Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 6, с. 443 – 449 © 2023 г. 25 марта

Измерение теплопроводности углеродных наностенок методом третьей гармоники

Д. А. Чернодубов[a], Ю. В. Бондарева[b], М. В. Шибалов[c], А. М. Мумляков[c], В. Л. Жданов[d], М. А. Тархов[c], К. И. Маслаков[e], Н. В. Суетин[f], Д. Г. Квашнин[g,h1)], С. А. Евлашин[b]

[a] *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[b] *Сколковский институт науки и технологий, 143025 Москва, Россия*

[c] *Институт нанотехнологий и микроэлектроники РАН, 119991 Москва, Россия*

[d] *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 101000 Москва, Россия*

[e] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия*

[f] *Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, 119991 Москва, Россия*

[g] *Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, 119334 Москва, Россия*

[h] *Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, 117997 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.
После переработки 8 февраля 2023 г.
Принята к публикации 8 февраля 2023 г.

Методом химического осаждения из газовой фазы в разряде постоянного тока были получены пленки углеродных наностенок разной толщины. Впервые проведено измерение теплопроводности полученных структур с использованием метода третьей гармоники (3-омега) в диапазоне температур от 280 до 310 K. Показана зависимость теплопроводности стенок от их толщины. При толщине пленки 1 мкм значение теплопроводности углеродных наностенок составляет 6.9 Вт м$^{-1}$ K^{-1}. Полученные результаты необходимы для конструирования электрооптических приборов на основе углеродных наностенок.

DOI: 10.31857/S1234567823060083, EDN: qswcql

1. Введение. Тенденция к миниатюризации современных электронных устройств ставит актуальную задачу увеличения эффективности процессов теплоотвода, так как увеличение плотности тепловой мощности при недостаточном теплоотводе может привести к ухудшению характеристик приборов, снижению их работоспособности и даже выходу из строя [1].

Материалы на основе углерода обладают рекордными значениями теплопроводности. Так, теплопроводность алмаза при комнатной температуре достигает 2400 Вт м$^{-1}$ K^{-1} [2], равно как и величина теплопроводности низкоразмерных углеродных наноструктур, таких как графен и углеродные нанотрубки, превышает несколько тысяч Вт м$^{-1}$ K^{-1} [2, 3]. Стоит отметить, что последние теоретические исследования отмечают зависимость теплопроводности между слоями графена от наличия дефектов и деформации [4–6]. Такие высокие значения теплопроводности позволяют использовать углеродные структуры в качестве эффективных теплоотводящих материалов, способствующих улучшению характеристик электронных устройств.

Для достижения высоких значений теплопроводности углеродных материалов требуется обеспечение высокой чистоты и бездефектности выращиваемых структур [3, 7–12]. Например, для аморфного углерода теплопроводность при комнатной температуре может быть на три порядка меньше, около 1 Вт м$^{-1}$ K^{-1} [3].

Перспективным классом структур для использования в современной электронике являются углеродные наностенки (Carbon NanoWalls, УНС) [13–21], которые представляют собой углеродные структуры из преимущественно вертикально ориентированных графитоподобных двумерных листов, напоминающих стенки. Толщина получаемых стенок варьируется от 1 до 10 нм [17–19]. Благодаря высокой удельной площади поверхности [11] УНС используются в качестве светопоглотителей [20], элементов мемри-

1) e-mail: dgkvashnin@phystech.edu

сторов [15], в топливных ячейках [21], конденсаторах и суперконденсаторах [16], электродах литий-ионных и солнечных батарей [22, 23] и др. Экспериментальные исследования показывают, что применение УНС и нановолокон увеличивает теплоотвод от чипа на $\sim 10\,\%$ и тем самым уменьшает температуру в "горячих точках" в ходе работы устройств, в том числе при высоких рабочих мощностях тока [24]. Однако тепловые характеристики таких структур плохо изучены.

Измерение теплопроводности важно для моделирования процессов теплопереноса в УНС. Однако процесс измерения теплопроводности в таких материалах является непростой задачей, в силу сложной морфологии и небольшой толщины УНС. В работе [25] при помощи метода лазерного импульса при комнатной температуре была измерена теплопроводность УНС, выращенных при помощи радиочастотной плазмы с расширяющимся лучом на подложке из плавленого кварца с буферным слоем нитрида алюминия. Полученные значения теплопроводности составили 5, 7, 12 и 18 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ при толщинах 700, 1000, 2200 и 4300 нм соответственно. В силу того, что УНС являются пористыми, необходимо пересчитывать эффективную теплопроводность k_{CNW} с учетом плотности структур. Соотношение истинной и кажущейся плотностей по результатам измерений составило 0.22 и, таким образом, величины эффективной теплопроводности были определены как 20, 32, 55 и 80 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ соответственно толщинам пленок.

Ранее нами было исследовано изменение теплопроводности для пленок УНС на плавленом кварце в диапазоне температур от 4.7 до 96 К. Полученные величины теплопроводности и их температурные зависимости подобны таковым для фуллеритов [26] и фуллеренов [27]. При температурах около 90 К теплопроводность пленок УНС близка к теплопроводности ультра-нано-кристаллических алмазных пленок [3], и составляет 10 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$.

Данная работа посвящена исследованию процессов теплопереноса и измерению поведения теплопроводности УНС на кремниевой подложке в диапазоне комнатных температур, что крайне важно для практической реализации электронных устройств на их основе. Для измерения теплопроводности УНС впервые был использован метод третьей гармоники (3-омега). Получены температурные зависимости теплопроводности для пленок УНС толщиной 400 и 1000 нм.

2. Методы исследования.

2.1. Условия роста пленок. Исследуемые пленки УНС были выращены на кремниевой подложке при помощи метода химического осаждения из газовой фазы в разряде постоянного тока (Direct Current Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, DC PECVD) [28]. Для синтеза структур использовалась смесь газов CH_4 и H_2. Продолжительность роста составила 20 и 60 мин, что соответствует высоте стенок 400 и 1000 нм. На рисунке 1a представлены изображения синтезированных пленок УНС толщиной 400 нм, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для исключения шунтирования нагревателя при измерении теплопроводности после получения пленок, на их поверхность был нанесен слой оксида гафния толщиной 40 нм с использованием атомно-слоевого осаждения (Atomic Layer Deposition, ALD). Пленка оксида гафния осаждалась повторением реакционных серий, включающих в себя подачу металлоорганического прекурсора TDMAH (tetrakis(dimethylamino)hafnium(IV)) и паров H_2O в качестве неметаллического реактанта. Более подробно процесс осаждения диэлектриков описан в работах [16, 29]. Следующим этапом была нанесена пленка золота толщиной 100 нм в качестве нагревателя-измерителя для проведения измерений теплопроводности при помощи метода 3-омега с использованием установки магнетронного распыления (рис. 1b). Детали процесса нанесения золотой пленки на УНС подробно описаны в предыдущей работе [30]. На поверхность золота был нанесен фотополимер S1805 для создания структур нужной формы.

После было проведено экспонирование с использованием контактного шаблона и последующее травление в 1М растворе KOH. Схема наносимых слоев показана на рис. 1c. После создания шаблонов с ширинами $2b = 5$, 10, 20, 40 и 50 мкм и длиной около 2 мм было проведено травление в установке с индуктивно-связанной плазмой (ICP-RIE) в среде Ar (30 см^3/мин). Температура столика составляла 15 °C, давление в камере 2.5 мТорр, мощность источников ICP и RF 900 Вт и 125 Вт соответственно. Время травления – 5 мин [16]. После создания структур фоторезистивный слой был удален с использованием растворителя. Схематическое изображение структуры с нанесенными нагревателями-измерителями приведено на рис. 1d. На рисунке 1e показан боковой срез структур, а на рис. 1f показано соответствующее распределение элементного состава внутри образца, измеренное при помощи энергодисперсионного анализа.

2.2. Характеризация морфологии и химического состава пленок УНС. Исследования полученных пленок были проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа SEM + FIB Helios G4

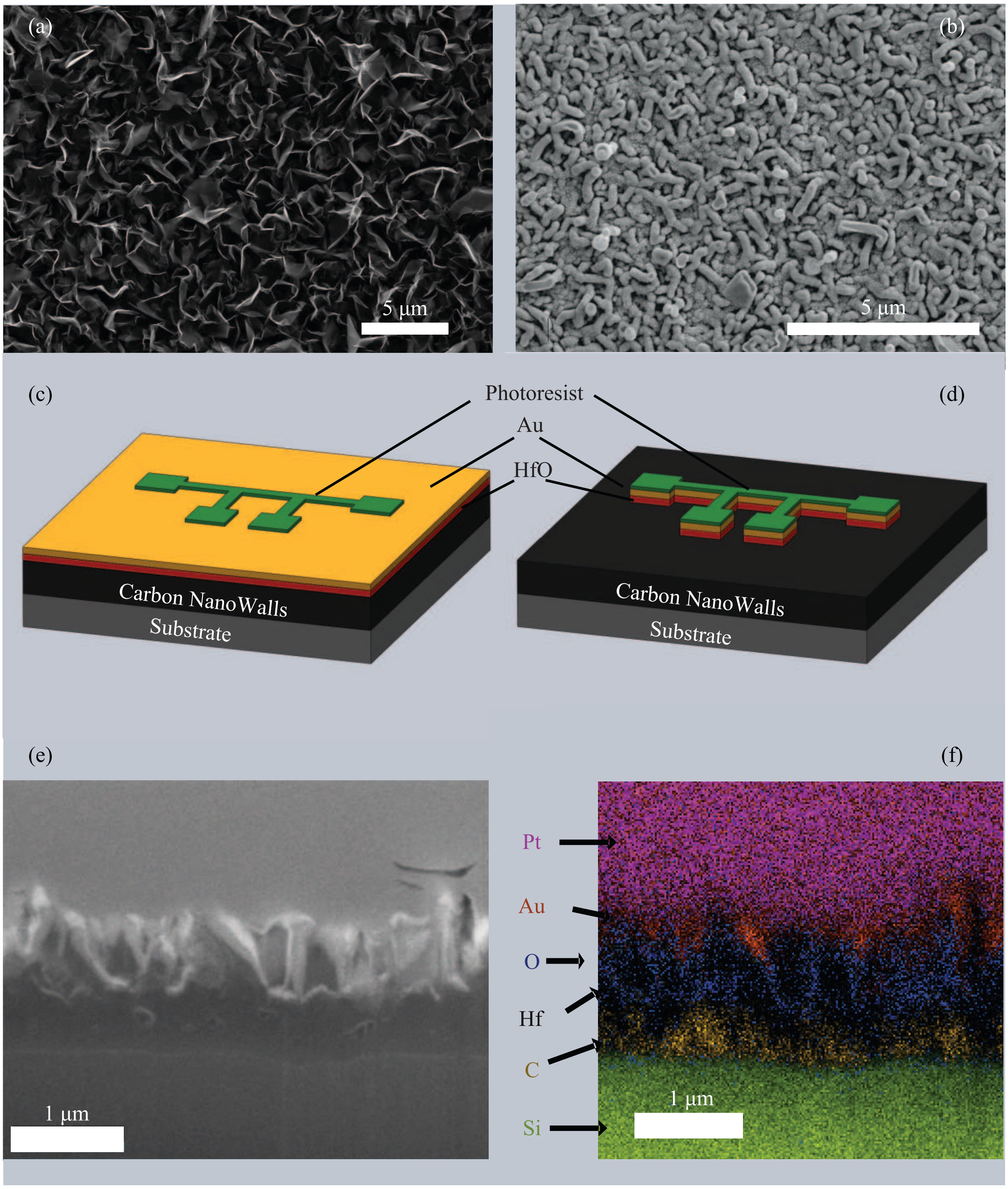

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Изображение СЭМ для образца толщиной 400 нм; (b) – изображение СЭМ для образца покрытого слоем золота; (c) – схематическое изображение нанесенных слоев структуры; (d) – схематическое изображение итогового нагревателя-измерителя на поверхности исследуемого образца; (e) – СЭМ изображение поперечного сечения структур и (f) – карта распределения элементов в поперечном сечении для образца структуры толщиной 400 нм с нанесенными нагревателями-измерителями

Plasma FIB Uxe с энергодисперсионной приставкой EDAX. Исследования особенностей структуры полученных пленок УНС были проведены с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света (Thermo Scientific DXR Raman Microscope) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) Axis Ultra DLD (Kratos Analytical, UK) [28].

2.3. Измерения теплопроводности пленок УНС. Измерения теплопроводности выполнены методом 3-омега [31]. Его суть заключается в определении зависимости действительной части амплитуды температурных колебаний нагревателя, нанесенного на поверхность образца, от частоты переменного тока, проходящего через этот нагреватель. В качестве нагревателей-термометров использовались пленки золота толщиной 100 нм с ширинами $2b = 5$, 10, 20, 40 и 50 мкм и длиной $l = 2$ мм. Зависимость действительной части амплитуды температурных колебаний от частоты тока, протекающего через нагреватель-измеритель, позволяет определить как теплопроводность объемной подложки по ее наклону, так и теплопроводность тонких слоев, поскольку их наличие изменяет характер теплопереноса в структуре, увеличивая ее тепловое сопротивление. В случае, если толщина измеряемой пленки много меньше ширины нагревателя, можно считать, что тепловой поток не успевает ушириться на пленке и проходит через нее прямым фронтом, увеличивая амплитуду температурных колебаний. Таким образом, задача измерения величины теплопроводности тонкой пленки может быть решена при проведении измерений при помощи двух нагревателей-термометров разной ширины.

Достоинством методики 3-омега является возможность прямого измерения теплопроводности пленок малой толщины (от сотен нанометров) в широком диапазоне температур. Классические методики измерения теплопроводности, такие как метод продольного теплового потока, не позволяют проводить измерения тонких пленок из-за конечного размера термопар или термометров сопротивления, при помощи которых производится измерение градиента температур на образце. Существуют другие современные методики измерения теплопроводности тонких пленок, такие как частотный или временной терморефлектанс (frequency-domain thermoreflectance (FDTR), time-domain thermoreflectance (TDTR)), но по сравнению с методом 3-омега они более сложны в реализации и проигрывают в точности измерений.

Амплитуда температурных колебаний нагревателя ΔT измерялась в диапазоне частот от 1 до 33000 Гц при токе амплитудой 15 мА. Измерения проводились в вакуумированной ячейке, охлаждаемой парами азота. Подробное описание аппаратуры и методики измерений амплитуды температурных колебаний от частоты приведено в работе [32]. Из измеренной амплитуды температурных колебаний определялись тепловые сопротивления нагревателей как $R = \Delta T/P$, где P – тепловая мощность, подаваемая на нагреватель. Эффективная теплопроводность $k_{\rm eff}$ тонких пленок в направлении, перпендикулярном слою структур, определялась как [33, 34]:

$$k_{\rm eff} = \frac{t}{2l}\frac{\frac{1}{b_1}-\frac{1}{b_2}}{\left(R_1-R_2\right)-\left(\ln\frac{b_2}{b_1}\right)\Big/2\pi l k_s}, \qquad (1)$$

где t – толщина пленки, b_i – полуширины нагревателей, k_s – теплопроводность подложки, которая определялась в этом же эксперименте по наклону зависимости R_i ($i = 1, 2$ для нагревателей шириной 5 и 10 мкм соответственно) от натурального логарифма частоты тока через нагреватели. Поскольку в рамках модели измерения теплопроводности методом 3-омега тонкая пленка вносит постоянный вклад в величину амплитуды температурных колебаний, для определения теплопроводности тонкой пленки нужно провести как минимум два измерения, варьируя один из геометрических параметров системы – проще всего это сделать, используя нагреватели разных ширин.

3. Результаты и обсуждения. На рисунке 2a приведены спектры КР для пленок УНС толщиной 400 нм (черная кривая, снизу) и 1000 нм (синяя кривая, сверху). Для оценки размера нанокристаллических доменов L_a использовалась эмпирическая формула из работы [35]:

$$L_a = (2.4\times10^{-10})\lambda_l^4\left(\frac{I_D}{I_G}\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где λ_l – длина волны КР,I_D и I_G – интегральные интенсивности мод КР. На основе полученных спектров были определены интегральные соотношения пиков I_D/I_G, которые составили 0.9 и 1.8 для образцов толщиной 400 и 1000 нм соответственно. Размеры кристаллических доменов составили 10 и 17 нм. Полученные различия в размерах доменов свидетельствуют о разном количестве дефектов на единицу поверхности структур. Наличие дефектов может приводить к адсорбции функциональных групп. Для определения наличия и количества функциональных групп на поверхности образцов использовали РФЭС. Полученные образцы, помимо углерода ($\sim$ 99.86 ат. %), содержали очень низкую концентрацию кислорода (0.14 ат. %), которая является порогом чувствительности метода. Образцы, полученные при разных временах синтеза, имели идентичные C1s спектры (рис. 2b). Основной вклад в РФЭС-

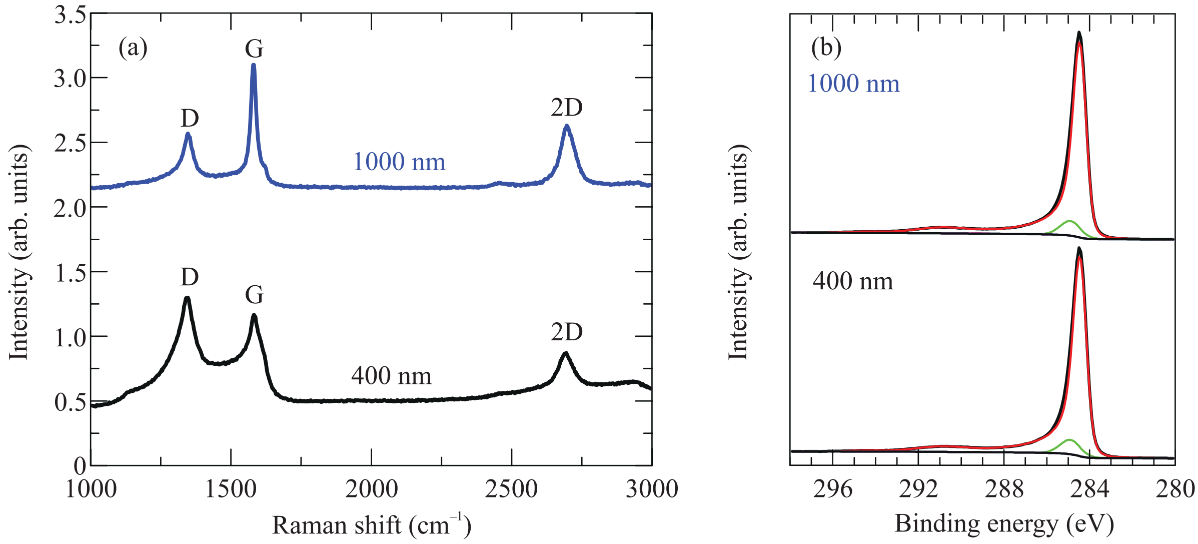

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Спектры КРС и (b) – C1s РФЭС-спектры образцов толщиной 400 и 1000 нм

спектры дает ассиметричная компонента при энергии связи 284.5 эВ с характерными ароматическими сателлитами встряски, отвечающая sp^2-углероду. Доля sp^2-углерода составляет 92.92 ат. %, также наблюдается компонента (около 6.88 ат. %) при энергии связи 284.9 эВ, которая соответствует sp^3-углероду [28]. Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе синтеза не происходит изменение химического состава УНС и количество функциональных групп на поверхности остается постоянным.

На рисунке 3a приведены частотные зависимости тепловых сопротивлений нагревателей шириной 5 и 10 мкм, нанесенных на пленку толщиной 400 нм. Из полученных зависимостей следует, что в диапазоне 100–1300 Гц разность тепловых сопротивлений R_1 и R_2 для двух нагревателей разной толщины постоянна, что позволяет определить величину теплопроводности по наклону S зависимости амплитуды температурных колебаний от частоты k_s как [36]

$$k_S = -\frac{P}{2\pi l S}. \tag{3}$$

Величина k_s составила 120 ± 5 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ при 300 К. На рисунке 3 представлена температурная зависимость теплопроводности k_{eff} двух пленок УНС толщиной $t = 400$ и 1000 нм в диапазоне от 280 до 310 К. Для измерений использовалась пара нагревателей с ширинами 20 и 40 мкм для образца толщиной 1000 нм и ширинами 5 и 10 мкм для образца толщиной 400 нм соответственно. При температуре 300 К теплопроводность двух слоев отличается более чем в 7 раз: 5.9 ± 0.6 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ для образца толщиной 1000 нм и 0.79 ± 0.11 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ для образца толщиной 400 нм.

Следует отметить, что измеряемая методом 3-омега амплитуда температурных колебаний определяется полным тепловым сопротивлением между нагревателем и подложкой. Помимо теплового сопротивления тонкой углеродной пленки, в общее сопротивление вклады вносят также граничные тепловые сопротивления между слоями структуры и сопротивления дополнительных слоев (изолирующий слой оксида гафния). Величину теплового сопротивления изолирующего слоя оксида гафния толщиной 40 нм в нашем случае можно оценить как 25 м^2 К/ГВт [37]. Теплопроводность измеряемых УНС с учетом вклада теплового сопротивления, вносимого изолирующим слоем HfO_2, можно пересчитать как [25]:

$$\kappa_{\text{CNW}_{\text{eff}}} = \frac{t}{R_{\text{meas}} - R_{\text{HfO}_2}}, \tag{4}$$

где $R_{\text{meas}} = t/k_{\text{eff}}$ – измеренная величина полного теплового сопротивления, а $R_{\text{HfO}_2} = 40$ нм. Тогда величины теплопроводности для двух пленок составляют 6.9 ± 0.7 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ и 0.82 ± 0.12 Вт м$^{-1}$К$^{-1}$ соответственно. В случае пористого материала, каким является УНС, определенная величина эффективной теплопроводности из-за наличия полостей отличается от величины теплопроводности непосредственно углеродной наноструктуры. Для учета вклада пористости в величину теплопроводности воспользуемся приближением эффективной среды, в рамках которой теплопроводность УНС определяется как [38]:

$$\kappa_{\text{CNW}} = \frac{\kappa_{\text{CNW}_{\text{eff}}}}{\Phi}, \tag{5}$$

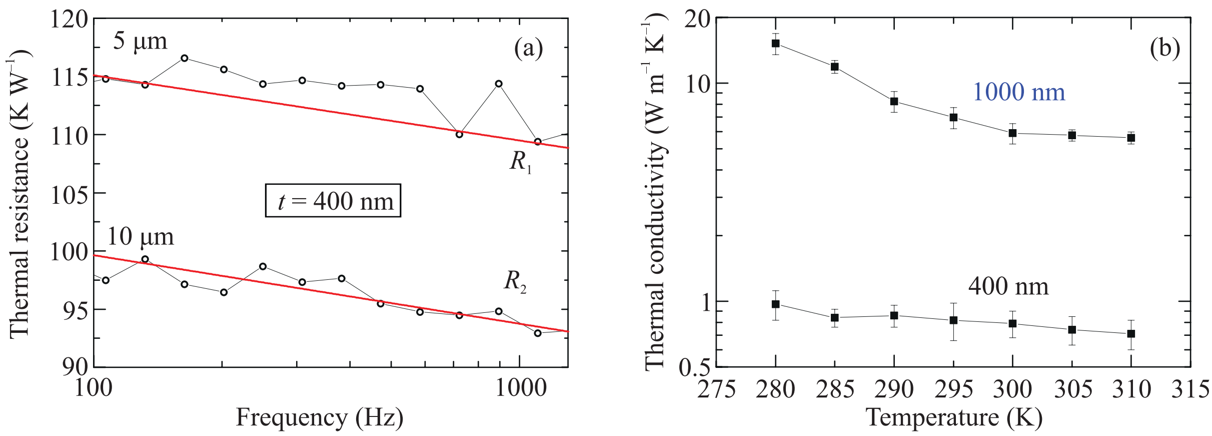

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Зависимость теплового сопротивления R от частоты для пары нагревателей толщиной 5 и 10 мкм на пленке толщиной 400 нм при температуре 285 К. (b) – Зависимость теплопроводности пленок толщиной 400 и 1000 нм от температуры

где Φ – доля твердой фазы УНС. В нашем случае она составила ~ 0.3, тогда величины теплопроводности для двух пленок составляют 23 ± 2.4 и 2.7 ± 0.4 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ соответственно.

Полученные результаты согласуются с результатами предыдущих работ. Так, в работе [25], где измерения УНС проводились с использованием лазерной методики, величина эффективной теплопроводности для слоя УНС толщиной 1000 нм составила 7 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$. В нашем случае теплопроводность структур такой же толщины составляет $6.9 \pm \pm 0.7$ Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$. Значение теплопроводности для более тонких структур отличается: рассчитанная в [25] величина эффективной теплопроводности для слоя толщиной 400 нм составляет около 2 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$, что примерно в 2 раза выше измеренного нами значения для подобных пленок. Такое отличие связано со структурным совершенством УНС и их морфологией. Как показано выше, в нашем случае наблюдается изменение размеров нанокристаллических доменов с 10 до 17 нм для структур толщиной 400 и 1000 нм. Соотношение I_D/I_G в работе [33] составляет ~ 1.2, что соответствует размеру нанокристаллиических доменов ~ 10 нм. Также имеются отличия в положении мод 2D и G в соотношениях I_{2D}/I_G. Данное обстоятельство говорит о разном количестве графеновых слоев в единичном листе УНС. Как показано в работе [39], в случае углеродных наноструктур рассеяние фононов на границе в таких материалах не является полностью диффузным, что может заметно отразиться на зависимости теплопроводности от размера структуры. Помимо этого, структуры характеризуются разной плотностью и ориентацией относительно подложки. Ориентация и плотность структур приводит к анизотропии свойств и влияет на теплоперенос. Например, в графите теплопроводность в базисной плоскости и вдоль оси c отличаются на два порядка [40].

5. Выводы. В работе впервые измерена теплопроводность углеродных наностенок с использованием метода 3-омега. Показано, что в случае плазмохимического синтеза в разряде постоянного тока теплопроводность возрастает с увеличением толщины структур, что связано с разным структурным совершенством пленок, которое влияет на рассеяние фононов на дефектах. При комнатной температуре теплопроводность углеродных наностенок толщиной 400 и 1000 нм составляет 0.82 ± 0.12 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$ и 6.9 ± 0.7 Вт м$^{-1}$ К$^{-1}$. Таким образом, теплопроводность углеродных наностенок зависит от толщины пленки. Соответственно, при использовании углеродных наностенок в качестве теплоотводов необходимы более толстые структуры.

Получение и исследование дефектности углеродных наностенок выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда # 22-73-10198.

1. P. Lall, M. Pecht, and E. Hakim, *Influence of Temperature on Microelectronics and System Reliability*, CRC Press, N.Y. (1997).
2. A. Inyushkin, A. Taldenkov, V. Ralchenko, A. Bolshakov, A. Koliadin, and A. Katrusha, Phys. Rev. B **97**, 144305 (2018).
3. A. A. Balandin, Nature Mater **10**, 569 (2011).
4. А. И. Подливаев, К. С. Гришаков, К. П. Катин, М. М. Маслов, Письма в ЖЭТФ **114**, 172 (2021) [JETP Lett. **114**, 143 (2021)].
5. А. И. Подливаев, К. С. Гришаков, К. П. Катин, М. М. Маслов, Письма в ЖЭТФ **113**, 182 (2021) [JETP Lett. **113**, 169 (2021)].

6. А. И. Подливаев, Письма в ЖЭТФ **115**, 384 (2022).
7. N. D. Orekhov, J. V. Bondareva, D. O. Potapov et al. (Collaboration), Carbon **191**, 546 (2022).
8. N. Orekhov and M. Logunov, Carbon **192**, 179 (2022).
9. V. M. Egorov, A. K. Borisov, and V. A. Marikhin, Technical Physics Letters **48**, 49 (2022).
10. A. N. Enyashin, G. Seifert, and A. L. Ivanovskii, JETP Lett. **80**, 608 (2004).
11. H. Malekpour, P. Ramnani, S. Srinivasan, G. Balasubramanian, D. L. Nika, A. Mulchandani, R. K. Lake, and A. A. Balandin, Nanoscale **8**, 14608 (2016).
12. T. Chen, Y. Huang, L. Wei, T. Xu, and Y. Xie, Carbon **203**, 130 (2023).
13. Y. Wu, B. Yang, B. Zong, H. Sun, Z. Shen, and Y. Feng, J. Mater. Chem. **14**, 469 (2004).
14. M. Hiramatsu and M. Hori, *Carbon Nanowalls: Synthesis and Emerging Applications*, Springer Science & Business Media, Wien (2010).
15. S. Evlashin, M. Tarkhov, D. Chernodubov, A. Inyushkin, A. Pilevsky, P. Dyakonov, A. Pavlov, N. Suetin, I. Akhatov, and V. Perebeinos, Phys. Rev. Appl. **15**, 054057 (2021).
16. A. M. Mumlyakov, M. V. Shibalov, E. R. Timofeeva, I. V. Trofimov, N. V. Porokhov, S. A. Evlashin, P. A. Nekludova, E. A. Pershina, Yu. V. Anufriev, A. M. Tagachenkov, E. V. Zenova, and M. A. Tarkhov, Carbon **184**, 698 (2021).
17. S. Evlashin, S. Svyakhovskiy, N. Suetin, A. Pilevsky, T. Murzina, N. Novikova, A. Stepanov, A. Egorov, and A. Rakhimov, Optical and IR Absorption of Multilayer Carbon Nanowalls, Carbon **70**, 111 (2014).
18. H. J. Cho, H. Kondo, K. Ishikawa, M. Sekine, M. Hiramatsu, and M. Hori, Carbon **68**, 380 (2014).
19. K. Kobayashi, M. Tanimura, H. Nakai, A. Yoshimura, H. Yoshimura, K. Kojima, and M. Tachibana, J. Appl. Phys. **101**, 094306 (2007).
20. V. A. Krivchenko, S. A. Evlashin, K. V. Mironovich, N. I. Verbitskiy, A. Nefedov, C. Wöll, A. Ya. Kozmenkova, N. V. Suetin, S. E. Svyakhovskiy, D. V. Vyalikh, A. T. Rakhimov, A. V. Egorov, and L. V. Yashina, Sci. Rep. **3**, 1 (2013).
21. M. Hiramatsu, S. Mitsuguchi, T. Horibe, H. Kondo, M. Hori, and H. Kano, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 01AK03 (2013).
22. W. Wei and Y. H. Hu, J. Mater. Chem. A **5**, 24126 (2017).
23. V. A. Krivchenko, D. M. Itkis, S. A. Evlashin, D. A. Semenenko, E. A. Goodilin, A. T. Rakhimov, A. S. Stepanov, N. V. Suetin, A. A. Pilevsky, and P. V. Voronin, Carbon **50**, 1438 (2012).
24. Y. Zhang, L. Tan, H. Yin, G. Zhang, and J. Liu, *Experimental Measurements of Thermal Performances of Carbon Nanomaterial with Vertical Structures in Hotspot Heat Dissipation*, in *2019 IEEE 19th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Macao, China (2019), p. 370.
25. A. Achour, B. E. Belkerk, K. Ait Aissa, S. Vizireanu, E. Gautron, M. Carette, P.-Y. Jouan, G. Dinescu, L. Le Brizoual, Y. Scudeller, and M.-A. Djouadi, Appl. Phys. Lett. **102**, 061903 (2013).
26. A. Bilusic, S. Gradecak, A. Tonejc, A. Tonejc, J. Lasjaunias, and A. Smontara, Synth. Met. **121**, 1121 (2001).
27. J. Lasjaunias, M. Saint-Paul, A. Bilušić, A. Smontara, S. Gradečak, A. Tonejc, A. Tonejc, and N. Kitamura, Phys. Rev. B **66**, 014302 (2002).
28. S. A. Evlashin, F. S. Fedorov, P. V. Dyakonov et al. (Collaboration), J. Phys. Chem. Lett. **11**, 4859 (2020).
29. A. M. Mumlyakov, M. V. Shibalov, I. V. Trofimov, M. G. Verkholetov, A. P. Orlov, G. D. Diudbin, S. A. Evlashin, P. A. Nekludova, Yu. V. Anufriev, A. M. Tagachenkov, E. V. Zenova, and M. A. Tarkhov, J. Alloys Compd. **858**, 157713 (2021).
30. P. Dyakonov, K. Mironovich, S. Svyakhovskiy, O. Voloshina, S. Dagesyan, A. Panchishin, N. Suetin, V. Bagratashvili, P. Timashev, E. Shirshin, and S. Evlashin, Sci. Rep. **7**, 1 (2017).
31. D. G. Cahill, Rev. Sci. Instrum. **61**, 802 (1990).
32. D. A. Chernodoubov and A. V. Inyushkin, Rev. Sci. Instrum. **90**(2), 024904 (2019).
33. J. Alvarez-Quintana and J. Rodriguez-Viejo, Sensors and Actuators A: Physical **142**, 232 (2008).
34. D. A. Chernodubov, I. O. Maiboroda, M. L. Zanaveskin, and A. V. Inyushkin, Phys. Solid State **62**, 722 (2020).
35. L. G. Cancado, K. Takai, T. Enoki, M. Endo, Y. A. Kim, H. Mizusaki, A. Jorio, L. N. Coelho, R. Magalhães-Paniago, and M. A. Pimenta, Appl. Phys. Lett. **88**, 163106 (2006).
36. C. Dames, Annual Review of Heat Transfer **16**, 7 (2013).
37. M. A. Panzer, M. Shandalov, J. A. Rowlette, Y. Oshima, Y. W. Chen, P. C. McIntyre, and K. E. Goodson, IEEE Electron Device Letters **30**, 1269 (2009).
38. M. T. Barako, A. Sood, C. Zhang, J. Wang, T. Kodama, M. Asheghi, X. Zheng, P. V. Braun, and K. E. Goodson, Nano Lett. **16**, 2754 (2016).
39. D. L. Nika, A. S. Askerov, and A. A. Balandin, Nano Lett. **12**, 3238 (2012).
40. G. A. Slack, Phys. Rev. **127**, 694 (1962).