

专题: 纳米工程和热物理

## 石墨烯基复合热界面材料导热性能研究进展\*

安盟<sup>1)†</sup> 孙旭辉<sup>1)</sup> 陈东升<sup>1)</sup> 杨诺<sup>2)‡</sup>

1) (陕西科技大学, 机电工程学院, 西安 710021)

2) (华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

(2022 年 2 月 21 日收到; 2022 年 4 月 16 日收到修改稿)

随着微纳电子器件热功率密度的迅速增长, 控制其温度已成为电子信息产业发展和应用的迫切需求. 研发高性能热界面材料是热管理关键问题之一. 由于高导热特性, 石墨烯基复合热界面材料成为研究热点. 从原子尺度深入理解复合体系中声子输运机理, 有助于提升复合体系导热性能. 本文从石墨烯内热阻和复合体系界面热阻两方面介绍和讨论石墨烯复合体系导热的研究进展、导热机制以及调控方式. 最后对该方向研究成果和发展趋势进行总结和展望.

**关键词:** 热界面材料, 石墨烯复合体系, 热导率, 声子耦合**PACS:** 65.80.Ck, 62.23.Pq, 51.20.+d, 63.20.kg**DOI:** 10.7498/aps.71.20220306

## 1 引言

随着新兴的 5G 通信、物联网、新能源汽车电子、可穿戴设备、智慧城市、航空航天等科技的兴起, 芯片等器件朝着小型化、高功率密度、多功能化等方向发展. 高度集成化和先进封装技术有效地提高了芯片功率密度并缩小了散热空间, 致使热流分布不均匀和局部过热等散热问题成为制约高性能芯片开发的核心问题之一. 据统计<sup>[1]</sup>, 电子器件的温度每升高 10—15 °C, 芯片使用寿命将会降低 50%. 由此可见, 控制电子器件的温度已成为电子产业发展的迫切需求.

热界面材料广泛被用于集成电路封装和器件散热<sup>[2]</sup>, 通过填充电子芯片与散热器接触表面的微空隙及表面凹凸不平的孔洞来减少散热热阻. 制约散热的热阻 ( $R_{TIM}$ ) 由两部分组成 (图 1): 热界面材料自身的热阻 ( $R_c$ ) 和封装外壳与热界面材料的

界面热阻 ( $R_{int}$ ). 目前商用的热界面材料<sup>[3,4]</sup>, 其界面热阻  $R_{int}$  ( $10^{-7}$ — $10^{-6}$  m<sup>2</sup>·K/W), 远小于自身的  $R_c$  ( $10^{-6}$ — $10^{-5}$  m<sup>2</sup>·K/W). 因此, 热界面材料是电子器件热管理系统的重要组成部分, 对提高散热效率和控制电子器件温度至关重要.

聚合物基复合材料具有良好的热机械性能, 且质量轻、韧性好、低成本和易加工等特性<sup>[5–8]</sup>. 因此其全球市场份额占到热界面材料的 90% 以上. 聚合物基复合材料是聚合物基体和高导热填料组成的复合体系. 二维纳米材料热导率<sup>[9–11]</sup> 远大于传统的填料, 例如石墨烯热导率高达 2000—3000 W/(m·K)<sup>[12–15]</sup> (铜的 7—10 倍), 且具有高比表面积和高机械强度等优异的性质, 是极具应用前景的填料. 因此, 开发高性能石墨烯基复合体系的热界面材料已成为研究热点<sup>[16–19]</sup>.

石墨烯基复合体系热界面材料的导热性能取决于石墨烯有效热导率和石墨烯/基体界面热导. 石墨烯基复合体系中声子输运分为两个通道:

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52006130) 和陕西省自然科学基金基础研究项目 (批准号: 2020JQ-692) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: anmeng@sust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: nuo@hust.edu.cn

1) 基体→石墨烯的面外声子→石墨烯的面内声子-基体 (图 2(a)); 2) 基体→石墨烯的面外声子→基体 (图 2(b)). 分子模拟结果发现, 第一种声子输运通道的热阻比第二种通道高 30 倍<sup>[20]</sup>. 对比发现石墨烯“面内声子-面外声子”的非平衡声子输运对石墨烯有效热导率的发挥具有重要作用. 从实验测量、理论分析及数值模拟方面均已证明了纳米尺度低维材料不同模式声子存在非平衡现象且对其热输运有重要影响<sup>[21]</sup>.

此外, 石墨烯与基体之间的化学结构、机械性能、物理性质等诸多差异<sup>[22,23]</sup>, 使得石墨烯基复合体系中存在大量的界面结构, 而界面是影响热输运的主要因素之一. 这使得纳米尺度界面热输运成为石墨烯基复合体系热传导的核心问题. 为了提高石

墨烯基复合体系的热传导特性, 本文将从石墨烯内非平衡的内热阻和复合体系界面热阻两个方面讨论复合体系中石墨烯与基体的声子耦合热阻.

## 2 石墨烯非平衡的内热阻

纳米尺度悬空石墨烯的非平衡声子输运引起科学界的关注. 通过原子尺度模拟在石墨烯中发现, 同一空间位置、沿不同方向振动的声子之间会出现不同温度, 即声子双温度现象 (图 2(b)). 这种现象源于不同模式之间较弱的耦合<sup>[24,25]</sup>, 往往在纳米低维结构中比较明显. 而在体块结构中强耦合使得很难发现这种非平衡现象. 石墨烯内部出现的声子弱耦合, 使得热在不同模式间传输会遇到阻碍.

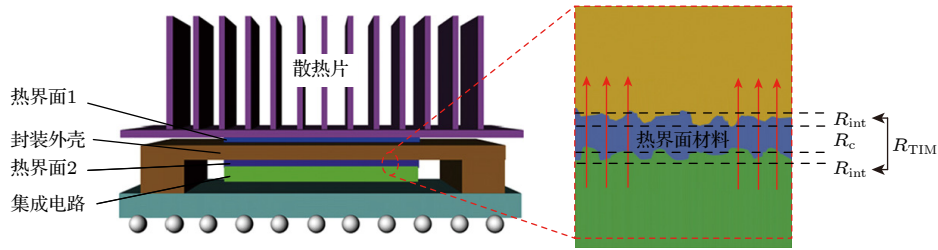


图 1 高功率密度集成电路散热示意图和热界面示意图

Fig. 1. The schematic diagram of high-power integrated chip for heat dissipation.

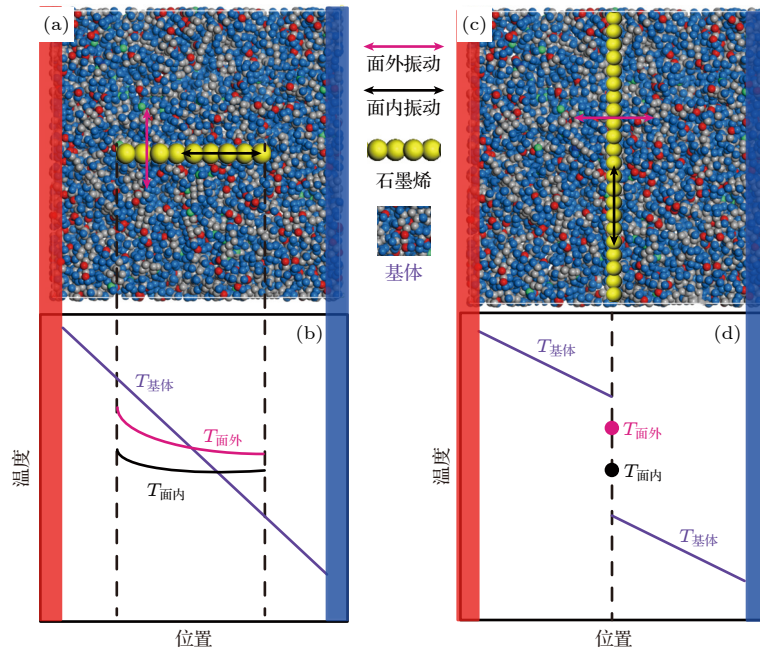


图 2 (a) 石墨烯基复合体系中石墨烯面内振动 (黑色箭头) 和面外振动 (红色箭头); (b) 复合体系中石墨烯内非平衡声子群温度; (c) 复合体系中界面石墨烯的面内振动 (黑色箭头) 和面外振动 (红色箭头); (d) 界面石墨烯的非平衡声子温度

Fig. 2. (a), (c) The schematic diagram of two types of graphene-based composites where in-plane (out-of-plane) phonon group is denoted as black arrow (red arrow); (b), (d) the temperature distribution of in-plane phonon group, out-of-plane phonon group in graphene and polymer.

对于不同模式具有温差的系统 (图 2(d)), 此类不同模式之间热输运存在热阻表现更为明显. 也就是需要考虑的内热阻问题, 定义为

$$R_{i,12} = J_{12}/\Delta T_{12} \quad (1)$$

式中,  $J_{12}$  和  $\Delta T_{12}$  分别是模式 1 到 2 的热流和二者温差. 通过建立声子间弱耦合解析模型, 可以定量描述和分析声子耦合强度的物理参数: 耦合因子和耦合长度 [24,26]. 耦合因子越小、耦合长度越长, 对应着内热阻越大.

国内外一些课题组也在石墨烯非平衡的内热阻方面有突出的成果和贡献 [24,26–29]. 美国德州大学 Shi 等 [29] 在研究拉曼法测量石墨烯热导率精度时也发现不同模式声子存在不同的温度, 即它们之间处于非平衡态. 普渡大学 Vallabhaneni 等 [27] 通过第一性原理模拟计算也表明, 悬空石墨烯面内声子与面外声子的弱耦合作用促使不同模式声子处于非平衡态. 此后, Feng 等 [30], 通过模拟提取了石墨烯的不同模式声子温度, 进一步从理论上研究不同模式声子非平衡态问题. 上海交通大学鲍华与普渡大学阮修林等计算发现, 当忽略石墨烯内非平衡声子输运, 基于激光辐照测量得到的悬空石墨烯热导率将被低估 1.4—2.6 倍 [27]. 此外研究者还发现在基于石墨烯的异质结中也存在非平衡声子输运现象, 例如: 石墨烯/氮化硼、石墨烯/硅等异质结 [31]. 因此, 石墨烯内声子非平衡现象严重影响其有效热导率和实验表征的准确性.

### 3 复合体系界面热阻

提高石墨烯基热界面材料导热性能, 除了上述内热阻问题, 还需考虑石墨烯/基体的界面热输运. 石墨烯基复合体系热导提高不显著, 主要源于在石墨烯和基体之间的界面影响声子输运, 并产生较大界面热阻. 大界面热阻的原因是多方面原因造成的 [32]. 石墨烯和基体之间的作用力通常比较弱, 远小于共价键. 石墨烯和基体之间存在纳米尺度的空隙, 空隙两段的原子之间几乎没有力的作用, 空隙同时降低了两种材料的接触面积和作用力. 即使完美接触的位置, 由于两种材料本征热输运性质的差异和声子本征模式不匹配也会造成热阻. 因此, 提高复合体系界面热导研究可归纳为增强界面处原子间相互作用力和提升界面处两材料的声子态密度匹配两个方面 [32–34].

#### 3.1 调控界面间匹配度

基于界面结构增大声子的匹配也可有效提高界面热导. 较常见的界面结构方式有表面修饰官能团、自主装、包覆和渐变界面等, 其目的是为声子跨界面传输搭建“桥梁”, 从而降低界面热阻.

原子尺度模拟研究在这个方向做出较多探索性工作. 麻省理工学院 Lin 和 Buehler [35] 在石墨烯/辛烷基体界面加入有机小分子, 使得界面热导从 90 MW/(m<sup>2</sup>·K) 提高到 114 MW/(m<sup>2</sup>·K). Wang 等 [36] 通过在石墨烯表面修饰化学官能团, 使得声子向低频范围移动, 从而提高石墨烯和基体的声子态密度匹配和石墨烯复合材料热导率. 犹他大学 Zhang 等 [37] 利用石墨烯表面构建自组装分子层, 增大接触面积和提高声子匹配度, 模拟结果表明可将界面热导提高 43%. 此外, 石墨烯表面修饰分子层的形态、密度、相变等特性也直接影响界面热导 [38–40]. 除了模拟研究外, 实验工作也证明表面修饰可提升石墨烯/基体界面热导 [41]. Sun 等 [42] 在金膜/聚乙烯界面构筑与聚乙烯具有相近的化学组分和结构的自组装分子层 HS(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>CH<sub>3</sub>, 测量表明将界面热导提高 7 倍. Qiu 等 [43] 通过包覆碳纳米管阵列增加纳米管与散热器的接触面积, 测量发现包覆的纳米管阵列和散热器的界面热阻减小为未包覆的 1/50.

界面处两体系晶格失错和振动态密度不匹配使得声子在穿过界面时产生热阻抗 [44–49]. 研究发现原子尺度渐变层为两体系界面处声子输运构建了更好的过度桥梁, 提升体系间匹配度, 从而提高界面热导 [50–53]. Zhou 等 [52] 利用分子动力学模拟发现质量线性渐变界面可将界面热导提升六倍. Rastgarkafshgarkolaei 等 [53] 研究表明质量指数渐变界面层对界面热导提升效果强于线性渐变, 以及非弹性声子热化起对渐变界面层的界面热导起主导作用. Xiong 等 [45] 发现质量和耦合强度渐变界面可将一维原子链中的界面热导提升六倍. Ma 等 [50] 利用分子动力学研究了 3 种不同渐变硅/锗界面的热导, 结果也表明相指数渐变界面比线性渐变更有利于声子输运. 并讨论了在改变界面层厚度和层数时, 非弹性和弹性声子散射对界面导热的影响. 上述研究说明渐变过度层有助于提高界面热导, 但均对个别特定体系研究, 无法实现渐变分布的遍历搜索得到最优值.

机器学习有助于进行遍历性搜索, 最近被用于



优化纳米界面导热<sup>[54–58]</sup>. Yang 等<sup>[54]</sup>利用非平衡格林函数和贝叶斯优化算法优化了一维原子链的界面渐变层质量分布,得到了质量渐变优化界面热导的极值.极大值对应的质量分布近似为正弦曲线,而不是通常被研究的线性和指数分布.其物理机制主要源于其声子透射系数在高频范围具有更大的运输窗口;而非周期性质量分布界面的震荡特征声子透射系数导致最小界面热导.此外,机器学习也被用于研究多界面体系. Ju 等<sup>[57]</sup>研究硅/锗界面层的排布,并发现实现界面热导最小值对应的非周期排布. Chowdhury 等<sup>[58]</sup>利用模拟和遗传算法也发现具有最小的界面热导的多层随机结构.

### 3.2 调控界面间原子作用力

增强界面间原子相互作用力有利于热运输和声子透射,常见的原子间作用力从弱到强依次为:范德瓦耳斯力、离子键、氢键、共价键<sup>[59]</sup>,其中氢键作用力是范德瓦耳斯力的 10—100 倍<sup>[60]</sup>、共价键是范德瓦耳斯力 1000 倍以上<sup>[41]</sup>.通常,复合体系中石墨烯和基体界面间相互作用为较弱的范德瓦耳斯力.增强界面原子间作用可有效增加石墨烯/基体间的导热通路,抑制界面声子散射,降低声子界面热阻<sup>[17]</sup>.该思路不同于经典声学失配模型 (AMM) 和漫散射失配模型 (DMM) 经典界面热传导理论模型中界面原子间作用力无穷大的假设<sup>[32]</sup>. Zhang 等<sup>[61]</sup>利用分子动力模拟方法发现, PVA/PMMA 混合构筑的梯度分布氢键界面可将界面热导提高 6.22 倍.与石墨烯/PMMA 界面相比,混合

氢键分布的界面从界面间作用强度和声子态密度匹配两个方面的物理机制提高了声子界面运输效率.圣母大学罗腾飞等的模拟结果发现,强共价键可将范德瓦耳斯力界面热导提升一个数量级<sup>[62]</sup>.此外,研究发现表面修饰分子层不仅提高了界面处声子态密度匹配,也可通过改变分子层末端官能团提高界面原子作用强度. Losego 等<sup>[63]</sup>实验研究发现,相比于  $\text{CH}_3$  官能团界面,分子层末端沉积  $\text{SH}:\text{CH}_3$  官能团的界面热导提高了 80%.以上研究结果均证明声子界面运输与界面原子间相互作用力呈正相关<sup>[64]</sup>.另外通过调控界面压力<sup>[65]</sup>、界面粗糙度<sup>[41]</sup>、界面处石墨烯的结构<sup>[66–68]</sup>等方式也可增强界面间作用力,从而提高热导.

### 3.3 界面声子非平衡

上述界面间匹配度和原子间作用力的两种思路均基于界面处声子群处于平衡态,即声子群间耦合很强和稳态下不存在温差.如上文所述石墨烯中声子群间存在明显的非平衡内热组,因此界面处声子非平衡的问题需要考虑.如图 3,研究发现调控界面声子非平衡对面内异质界面和范德瓦耳斯异质界面热导均有重要影响<sup>[30,31,69–72]</sup>. Wu 等<sup>[69]</sup>模拟发现界面处的光学声子和声学声子具有不同的温度且处于非平衡,调节二者之间的耦合系数可改变界面热导,最大改变比例可达约 1/3. Feng 等<sup>[30]</sup>发现石墨烯与氮化硼界面处弹道运输声子和扩散运输声子存在非常明显的非平衡态现象,这些研究为理解界面热导机制提供不同的角度.

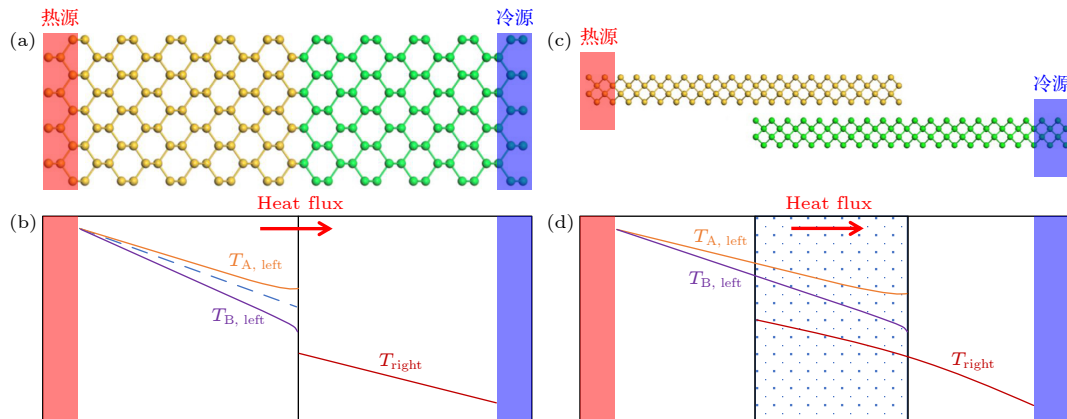


图 3 (a) 面内异质结构和 (c) 范德瓦耳斯界面原子模型; (b) 面内异质界面和 (d) 范德瓦耳斯界面在沿热流方向的温度分布,其中左边系统声子群 A 和 B 均对系统导热有贡献且存在非平衡现象,右边系统仅有一种声子群

Fig. 3. (a) The atomic structure models of in-plane heterointerface and (c) van der Waals heterointerfaces; the temperature distribution of phonon group A(b),  $T_{A, \text{left}}$ , phonon group B(d),  $T_{B, \text{left}}$  in the left region and phonon group  $T_{\text{right}}$  in right region.

## 4 总结和展望

本文从两方面梳理了近期石墨烯基复合体系导热性能的研究: 石墨烯内热阻和石墨烯/基体界面热阻。详细介绍了石墨烯体系内声子耦合强度与内热阻的关系、界面间声子匹配度和声子作用力如何调控界面热阻、以及界面非平衡现象。本文有助于高导热性能的石墨烯复合体系热界面材料研发和导热基础问题的理解。

在高性能石墨烯热界面材料研究中仍存在如下困难和挑战: 1) 经典的声学失配和漫散射失配理论模型无法准确预测界面热阻, 近年来发展的混合失配模型<sup>[44]</sup>和无序界面层模型<sup>[73]</sup>等理论模型有待更多的实验结果证明; 2) 简谐近似的非平衡格林函数理论如果要更准确描述界面处声子输运行为, 加入非简谐作用的计算将有利于该方法在导热研究的应用<sup>[54,74]</sup>; (3) 针对复杂界面结构界面热导的预测问题, 分子动力学模拟往往可以发挥自身优势。但是对于新材料会受限于缺少准确的经验势函数, 机器学习势函数将为解决这个问题提供帮助<sup>[75,76]</sup>; 4) 传统描述复合体系导热的模型无法从原子尺度理解纳米填料内部、界面热输运机理以及构建纳米复合体系热阻网络。建立新型理论模型预测纳米复合体系导热较为重要和迫切。

## 参考文献

- [1] Sun R 2019 *J. Ind. Inf. Integration* **8** 1 (in Chinese) [孙蓉 2019 集成技术 **8** 1]
- [2] Yu W, Liu C, Qiu L, Zhang P, Ma W, Yue Y, Xie H, Larkin L S 2018 *Eng. Sci.* **2** 1
- [3] Liu C, Chen M, Yu W, He Y 2018 *ES Energy Environ.* **2** 31
- [4] Shahil K M F, Balandin A A 2012 *Solid State Commun.* **152** 1331
- [5] Huang C, Qian X, Yang R 2018 *Mater. Sci. Eng. R Rep.* **132** 1
- [6] Xu Y, Wang X, Zhou J, Song B, Jiang Z, Lee E M Y, Huberman S, Gleason K K, Chen G 2018 *Sci. Adv.* **4** eaar3031
- [7] Xi Q, Zhong J, He J, Xu X, Nakayama T, Wang Y, Liu J, Zhou J, Li B 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 104401
- [8] Yu X, Ma D, Deng C, Wan X, An M, Meng H, Li X, Huang X, Yang N 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 014401
- [9] Chang Z, Yuan K, Sun Z, Zhang X, Gao Y, Gong X, Tang D 2021 *Chin. Phys. B* **30** 034401
- [10] Ma D, Li X, Zhang L 2020 *Chin. Phys. B* **29** 126502
- [11] Wu X S, Tang W T, Xu X F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 196602 (in Chinese) [吴祥水, 汤雯婷, 徐象繁 2020 物理学报 **69** 196602]
- [12] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, Calizo I, Teweldebrhan D, Miao F, Lau C N 2008 *Nano Lett.* **8** 902
- [13] Xu X, Pereira L F, Wang Y, Wu J, Zhang K, Zhao X, Bae S, Tinh Bui C, Xie R, Thong J T, Hong B H, Loh K P, Donadio D, Li B, Ozyilmaz B 2014 *Nat. Commun.* **5** 3689
- [14] Li P, Liu Y, Shi S, Xu Z, Ma W, Wang Z, Liu S, Gao C 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2006584
- [15] Gao J, Xie D, Wang X, Zhang X, Yue Y 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 251901
- [16] Xu X, Zhou J, Chen J 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1904704
- [17] Xu X, Chen J, Zhou J, Li B 2018 *Adv. Mater.* **30** e1705544
- [18] Lewis J S, Perrier T, Barani Z, Kargar F, Balandin A A 2021 *Nanotechnology* **32** 142003
- [19] Yan Q, Alam F E, Gao J, Dai W, Tan X, Lv L, Wang J, Zhang H, Chen D, Nishimura K, Wang L, Yu J, Lu J, Sun R, Xiang R, Maruyama S, Zhang H, Wu S, Jiang N, Lin C T 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2104062
- [20] Huang X, Zhi C, Lin Y, Bao H, Wu G, Jiang P, Mai Y-W 2020 *Mat. Sci. Eng. R* **142** 100577
- [21] An M, Wang H, Yuan Y, Chen D, Ma W, Sharshir S W, Zheng Z, Zhao Y, Zhang X 2022 *Surf. Interfaces* **28** 101690
- [22] Xu Y, Wang X, Hao Q 2021 *Compos. Commun.* **24** 100617
- [23] Zhou Y, Wu S, Long Y, Zhu P, Wu F, Liu F, Murugadoss V, Winchester W, Nautiyal A, Wang Z, Guo Z 2020 *ES Mater. Manuf.* **7** 4
- [24] Deng C, Huang Y, An M, Yang N 2021 *Mater. Today Phys.* **16** 100305
- [25] Pan D K, Zong Z C, Yang N 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 086302 (in Chinese) [潘东楷, 宗志成, 杨诺 2022 物理学报 **71** 086302]
- [26] An M, Song Q, Yu X, Meng H, Ma D, Li R, Jin Z, Huang B, Yang N 2017 *Nano Lett.* **17** 5805
- [27] Vallabhaneni A K, Singh D, Bao H, Murthy J, Ruan X 2016 *Phys. Rev. B* **93** 125432
- [28] Feng T, Yao W, Wang Z, Shi J, Li C, Cao B, Ruan X 2017 *Phys. Rev. B* **95** 195202
- [29] Sullivan S, Vallabhaneni A, Kholmanov I, Ruan X, Murthy J, Shi L 2017 *Nano Lett.* **17** 2049
- [30] Feng T, Yao W, Wang Z, Shi J, Li C, Cao B, Ruan X 2017 *Phys. Rev. B* **95** 195202
- [31] Feng T, Zhong Y, Shi J, Ruan X 2019 *Phys. Rev. B* **99** 045301
- [32] Chen J, Xu X, Zhou J, Li B 2022 *Rev. Mod. Phys.* **94** 025002
- [33] Huang Y, Feng W, Yu X, Deng C, Yang N 2020 *Chin. Phys. B* **29** 126303
- [34] Giri A, Hopkins P E 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1903857
- [35] Lin S, Buehler M J 2013 *Nanotechnology* **24** 165702
- [36] Wang M, Galpaya D, Lai Z B, Xu Y, Yan C 2014 *Int. J. Smart Nano Mat.* **5** 123
- [37] Zhang L, Liu L 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 28949
- [38] Wang M, Hu N, Zhou L, Yan C 2015 *Carbon* **85** 414
- [39] Wang Y, Zhan H F, Xiang Y, Yang C, Wang C M, Zhang Y Y 2015 *J. Phys. Chem. C* **119** 12731
- [40] Liu C, Yu W, Chen C, Xie H, Cao B 2020 *Inter. J. Heat Mass Trans.* **163** 120393
- [41] Wei X, Zhang T, Luo T 2017 *ACS Energy Lett.* **2** 2283
- [42] Sun F, Zhang T, Jobbins M M, Guo Z, Zhang X, Zheng Z, Tang D, Ptasinska S, Luo T 2014 *Adv. Mater.* **26** 6093
- [43] Qiu L, Guo P, Kong Q, Tan C W, Liang K, Wei J, Tey J N, Feng Y, Zhang X, Tay B K 2019 *Carbon* **145** 725
- [44] Zhang Y, Ma D, Zang Y, Wang X, Yang N 2018 *Front. Energy Res.* **6** 48
- [45] Xiong Y, Yu X, Huang Y, Yang J, Li L, Yang N, Xu D 2019 *Mater. Today Phys.* **11** 100139

- [46] Ma D, Zhang G, Zhang L 2020 *J. Phys. DAppl. Phys.* **53** 434001
- [47] Hao Q, Garg J 2021 *ES Mater. Manuf.* **14** 36
- [48] Wang S, Xu D, Gurunathan R, Snyder G J, Hao Q 2020 *J. Mater.* **6** 248
- [49] Xu D, Hanus R, Xiao Y, Wang S, Snyder G J, Hao Q 2018 *Mater. Today Phys.* **6** 53
- [50] Ma D, Zhao Y, Zhang L 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 175302
- [51] Xiong G, Wang J-S, Ma D, Zhang L 2020 *EPL* **128** 54007
- [52] Zhou Y, Zhang X, Hu M 2016 *Nanoscale* **8** 1994
- [53] Rastgarkafshgarkolaei R, Zhang J, Polanco C A, Le N Q, Ghosh A W, Norris P M 2019 *Nanoscale* **11** 6254
- [54] Yang L, Wan X, Ma D, Jiang Y, Yang N 2021 *Phys. Rev. B* **103** 155305
- [55] Wan X, Feng W, Wang Y, Wang H, Zhang X, Deng C, Yang N 2019 *Nano Lett.* **19** 3387
- [56] Wan X, Ma D, Pan D, Yang L, Yang N 2021 *Mater. Today Phys.* **20** 100445
- [57] Ju S, Shiga T, Feng L, Hou Z, Tsuda K, Shiomi J 2017 *Phys. Rev. X* **7** 021024
- [58] Roy Chowdhury P, Reynolds C, Garrett A, Feng T, Adiga S P, Ruan X 2020 *Nano Energy* **69** 104428
- [59] Shanker A, Li C, Kim G H, Gidley D, Pipe K P, Kim J 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700342
- [60] Kim G-H, Lee D, Shanker A, Shao L, Kwon M S, Gidley D, Kim J, Pipe K P 2015 *Nat. Mater.* **14** 295
- [61] Zhang L, Liu L 2019 *Nanoscale* **11** 3656
- [62] Luo T, Lloyd J R 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2495
- [63] Losego M D, Grady M E, Sottos N R, Cahill D G, Braun P V 2012 *Nat. Mater.* **11** 502
- [64] Mehra N, Mu L, Ji T, Yang X, Kong J, Gu J, Zhu J 2018 *Appl. Mater. Today* **12** 92
- [65] Han H, Méribia S, Müller-Plathe F 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 1946
- [66] Xiong Y, W H, Gao J, Chen W, Zhang J, Yue Y 2019 *Acta Phys. Chim. Sin.* **35** 1150
- [67] Shen X, Wang Z, Wu Y, Liu X, He Y B, Kim J K 2016 *Nano Lett.* **16** 3585
- [68] Renteria J, Legedza S, Salgado R, Balandin M, Ramirez S, Saadah M, Kargar F, Balandin A 2015 *Mater. Design* **88** 214
- [69] Wu X, Luo T 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 014901
- [70] Mann D, Pop E, Cao J, Wang Q, Goodson K 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 1502
- [71] Maassen J, Lundstrom M 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 095102
- [72] Lu Z, Shi J, Ruan X 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 085107
- [73] Zhong J, Xi Q, Wang Z, Nakayama T, Li X, Liu J, Zhou J 2021 *J. App. Phys.* **129** 195102
- [74] Guo Y, Zhang Z, Bescond M, Xiong S, Nomura M, Volz S 2021 *Phys. Rev. B* **103** 174306
- [75] Cheng Z, Li R, Yan X, Jernigan G, Shi J, Liao M E, Hines N J, Gadre C A, Idrobo J C, Lee E, Hobart K D, Goorsky M S, Pan X, Luo T, Graham S 2021 *Nat. Commun.* **12** 6901
- [76] Mortazavi B, Podryabinkin E V, Roche S, Rabczuk T, Zhuang X, Shapeev A V 2020 *Mater. Horiz.* **7** 2359

SPECIAL TOPIC—Nano engineering and thermophysics

# Research progress of thermal transport in graphene-based thermal interfacial composite materials<sup>\*</sup>

An Meng<sup>1)†</sup> Sun Xu-Hui<sup>1)</sup> Chen Dong-Sheng<sup>1)</sup> Yang Nuo<sup>2)‡</sup>

1) (*College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China*)

2) (*School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

( Received 21 February 2022; revised manuscript received 16 April 2022 )

## Abstract

With the rapid increase of the thermal power density of microelectronic devices and circuits, controlling its temperature has become an urgent need for the development and application of the electronic industry. By virtue of the ultrahigh thermal conductivity of graphene, developing high-performance graphene-based composite thermal interface materials has attracted much research attention and become one of hot research topics. The understanding of phonon transport mechanism in graphene-based composites at atomic scale can be helpful to enhance the heat conductive capability of composites systems. In this review, focused on graphene-based thermal interfaces materials, the heat conduction mechanism and the regulating strategy are introduced on both the internal thermal resistance and interfacial thermal resistance. Finally, the research progress and opportunities for future studies are also summarized.

**Keywords:** thermal interfacial material, graphene composite, thermal conductivity, phonon coupling

**PACS:** 65.80.Ck, 62.23.Pq, 51.20.+d, 63.20.kg

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220306

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52006130), and the Fundamental Research Funds for Shaanxi Province (Grant No. 2020JQ-692) .

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [anmeng@sust.edu.cn](mailto:anmeng@sust.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [nuo@hust.edu.cn](mailto:nuo@hust.edu.cn)

## 石墨烯基复合热界面材料导热性能研究进展

安盟 孙旭辉 陈东升 杨诺

### Research progress of thermal transport in graphene-based thermal interfacial composite materials

An Meng Sun Xu-Hui Chen Dong-Sheng Yang Nuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 166501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220306

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220306>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于界面原子混合的材料导热性能

Thermal conductivity of materials based on interfacial atomic mixing

物理学报. 2022, 71(9): 093102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211451>

#### 不同周期结构硅锗超晶格导热性能研究

Thermal conductivities of different period Si/Ge superlattices

物理学报. 2021, 70(7): 073101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201789>

#### 含有倾斜界面硅/锗超晶格的导热性能

Thermal conductivity of Si/Ge superlattices containing tilted interface

物理学报. 2021, 70(11): 113101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201807>

#### 导热高分子聚合物研究进展

Research progress of polymers with high thermal conductivity

物理学报. 2022, 71(2): 023601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211876>

#### 二维材料热传导研究进展

Recent progresses of thermal conduction in two-dimensional materials

物理学报. 2020, 69(19): 196602 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200709>

#### 石墨烯尺寸和分布对石墨烯/铝基复合材料裂纹扩展的影响

Effects of graphene size and arrangement on crack propagation of graphene/aluminum composites

物理学报. 2022, 71(13): 134702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212203>