage between identical metals in a point-contact configuration, *Phys. Rev. Lett.* 57 (11) (1986) 1374–1377.
29. **Trzcinski R., Gmelin E., Queisser H. J.**, Quenched phonon drag in silicon microcontacts, *Phys. Rev. Lett.* 56 (10) (1986) 1086–1089.
30. **Weber L., Lehr M., Gmelin E.**, Reduction of the thermopower in semiconducting point contacts, *Phys. Rev. B*. 46 (15) (1992) 9511–9514.
31. **Mahan G. D., Claro F.**, Nonlocal theory of thermal conductivity, *Phys. Rev. B*. 38 (3) (1988) 1963–1969.
32. **Mahan G. D.**, The Benedicks effect: Nonlocal electron transport in metals, *Phys. Rev. B*. 43 (5) (1991) 3945–3951.
33. **Grigorenko A. N., Nikitin P. I., Jelski D. A., George T. F.**, Thermoelectric phenomena in metals under large temperature gradients, *J. Appl. Phys.* 69 (5) (1991) 3375–3377.
34. **Vermeersch B., Shakouri A.**, Nonlocality in microscale heat conduction, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118469205>. (Accessed September 11, 2023).
35. **Koh Y. K., Cahill D. G., Sun B.**, Nonlocal theory for heat transport at high frequencies, *Phys. Rev. B*. 90 (20) (2014) 205412.
36. **Ezzahri Y., Joulain K., Ordóñez-Miranda J.**, Heat transport in semiconductor crystals: Beyond the local-linear approximation, *J. Appl. Phys.* 128 (10) (2020) 105104.
37. **Baratifarimani R., Shomali Z.**, Implementation of nonlocal non-Fourier heat transfer for semiconductor nanostructures, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259317109> (Accessed September 11, 2023).

38. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E., et al., Nanoscale thermal transport, J. Appl. Phys. 93 (2) (2003) 793–818.
39. Wang C., Chen F., Sun K., et al., Instruments for measuring Seebeck coefficient of thin film thermoelectric materials: A mini-review, Rev. Sci. Instrum. 89 (10) (2018) 101501.
40. Kim S. J., We J. H., Kim G. S., Cho B. J., Simultaneous measurement of the Seebeck coefficient and thermal conductivity in the cross-sectional direction of thermoelectric thick film, J. Appl. Phys. 112 (10) (2012) 104511.
41. Majumdar A., Scanning thermal microscopy, Annu. Rev. Mater. Sci. 29 (1) (1999) 505–585.
42. Shi L., Plyasunov S., Bachtold A., et al., Scanning thermal microscopy of carbon nanotubes using batch-fabricated probes, Appl. Phys. Lett. 77 (26) (2000) 4295–4297.
43. Fletcher P. C., Lee B., King W. P., Thermoelectric voltage at a nanometer-scale heated tip point contact, Nanotechnology. 23 (3) (2011) 035401.
44. Nakamoto G., Nakabayashi Y., Development of a two dimensional scanning Seebeck coefficient measurement system by a micro-probe method, Intermetallics. 32 (Jan) (2013) 233–238.
45. Tan A., Sadat S., Reddy P., Measurement of thermopower and current-voltage characteristics of molecular junctions to identify orbital alignment, Appl. Phys. Lett. 96 (1) (2010) 013110.
46. Cahill D. G., Braun P. V., Chen G., et al., Nanoscale thermal transport. II. 2003–2012, Appl. Phys. Rev. 1 (1) (2014) 011305.
47. De Boor J., Müller E., Data analysis for Seebeck coefficient measurements, Rev. Sci. Instrum. 84 (6) (2013) 065102.
48. Bizyaev I., Gabdullin P., Chumak M., et al., Low-field electron emission capability of thin films on flat silicon substrates: Experiments with Mo and general model for refractory metals and carbon, Nanomaterials. 11 (12) (2021) 3350.
49. Arkhipov A. V., Eidelman E. D., Zhurkin A. M., et al., Low-field electron emission from carbon cluster films: Combined thermoelectric/hot-electron model of the phenomenon, Fuller. Nanotub. Car. N. 28 (4) (2020) 286–294.
50. Weber L., Gmelin E., A new device for transport measurements on point contacts, Rev. Sci. Instrum. 63 (1) (1992) 211–217.
51. Williams C. C., Wickramasinghe H. K., Scanning thermal profiler, Appl. Phys. Lett. 49 (23) (1986) 1587–1589.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРОФИМОВИЧ Карина Робертовна – студентка Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
karina-khasanova-2001@mail.ru

ГАБДУЛЛИН Павел Гарифович – кандидат технических наук, доцент, директор Научно-технологического центра «Нейропрогнозирование материалов и технологий электронной промышленности» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
gabdullin_pg@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-2519-2577

АРХИПОВ Александр Викторович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
arkhipov@rphf.spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3321-7797

THE AUTHORS

TROFIMOVICH Karina R.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
karina-khasanova-2001@mail.ru

GABDULLIN Pavel G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
gabdullin_pg@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-2519-2577

ARKHIPOV Alexander V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
arkhipov@rphf.spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3321-7797

*Статья поступила в редакцию 16.09.2023. Одобрена после рецензирования 01.12.2023.
Принята 01.12.2023.
Received 16.09.2023. Approved after reviewing 01.12.2023. Accepted 01.12.2023.*