

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФЕНА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

© 2021 г. С. М. Зуев^{а, *}, Д. А. Прохоров^{б, **}, Р. А. Малеев^б, В. В. Дебелов^б, А. А. Лавриков^б

^аМИРЭА – Российский технологический университет, Проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454 Россия

^бМосковский политехнический университет, ул. Б. Семеновская, 38, Москва, 432700 Россия

*E-mail: sergei_zuev@mail.ru

**E-mail: prohorovdmirii97@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.02.2021 г.

После доработки 23.02.2021 г.

Принята к публикации 27.02.2021 г.

Приводится исследование применения системы охлаждения персональной электронно-вычислительной машины с использованием графена. Разобраны особенности использования монокристаллического и поликристаллического графена на практике. Произведено сравнение с используемыми в настоящее время материалами в системах охлаждения персональной электронно-вычислительной машины. Рассчитаны плотности теплового потока в зависимости от температуры между медной пластиной и водным адсорбатом и между двумя слоями – поликристаллического графена и водного адсорбата. Обозначены перспективы использования графена в системах охлаждения персональных электронно-вычислительных машинах.

Ключевые слова: графен, система охлаждения персональной электронно-вычислительной машины, система охлаждения центрального процессора персональной электронно-вычислительной машины

DOI: 10.31857/S0544126921050094

Хорошо известно, что графен – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом. Он имеет рекордный для всех известных на данный момент твердых тел коэффициент теплопроводности – $5.3 \pm 0.48 \times 10^3$ Вт/м · К при комнатной температуре [1]. Практическое применение графена находится на начальной стадии научно-исследовательских разработок и исследований, но уже сейчас можно сделать вывод о том, что электроника в перспективе рассматривается как основное применение графена. В настоящее время наибольшее распространение для охлаждения интегральных микросхем нашли медь и алюминий, имеющие коэффициенты теплопроводности равные 0.4×10^3 и $0.24 \cdot 10^3$ Вт/м · К соответственно (при комнатной температуре) [2]. Применение графена в качестве теплосъемного и теплопередающего элемента позволяет улучшить охлаждение интегральных микросхем в несколько раз, по сравнению с использованием меди. Это приведет к значительному термопрочностному эффекту [3]. Применение графена в системе охлаждения персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ) позволит снизить нагрев основных вычислительных элементов без изме-

нения массогабаритных параметров, потребляемой электроэнергии и надежности устройства.

В данной статье представлены особенности массового использования графена для охлаждения центрального процессора (ЦП) ПЭВМ, используемого в настольных и переносных компьютерах, серверах и т.д. Произведено нахождение ожидаемого коэффициента теплопроводности графена при температурах ЦП ПЭВМ, обозначены перспективы применения в данной области по мере совершенствования способов создания графена.

Целью данного исследования является определение целесообразности применения графена для охлаждения ЦП ПЭВМ.

В отличие от известных работ по применению графена (многослойная система) в качестве охлаждающего вещества [4], полученного на сапфире, рассмотрена идея создания графена на меди – металле, более доступном для массового использования. В настоящее время, именно медь является самым эффективным металлом при массовом использовании с целью теплопередачи, уступая по стоимости только алюминию.

Известные способы охлаждения транзистора с высокой подвижностью электронов с использованием нитрида галлия предполагают задействование графена, полученного методом отшелуши-

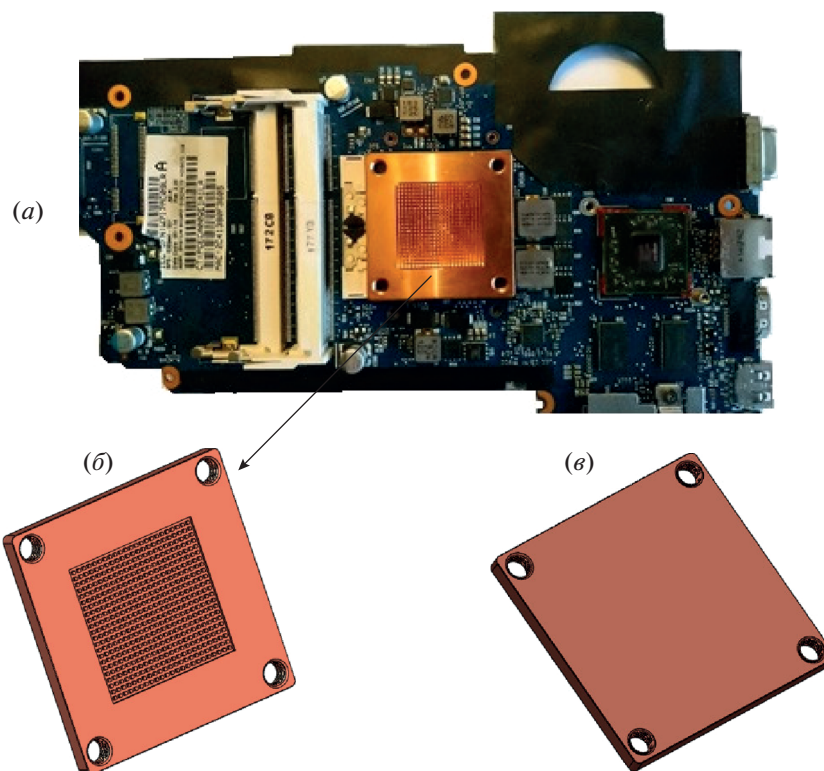


Рис. 1. Радиатор охлаждения в виде медной пластины, наиболее часто применяемый для охлаждения ЦП ПЭВМ: *а* – расположение медной пластины на ЦП переносной ПЭВМ; *б* – 3D-модель пластины (сторона теплоотводящей жидкостью); *в* – 3D-модель пластины (сторона теплосъемного контакта). Поверхность пластины представляет собой квадрат со стороной 40 мм, толщина составляет 3 мм, в пластине присутствуют 4 отверстия под винт для крепления к водоблоку.

вания (монокристаллический графен) – ручным методом, являющимся в настоящее время неэффективным при массовом применении [5]. В данной работе описано использование метода получения графена при массовом производстве, представляя высокую экономическую перспективу.

Применение исключительно боковой поверхности слоя графена в целях отвода тепла при технологии “кремний на изоляторе” малоэффективно, по причине использования главным образом площади теплообмена – произведения толщины и ширины (длины) графенового слоя (в том числе в виде оксида графена) [6]. Толщина одного слоя графена соответствует диаметру атома углерода – значению ничтожно малому для создания большой площади теплообмена. В данной работе рассмотрено использование максимально возможной площади теплообмена – произведения длины и ширины графенового слоя.

Рассмотрим радиатор охлаждения в виде медной пластины, наиболее часто применяемый для охлаждения ЦП ПЭВМ (рис. 1).

На рис. 1*а* изображен пример расположения данной медной пластины на материнской плате переносной ПЭВМ из которого видно, что дан-

ный радиатор охлаждения имеет значительные размеры, и для большего охлаждения занимает значительную рабочую область платы.

На рис. 1*б* изображена 3D-модель пластины стороной контакта с теплоотводящей жидкостью. На данной стороне также присутствует развитая поверхность для повышения теплопередачи от пластины к охлаждающей жидкости.

На рис. 1*в* изображена 3D-модель стороной теплосъемного контакта. В данной статье теплоотдающим объектом будет являться кристалл ЦППЭВМ. Использование крышки ЦП ПЭВМ в качестве теплоотдающего объекта нецелесообразно по причине того, что в таком случае неизбежно будет присутствовать дополнительный теплообмен, между кристаллом и термопастой (или жидким металлом) и термопастой и крышкой.

В данной работе рассмотрена идея создания на данной медной пластине однослойного графена, а также перспектива использования в будущем полностью графеновой пластины. Для переноса однослойного графена на медную пластину необходимо, чтобы процентное содержание меди в данной пластине составляло не менее 99%, так как в противном случае не исключено дополнительное

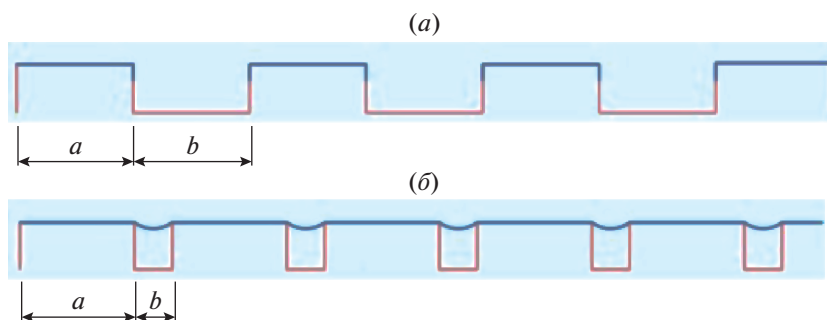


Рис. 2. К исследованию пленки графена: *a* – разрывание слоя графена и его последующая коагуляция на стенке; *b* – провисание слоя графена над впадинами.

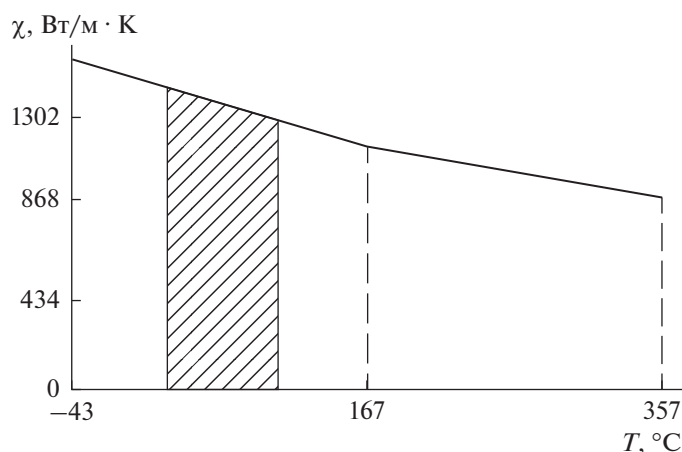


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности χ однослойного монокристаллического графена бесконечной длины от температуры.

образование нескольких слоев графена. При переносе однослойного графена на сторону медной пластины, имеющую развитую поверхность, происходит либо разрывание слоя графена, либо его провисание. Первый случай характерен при больших длинах впадин *b*, по сравнению с длинами выступов *a*, изображено на рис. 2*а*.

Второй случай происходит при длинах впадин *b*, несоизмеримо меньших по сравнению с длинами выступов *a*, изображено на рис. 2*б*.

Таким образом можно в различных экспериментах установить конкретные длины впадин и выступов, глубины впадин, материалов на которых наносится слой графена, при которых будет происходить данные явления. Тем самым можно создать развитую поверхность, для повышения площади теплообмена.

Для качественного сравнения теплопередачи графеновой пластины с медной необходимо найти коэффициент теплопроводности графена при температурах работы ЦП ПЭВМ.

Коэффициент теплопроводности графена уменьшается с увеличением числа его слоев, и при много-

слойной конструкции сопоставим с серебром и медью, поэтому для улучшения теплоотводящих свойств применять многослойный графен нецелесообразно. Известно, что на коэффициент теплопроводности и термостойкие характеристики [7] однослойного графена влияет и его длина. В различных опытах рассмотрены небольшие длины графеновых слоев (нм, мкм), при сравнении с ними, длина несколько десятков мм будет несоизмеримо большой, поэтому примем для нахождения коэффициента теплопроводности однослойного графена значение его длины равное бесконечности.

На рис. 3 изображена зависимость коэффициента теплопроводности однослойного монокристаллического графена бесконечной длины от температуры. В качестве сравнения, на рис. 4 изображена зависимость коэффициента теплопроводности меди от температуры.

Заштрихованная область на рис. 3, 4 соответствует диапазону температур ЦПП ЭВМ – от 25 до 100°C.

В идеальном случае, когда между кристаллом ЦП и охлаждающей жидкостью находится только

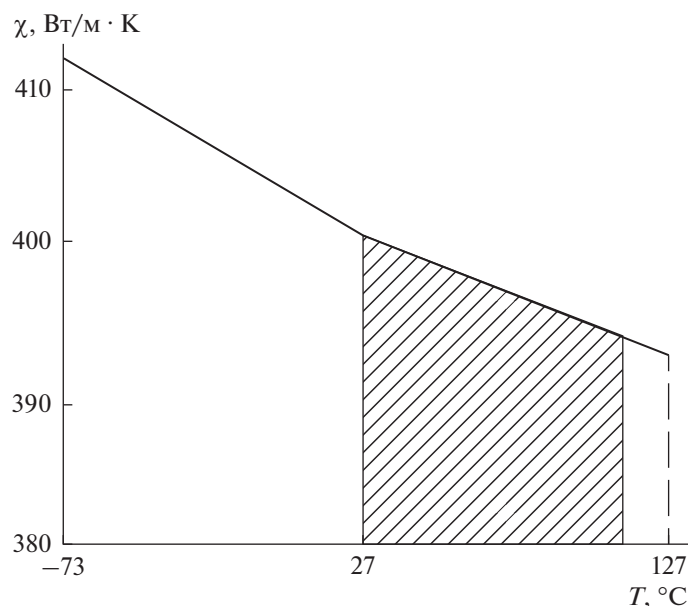


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности χ меди от температуры.

однослойный теплопередающий графен, коэффициент его теплопроводности будет находиться между (1170...1054) Вт/м·K, вместо (400...394) Вт/м·K у меди, при температуре работы ЦПП ЭВМ. Стоит обратить внимание на то, что данные получены расчетным путем [8] и по трем точкам. При массовом применении на данный момент времени использовать лишь однослойный теплопередающий графен не представляется возможным, так как массового производства однослойного графена, без использования подложки на данный момент нет.

С целью производства однослойного графена, нашли применение различные технологии.

1) Механические способы получения графена:

а) отшелушивание слоя высокоориентированного пиролитического графита с помощью адгезионной ленты (монокристаллический графен).

2) Химические способы получения графена:

а) восстановление оксида графена;

б) осаждение из газообразной фазы (поликристаллический графен);

в) выращивание при высоких давлениях и температурах.

При массовом производстве (получение больших площадей графена) на данный момент времени наиболее эффективен способ получения графена методом осаждения из газообразной фазы.

В этом способе получения медная пластина помещается в камеру и подвергается термообработке (нагреву) до температуры (970...1010)°C. Затем камера продувается водородом (в атмосфере водорода стравливается оксидный слой с поверхности меди). В качестве прекурсора используют

как правило метан. Вследствие воздействия высокой температуры метан начинает разлагаться, образуя слой поликристаллического графена на поверхности медной пластины, выступающей в роли катализатора. После этого полученную медную пластину с нанесенным слоем поликристаллического графена охлаждают. Изменяя концентрацию метана и время выдержки, можно получать различное число слоев поликристаллического графена.

Таким образом, можно добиться образования графена на всей поверхности меди с двух ее сторон. Себестоимость данной технологии при массовом производстве на данный момент времени не более 210 российских рублей за 1 см² создаваемой поверхности. Площадь полученного однослойного поликристаллического графена составляет более 99% от всей площади поверхности. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности [9] поликристаллического графена, будет ниже коэффициента теплопроводности монокристаллического графена, изображенного на рис. 3.

На практике, между медной пластиной и поликристаллическим графеном будет присутствовать небольшой слой водного адсорбата, толщиной примерно 1 нм (рис. 5в). Молекулярный слой водного адсорбата на границе графен и кремниевой (оксид кремния) подложки [10, 11] существует в квазитвердом состоянии — в виде льда.

С целью избавиться от водного адсорбата предпринимались попытки использовать лазерное воздействие (локальный нагрев водного адсорбата) на границе графена с подложкой импульсным лазерным излучением и вытеснение образовавшихся водяных паров на периферию области об-

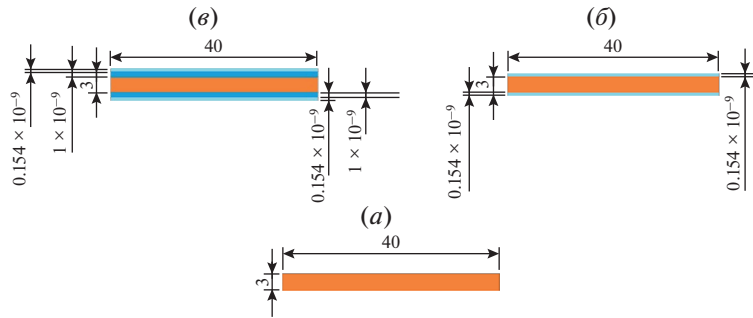


Рис. 5. Исходные данные для сравнения теплопроводных свойств (все размеры в мм): (а) квадратной медной пластины со стороной 40 мм; (б) квадратной медной пластины со стороной 40 мм с двухсторонним слоем монокристаллического графена; (в) квадратной медной пластины со стороной 40 мм с двухсторонним слоем монокристаллического графена, имеющего слой адсорбата на границе медная пластина – монокристаллический графен.

лучения, в результате чего толщина водного адсорбата под ямкой становится меньше [12]. Однако после окончания серии лазерных импульсов должна происходить обратная миграция воды под дно сформированной ямки – косвенным подтверждением данного явления служит “зарастание” некоторых мелких кратеров в течение суток после облучения. При взаимодействии с более интенсивным лазерным излучением вскипание этого оставшегося слоя водного адсорбата вызывает разрушение графена [13].

Таким образом полностью избавиться от слоя водного адсорбата невозможно.

Проведем сравнение коэффициентов теплопроводностей различных многослойных и однослойных теплоотводящих конструкций, имитирующие теплопередачу от ЦП ПЭВМ охлаждающей жидкости.

Для упрощения расчетов, приняты следующие допущения:

- контактирующие поверхности считаются идеально ровными;
- теплопередача между слоями происходит только по их площади;
- значения теплопроводности, характерные для монокристаллического графена приняты в качестве максимально возможных для поликристаллического графена.

На рис. 5 изображены три случая теплопередачи от ЦП ПЭВМ охлаждающей жидкости. Первый случай, рис. 5а, характерен для медных пластин, использующихся в большинстве водоблоков (без развитой поверхности теплообмена для

удобства сравнения). Второй случай, рис. 5б, характерен для медных пластин с двухсторонним слоем монокристаллического графена без слоев водного адсорбата. Третий случай, рис. 5в, обуславливает наличие водного адсорбата на границе медная пластина – монокристаллический графен.

Для ЦП ПЭВМ характерны три температурных режима работы – при минимальной нагрузке (40°C), при нормальной нагрузке (70°C), при максимальной нагрузке (100°C). Коэффициенты теплопроводности меди (рис. 4) при данных температурах – 401, 396 и 393 Вт/м · К соответственно [14, 15]. Коэффициенты теплопроводности однослойного монокристаллического графена (рис. 3) при данных температурах – 1150, 1100 и 1054 Вт/м · К соответственно (при аппроксимации графика, изображенного на рис. 3, исходя из данных, полученных по трем точкам). Коэффициенты теплопроводности воды при данных температурах – 0.6305, 0.6631 и 0.6791 Вт/м · К соответственно [16].

Коэффициент теплопроводности многослойной конструкции [1]:

$$\lambda_{\text{мк}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}, \tag{1}$$

где $\lambda_{\text{мк}}$ – коэффициент теплопроводности многослойной конструкции, Вт/м · К; λ_n – коэффициент теплопроводности n слоя, Вт/м · К; δ – толщина слоя, м.

Для системы 5в найдем коэффициент теплопроводности многослойной конструкции, при температуре всех слоев равной 40°C по формуле (1):

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{мк}} &= \frac{0.154 \times 10^{-12} + 1 \times 10^{-12} + 3 \times 10^{-12} + 1 \times 10^{-12} + 0.154 \times 10^{-12}}{\frac{0.154 \times 10^{-12}}{1150} + \frac{1 \times 10^{-12}}{0.6305} + \frac{3 \times 10^{-12}}{401} + \frac{1 \times 10^{-12}}{0.6305} + \frac{0.154 \times 10^{-12}}{1150}} \approx \\ &\approx \frac{0 + 0 + 0.003 + 0 + 0}{0 + 0 + 7.4813 \cdot 10^{-6} + 0 + 0} \approx 400.9998 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \end{aligned}$$

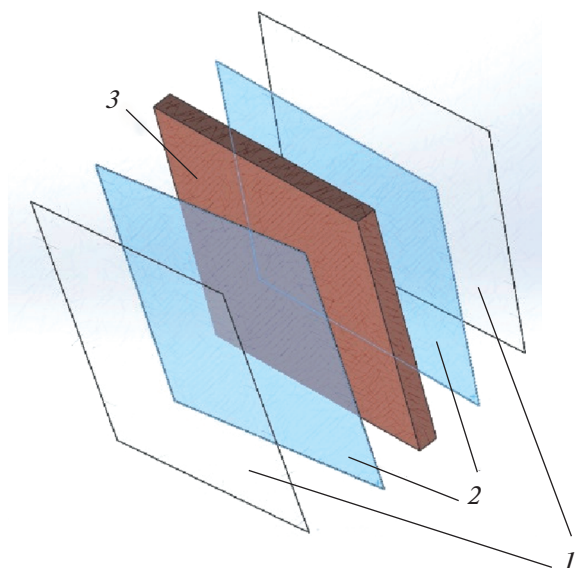


Рис. 6. 3D-модель многослойной конструкции графен (1) – водный адсорбат (2) – медная пластина (3) – водный адсорбат (2) – поликристаллический графен (1).

3D рисунок рассматриваемой многослойной конструкции представлен на рис. 6.

Полученный коэффициент теплопроводности приблизительно равен коэффициенту теплопроводности меди при температуре 40°C (401 Вт/м · К).

Для изучения процесса конвективного теплообмена между изображенными на рис. 6 слоями были созданы 3D-модели систем, имитирующие передачу температуры и теплового потока.

Величина плотности теплового потока при переносе тепла посредством теплопроводности определяется законом Фурье:

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (2)$$

где \bar{q} – плотность теплового потока, Вт/мм²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мм · К; $\text{grad}t$ – градиент температуры, К/мм.

Знак минус указывает, что тепловой поток направлен в сторону, обратную градиенту температуры.

Тепловой поток при переносе тепла посредством теплопроводности определяется по формуле Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha(t_{\text{сл.1}} - t_{\text{сл.2}})F, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, Вт/мм²; F – поверхность теплообмена, мм²; $(t_{\text{сл.1}} - t_{\text{сл.2}})$ – разность температур слоев, °С; α – коэффициент теплоотдачи Вт/мм² · К.

В свою очередь коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha = \frac{N_u \lambda}{l}, \quad (4)$$

где N_u – критерий Нуссельта, определяющийся из критериальных уравнений; l – линейный параметр, однозначно определяющий толщину пограничного слоя, мм.

3D-модели слоев, изображенных на рисунке 6, были проанализированы в САЕ системе ANSYS. Расчет производился на современной ПЭВМ с использованием лицензированных программных средств. В универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS были определены поля плотностей теплового потока и поля температур при приложении равномерного суммарного теплового потока величиной 100 Вт (имитирующего тепловыделение от ЦП ПЭВМ).

На рис. 7а изображено температурное поле, рассчитанное по формулам (2)–(4) в программном комплексе ANSYS между двумя слоями: поликристаллического графена (1, см. рис. 6) и водного адсорбата (2, см. рис. 6), при приложении равномерного суммарного теплового потока величиной 100 Вт к свободной поверхности слоя поликристаллического графена при температуре поверхности водного адсорбата равной 50°C (поверхность соприкасается с медной пластиной 3, см. рис. 6).

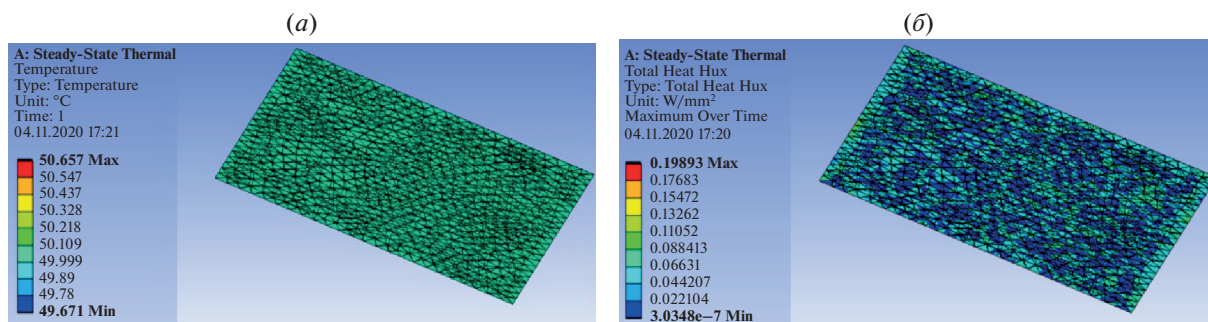


Рис. 7. Температурное поле и поле плотностей потока между двумя слоями – поликристаллического графена и водного адсорбата: а – температурное поле; б – поле плотностей теплового потока.

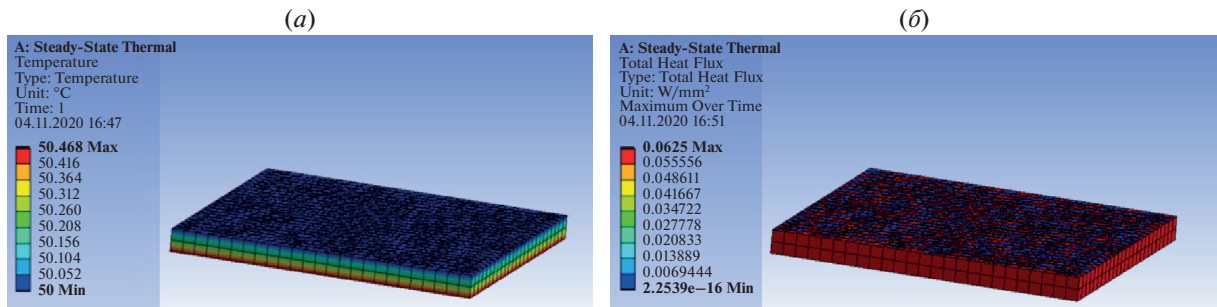


Рис. 8. Температурное поле и поле плотностей потока между медной пластиной и водным адсорбатом: *a* – температурное поле; *б* – поле плотностей теплового потока.

На рис. 7*б* изображено поле плотностей теплового потока при тех же условиях, рассчитанное по формулам (2)–(4).

На рис. 8*а* изображено температурное поле между: медной пластиной (3) и слоем водного адсорбата (2) (см. рис. 6), при приложении равномерного суммарного теплового потока величиной 100 Вт к свободной поверхности медной пластины (3) при температуре поверхности водного адсорбата равной 50°C (поверхность соприкасается со слоем поликристаллического графена 1). На рис. 8*б* изображено поле плотностей теплового потока при тех же условиях.

Результаты сравнения плотностей теплового потока между медной пластиной и водным адсорбатом (линия 1) и между слоями – поликристаллического графена и водного адсорбата (линия 2) в зависимости от температуры представлена на рис. 9.

Анализ данных сравнения плотностей теплового потока в зависимости от температуры показал, что теплопроводность системы поликристаллический графен – водный адсорбат выше, чем теплопроводность системы медная пластина – водный адсор-

бат, и при изменении температуры T почти на 1°C разница в теплопроводности увеличивается приблизительно в четыре раза, что говорит о более эффективной теплопередаче между слоями поликристаллический графен – водный адсорбат. Целесообразность применения поликристаллического или монокристаллического графена для охлаждения ЦП ПЭВМ определена результатами сравнения плотностей теплового потока, имитирующего тепловыделение от ЦП ПЭВМ в процессе его работы.

Результаты анализов, проведенных в статье, показали, что коэффициент теплопроводности наноматериалов при соединении их с макроматериалами посредством многослойной конструкции не оказывает существенного воздействия в виду их малой толщины. Однако при однослойной конструкции, коэффициент теплопроводности наноматериалов (монокристаллического или поликристаллического графена) будет значительно превосходить коэффициент теплопроводности макроматериалов (медь, алюминий).

Следовательно, в системах охлаждения персональной электронно-вычислительной машины использование графена без подложки (медной пластины) будет эффективно, что требует дальнейшего исследования в области поиска способов массового производства графена без использования подложки.

Таким образом, в данной работе приведены и разобраны свойства монокристаллического графена применительно к использованию его в современных системах охлаждения ПЭВМ.

Разобраны особенности, возникающие при переносе графена на шероховатую поверхность, имеющую впадины и выступы.

Получены графические зависимости коэффициента теплопроводности монокристаллического графена от различных температур работы ЦП ПЭВМ.

Для эффективного использования графена в системах охлаждения ПЭВМ необходимо найти доступный для массового производства способ получения однослойного графена без использо-

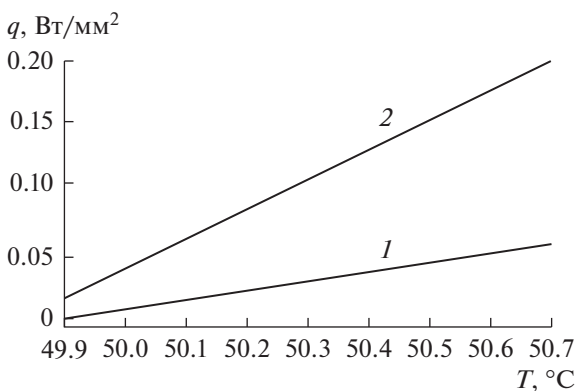


Рис. 9. Результаты сравнения плотностей теплового потока в зависимости от температуры: 1 – между медной пластиной и водным адсорбатом; 2 – между двумя слоями – поликристаллического графена и водного адсорбата.

вания подложки или усовершенствование уже существующих способов.

Выражаем благодарность компании ООО «РУС-ГРАФЕН» за консультации по свойствам и особенностям графена на практике.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротких А.Г.* Теплопроводность материалов: Учебное пособие, Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. С. 97.
2. *Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н.* Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 3.
3. *Скворцов А.А., Зувев С.М., Корячко М.В., Волошинов Е.Б.* Напряженно-деформированное состояние при контактной области полупроводника при электродеградации дорожки металлизации на его поверхности // Технология металлов. 2019. № 11. С. 41–46.
4. *Nam H., Tran Viet C., Min H., Beo Deul R., Chandramohan S., Jong Bae P., Ji Hye K., Young-Jae P., Kang Bok K., Hee Yun K., Hyun Kyu K., Jae Hyoung R., Katharria Y.S., Chel-Jong C., Chang-Hee H.* Improved heat dissipation in gallium nitride light-emitting diodes with embedded graphene oxide pattern // Nature Communications. 2013.
5. *Zhong Y., Guanxiong L., Javed M.K., Balandin A.A.* Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors // Nature Communications. 2012.
6. *Subrina S., Kotchetkov D., Balandin A.A.* Heat Removal in Silicon-on-Insulator Integrated Circuits with Graphene Lateral Heat Spreaders // IEEE Electron device letters. V. 30. № 12. 2009.
7. *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V., Voloshinov E.B.* Specific Features of Motion of Molten Zones in the Field of Silicon Structural Inhomogeneity // Technical Physics Letters. 2017. V. 43. № 8. P. 705–707.
8. *Скворцов А.А., Зувев С.М., Корячко М.В.* Нестационарные фазовые переходы в системах металлизации кремниевых структур // Микроэлектроника, 2016. Т. 45. № 3. С. 227–234.
9. *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V.* Contact melting of aluminum-silicon structures under conditions of thermal shock // Key Engineering Materials. 2018. V. 771. P. 118–123.
10. *Скворцов А.А., Рыбин В.В., Зувев С.М.* Особенности электростимулированного разрушения алюминиевой металлизации при наличии диэлектрических ступенек на поверхности кремния // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36. № 6. С. 73–79.
11. *Zuev S.M., Fironov A.M., Varlamov D.O., Kukxa V.V.* The search of new diagnosing and predicting methods to the thermomechanical and strength characteristics of the component base of control systems for unmanned vehicles of the “smart city” based on 5G technologies // J. Physics: Conference Series. 2019. № 1347.
12. *Фролов В.Д., Заведеев Е.В., Пивоваров П.А., Хомич А.А., Григоренко А.Н., Конов В.И.* Вода на границе графен–подложка: взаимодействие с короткими лазерными импульсами // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 12. С. 1166–1170.
13. *Пивоваров П.А., Фролов В.Д., Заведеев Е.В., Конов В.И.* Лазерно-индуцированная модификация графена в присутствии этанола на границе графен–подложка // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 11. С. 1017–1022.
14. *Селезнев А.А., Алейников А.Ю., Ганчук Н.С., Ганчук С.Н., Jones R.E., Zimmerman J.A.* Расчет коэффициента теплопроводности однослойных и многослойных пластин графена методом молекулярной динамики // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 4.
15. <https://www.rusgraphene.ru/product-page/grafenna-medi>
16. *Волков А.И., Жарский И.М.* Большой химический справочник. Мн.: Современная школа. 2005. С. 608.