

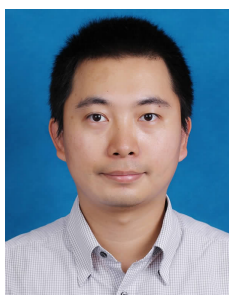
二维材料中的热传导

张忠卫^{1,2,3}, 陈杰^{1,2,3}

(1. 同济大学物理科学与工程学院 声学学与热能科学中心、高等研究院, 上海 200092)

(2. 同济大学 中欧纳米声子学联合实验室, 上海 200092)

(3. 上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092)



陈杰

摘要: 受到石墨烯的成功制备及其优异性质的影响, 新型二维材料的探索和研究成为近年来的研究热点, 比如六角氮化硼、硅烯、黑磷以及过渡金属硫化物等, 这些材料同样也展现出了优良的性质以及广阔的应用前景, 比如在场效应管、光电器件以及清洁能源等领域。另一方面, 随着电子元器件的不断小型化, 器件中热耗散问题成为制约其性能的关键问题, 特别是在微纳米尺度器件中, 这使得对二维材料热传导性质的研究显得尤为重要。针对几种典型的二维材料, 总结了热传导研究领域在理论计算以及实验测量方面的最新进展。这些二维材料由于其多样的结构特性和成键方式展现出各异的热传导性质, 可从石墨烯中的高热导率($2500 \sim 5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)跨度到黑磷中较低的热导率($9 \sim 30 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)。此外, 还特别分析了在二维材料中出现的一些独特物理现象, 比如尺寸效应、掺杂和表面吸附效应以及基底效应等。最后, 对二维材料的一些功能化应用研究进行了概括。

关键词: 二维材料; 热耗散; 热传导; 石墨烯; 尺寸效应

中图分类号: O641 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2017)02-0141-08

Thermal Transport in Two-Dimensional Materials

ZHANG Zhongwei^{1,2,3}, CHEN Jie^{1,2,3}

(1. Center for Phononics and Thermal Energy Science, Institute for Advanced Study, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. China-EU Joint Lab for Nanophononics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(3. Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, Shanghai 200092, China)

Abstract: The successful synthesis and unique properties of graphene attract extensive attentions in exploring two-dimensional (2D) materials, such as hexagonal boron nitride (*h*-BN), silicene, black phosphorus, and transition metal dichalcogenides (TMDs), due to their promising applications in electronics, optoelectronics and clean energy. On the other hand, the heat dissipation and management have become crucial issues for limiting the device performances in the micro-and nano-electronics industry. This paper reviews the state-of-the-art research progresses on the thermal transport properties of 2D materials from both theoretical and experimental investigations. Originated from their different crystal structures and bonding interactions, diverse thermal transport abilities are revealed in these materials. For example, the thermal conductivity can range from a superior high value ($2500 \sim 5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) in graphene to a lower value ($9 \sim 30 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) in black phosphorus. Moreover, some physical factors affecting thermal transport are also discussed, including the size effect, defects and doping effects, as well as the substrate effect. The thermal conductivity of 2D materials exhibits unique size dependence that is completely different from that of bulk materials, in addition, the large surface and vibration mode in 2D materials make it more sensitive to the external perturbations, such as defect, doping, and substrate. Finally, some functional applications of 2D materials are also summarized, such as heat dissipation, thermal rectification and thermoelectric application.

Key words: two-dimensional materials; heat dissipation; thermal transport; graphene; size effect

1 前言

二维材料是当今研究重点关注的低维材料之一^[1-4]。这类材料引起了人们广泛的研究兴趣, 并且展现出巨大的应用前景。受石墨烯的成功制备及其优异性质的激励,

收稿日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506153, 11334007)

第一作者: 张忠卫, 男, 1990年生, 博士研究生

通讯作者: 陈杰, 男, 1983年生, 研究员, 博士生导师,

Email: jie@tongji.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.02.09

二维材料的研究不管是在理论计算还是在实验上都受到了广泛的关注。比如,六角氮化硼、硅烯、二硫化钼、黑磷以及硼烯等^[5-10]。另外,二维复合材料也受到了大量关注,包括多层堆垛的复合结构,以及平面内结合的复合结构^[11-14]。不管是单质的二维材料还是复合二维材料都展现出了许多优良的性质,并且具备很大的应用价值。

在微纳电子器件中,功率的提高以及器件尺寸的微型化使得单位面积的功率密度急剧增长,导致器件中的热耗散成为关键的技术瓶颈,严重影响到器件的寿命和性能^[3,15]。二维材料由于其优异的电学性质将会在未来的电子器件中起到重要作用。对二维材料的热传导性质研究将会促进基于二维材料的电子器件的应用,并有望解决微纳电子器件的热耗散问题。同时,在二维材料中存在着诸多不同于传统体材料的新奇热输运现象值得探索。比如,尺寸效应、弹道输运以及各向异性等^[16-18]。另外,二维材料在声子器件以及热电材料的研究中也被广泛关注^[19-22]。本综述对一些典型二维材料热传导性质的研究现状进行了总结。此外,对二维材料中存在的一些物理现象以及功能化应用进行了简单介绍。

2 热导率

2.1 单层二维材料

石墨烯是第一种在实验中制备出来的单层二维材料,具有独特的电子、机械和光学等物理性质,例如:室温下载流子迁移率高达 $15000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$,因而近年来受到了广泛的关注^[2,23,25]。此外,石墨烯的热输运性质同样也非常出色^[26,27]。如图 1a 所示,Balandin 等^[27-29]的实验研究表明石墨烯在悬空情况下其本征热导率高达 $2500 \sim 5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,是块体石墨热导率的 2~3 倍,并且可以与金刚石以及碳纳米管的高热导率相媲美^[30]。由于实验条件的差异,不同实验工作中测得的热导率不尽相同^[27-29]。但总体来说,石墨烯的热导率在数量级上高于大部分现有材料,这使得石墨烯成为一种理想的热耗散材料。

同时,人们也对石墨烯超高热导率的物理机制开展了大量理论研究。Lindsay 等^[31]通过玻尔兹曼输运方法研究发现,不同于三维材料,石墨烯中平面外偏振的 ZA 声子对热输运起主要贡献。虽然由于 ZA 的二次曲线声子色散关系,导致其只有很低的声子群速度。但是,研究发现 ZA 声子具有很大的声子态密度以及热容。另外,二维材料的平面特性使其在垂直于平面方向具有镜面对称性,这极大地限制了 ZA 声子在相空间的散射,从而起到了降低散射率以及提高声子弛豫时间的作用^[31,32],最终导致 ZA 声子对石墨烯中热输运起主导作用。另外,LA 支的线性色散关系,使得它

具有很高的声子群速度,从而也对声子输运起到了较大的贡献。同时,由于 LA 支低频区具有较高的声子群速度以及较长的弛豫时间,导致了石墨烯具有很长的声子平均自由程,在室温下可以达到 700 nm ^[3,33]。

受到石墨烯研究的影响和激励,其他新型的二维结构也受到了广泛关注。比如硅烯,二硫化钼,黑磷和硼烯等。这些二维结构具有不同的声子色散关系和结构特性,因此表现出更加多样化的热传导性能^[34-36]。这些新型结构可以分为完全单原子层和多原子层两种类型。六角氮化硼和硅烯是单原子层二维材料的典型。其中,六角氮化硼是一种完全与石墨烯类似的单原子层六角晶格结构,这使得六角氮化硼具备了与石墨烯类似的高温稳定性和高热导率^[17,37,38]。如图 1b 所示,Lindsay 等^[39]基于玻尔兹曼输运方法的理论研究表明单层六角氮化硼的热导率在室温下达到了 $600 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,这已经可以媲美部分金属的热传导性能。最近,同济大学 Wang 等^[38]在实验上发现双层的六角氮化硼结构同样具有很高的热导率。另外,Jo 等^[37]发现,层数达到 5 层及 11 层之后反而会比块体的氮化硼结构热导率要低。硅烯是与石墨烯同族的类石墨烯结构,但具有不完全平整的原子结构以及相对于石墨烯更重的原子质量,其热导率远低于石墨烯^[34,40]。如图 1c 所示,Liu 等^[40]基于分子动力学的计算表明常温下硅烯的热导率在 $10 \sim 60 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 范围内,其中的差异主要来自于不同的作用势函数。Gu 等^[41]基于第一性原理的玻尔兹曼输运方法预测硅烯热导率为 $20 \sim 30 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。这些研究结果都说明硅烯的热导率比较低,具有在热电转换方面的应用前景。

二硫化钼和黑磷同样也是受到广泛关注的二维材料,其特点是它们并不是由单原子层构成的平面结构。作为其中典型的代表,二硫化钼是由硫-钼-硫三原子层构成的特殊三明治结构。二硫化钼的热导率在实验测量和理论计算上都存在着一定的差异^[42-47]。如图 1d 所示,Zhang 和 Liu 等^[45,46]实验测量得到的二硫化钼热导率在室温下为 $85 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,但 Yan 等^[48]测得的室温结果为 $34.5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,这些差异可能来自材料制备和实验方法上的不同。同时,理论计算的二硫化钼热导率在 $6.0 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 到 $104 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 不等^[43,49,50],取决于理论计算上势函数的选取以及采用的近似方法。但现有研究结果一定程度上反映了二硫化钼结构的热导率并不高,有可能会制约其在电子器件散热方面的应用。如图 1d 所示,其他二维过渡金属化合物也表现出了较低的热导率,从 $0.1 \sim 100 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 不等^[44]。而黑磷是另一种结构起伏较大的二维材料,它由两层硼原子上下间隔相连形成,奇异的是其长程相互作用仍对结构稳定和热输运

起到了重要作用^[3, 51]。黑磷同样具有很高的载流子迁移率,这也使得它具备广阔的应用前景。此外,现有关于黑磷热导率的理论预测结果存在较大差异。比如,在锯齿形方向其室温热导率 $30 \sim 152.7 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 同时扶手

椅方向为 $9.9 \sim 63.9 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ^[4, 35]。导致理论预测差异的主要原因可能是对结构中中程作用影响的考虑。此外,由于黑磷结构上具有各向异性,导致了其热导率同样表现出很强的各向异性^[52]。

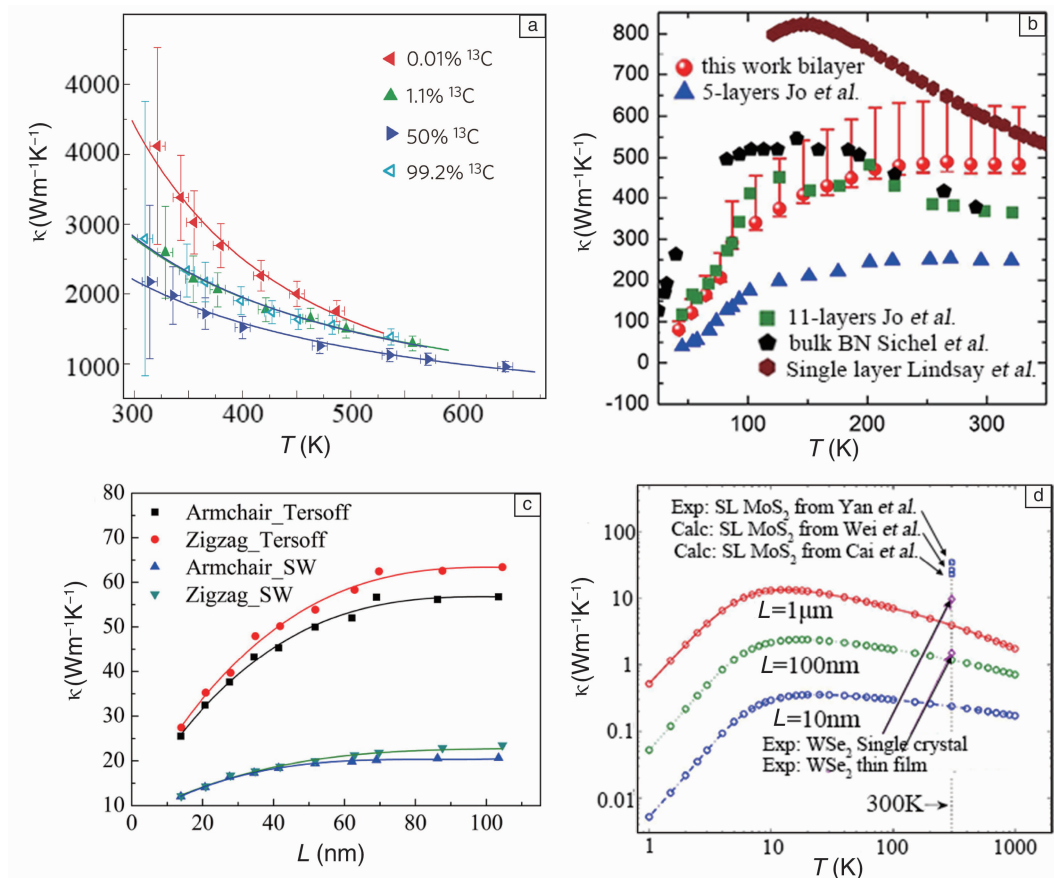


图1 二维材料中的热导率: (a) 不同 ^{13}C 同位素浓度下的石墨烯热导率^[27]; (b) 不同厚度的六角氮化硼热导率^[38]; (c) 硅烯在不同方向以及不同作用势函数下的热导率^[40]; (d) 几种典型硫化过渡金属热导率^[44]

Fig. 1 Thermal conductivities of two-dimensional materials: (a) Thermal conductivities of graphene with different ^{13}C isotope concentrations^[27], (b) Thermal conductivities of hexagonal boron nitride with different layer^[38], (c) Thermal conductivities of silicene with different chirality and potential^[40], (d) Thermal conductivities of some typical transition metal dichalcogenides^[44]

另外,最近在基于硼元素的二维结构实验制备上取得了一些进展^[8, 53, 54]。这类新型二维结构的热传导性质同样受到了很大的关注。研究发现,由于硼原子相对于石墨烯具有更加多样的成键特性,其热传导性质也更加多样化^[36]。当结构的成键特性展现出类石墨烯的六角晶格分布时,它的热导(Thermal Conductance)可以达到石墨烯的一半。但当六角晶格分布被打破后,热导将会不同程度地下降。同时,原子间成键强度的各向异性,也导致了硼结构具备多样的热传导各向异性。

2.2 复合二维材料

多层堆垛是一种较为常见的二维材料复合方式,它是通过层间的范德华力将不同的二维材料耦合在一起^[11, 55],如图2a所示。这些复合结构展现出了多样的

热传导性质,并且会随着堆垛方式的变化而改变^[56-57]。如图2b所示,Zhang等^[57]发现在石墨烯/二硫化钼的堆垛复合结构中,其层间相互作用导致的层间散射会降低石墨烯的热导率,但是相比于二硫化钼较低的热导率,复合材料的热导率得到了显著的提升。另外一种受到关注的二维复合材料是石墨烯/六角氮化硼复合结构,由于相近的晶格常数,相对于其他材料六角氮化硼对石墨烯热导率的影响并不是十分显著。同时,六角氮化硼也是一种很好的电绝缘材料,所以也被认为是一种潜在的石墨烯基底材料^[58, 59]。

面内耦合是二维结构复合的另一种方式,它将不同结构通过平面内的化学键耦合在一起^[13, 60]。大部分的二维结构都具有迥异的热传导性质,并且晶格结构也各异。

因此,通过面内耦合的方式构成的复合结构通常会在耦合处出现声子模式的局域^[21],如图 2c 所示。这被当做是降低热传导性质的一种手段。比如,在石墨烯/六角氮

化硼以及二硫化钼/二硫化钨的面内耦合结构^[21,61]。如图 2d 所示,可以通过界面耦合以及增多界面的方法降低热导率,从而实现热电性能的提高。

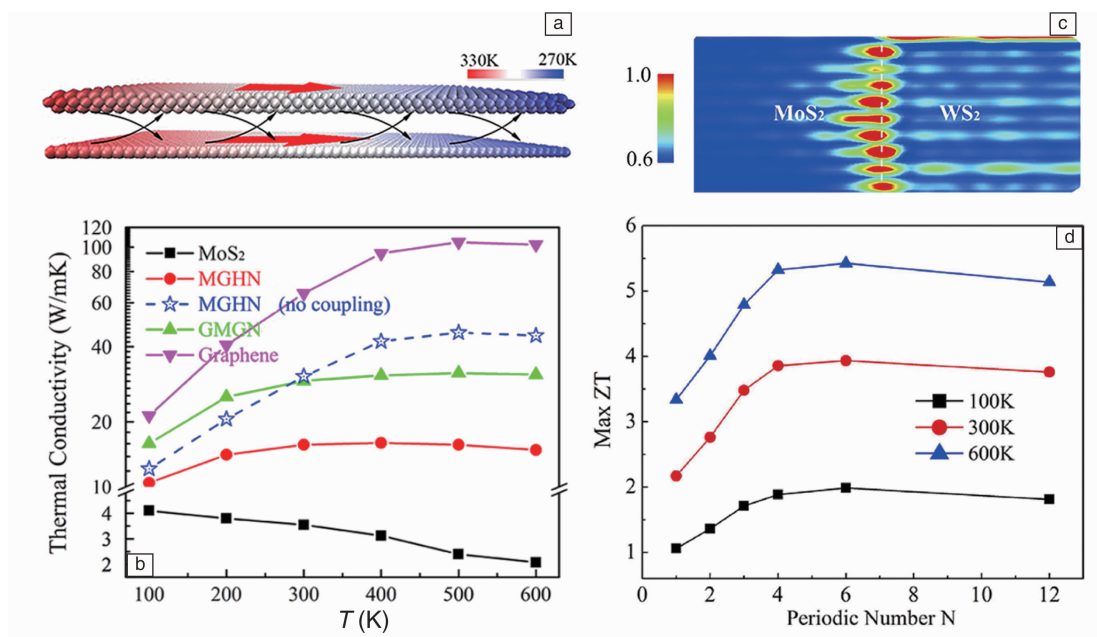


图 2 复合二维材料的热导率: (a) ~ (b) 堆垛的石墨烯/二硫化钼复合二维材料中的热输运^[57]; (c) ~ (d) 平面内的二硫化钼/二硫化钨复合二维材料中的声子局域和热电优值随界面周期数的变化^[21]

Fig. 2 Thermal conductivities of hybrid two-dimensional materials: (a) Schematic figure and (b) thermal conductivity of MoS₂/graphene vertically hybrid structure with finite size^[57], (c) Phonon localization and (d) MaxZT in MoS₂/WS₂ in-plane hybrid structure versus periodic number N^[21]

3 微观物理效应

3.1 尺寸效应

相比于热导率不随尺寸变化的块体材料,二维材料的热导率具有非常奇特的尺寸效应。比如, Nika 等^[62]认为石墨烯中低频声子的长平均自由程对石墨烯传热具有重要的贡献,并且预测石墨烯的热导率会随着长度的增加而增大直到 30 μm 。Zhu 等^[63]也在黑磷结构中发现了各向相异的尺寸效应。在石墨烯中,其低频声子具有很长的声子弛豫时间以及较大的声子群速度,这使得它具有很多长平均自由程声子以及显著的尺寸效应。如图 3a 所示, Xu 等^[16]的实验研究发现在室温的情况下,石墨烯的热导率随着长度会呈现对数增长($\kappa \sim \log L$),并且在较短尺寸下会出现弹道运输的现象。而黑磷结构上迥异的各向异性,导致了它在各方向上截然不同的尺寸效应^[63]。

当单层二维材料由堆垛向多层甚至是块体变化时,它的热导率同样也会在厚度方向上产生尺寸相应。在 Ghosh 等^[64]的实验研究中,悬空的单层石墨烯热导率可以达到 $\sim 4000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$,当层数从 2 层变化到 4 层时,

热导率从 $2800 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 单调下降到 $1300 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。这同样也对应于当单层石墨烯变化到块体石墨时热导率的下降。类似的,在二硫化钼和黑磷中也观测到了厚度方向上的尺寸效应^[65]。主要原因是在二维结构中,面外振动的 ZA 模式对热传导起到了很大的贡献。当二维结构的层数增多时,层间耦合会打破面外的镜像对称性,从而增强了面内和面外的声子散射^[32]。

3.2 缺陷、吸附散射效应

二维材料裸露的原子表面,使得缺陷和表面吸附成为了二维材料制备中不可避免的问题。研究表明这些缺陷和吸附对材料的热传导起到了一定的调控作用。如图 3b 所示, Zhang 等^[66]通过分子动力学方法研究发现,仅通过 1% 的点缺陷率就会造成热导率 98% 的下降。同时 Feng 等^[32]运用能量密度谱方法研究表明,点缺陷的存在引起了声子与缺陷之间的散射,破坏了石墨烯晶格结构的对称性,从而达到了降低声子弛豫时间和平均自由程的作用。同样在二硫化钼中也发现了点缺陷对热导率的调控现象:仅通过 0.5% 的钼原子缺陷,二硫化钼的热导率可以下降 60%^[67]。另外,规则排列的缺陷可以在石墨烯等二维结构中形成声子晶体,声子晶体中会出

现更加多样的热传导现象^[68]。

二维材料的表面吸附同样可以起到调控热传导的作用, 比如氢吸附和氧吸附等。二维材料被吸附后会增加声子的散射起到降低热导率的作用。Pei 等^[69]通过分子动力学方法研究发现, 氢吸附之后石墨烯的热导率会下降到原有的 30%。同样运用分子动力学方法, Zhang 等^[70]发现单侧的氢吸附可起到自发折叠石墨烯的作用, 如图 3c 所示。进而可以通过周期性地上下吸附达到调控石墨烯结构的作用, 并且折叠后的石墨烯具有更强的热导率调控作用。

3.3 基底效应

二维材料在实际应用中, 通常要放置于基底上。此时二维材料在基底上的热传导性质将决定了在实际应用

中的热耗散性能。如图 3d 所示, Chen 等^[71]的分子动力学模拟表明在二氧化硅基底上, 基底和石墨烯之间的耦合会极大地抑制石墨烯的尺寸效应, 并且导致最终的热导率只有 $600 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。这一抑制现象同样也在实验上被观测到^[28, 72]。由于石墨烯热导率在基底上显著降低, 这驱使人们为石墨烯寻找一种更合适的基底材料。此外, Chen 等^[71]的研究同时也表明, 与悬空情况相反, 基底上的多层石墨烯热导率会随着层数的增加而增大, 并且最终趋近于石墨的热导率。有趣的是, Zhang 等^[73]通过分子动力学模拟方法研究表明在 6H-SiC 基底上, 硅烯的声学声子弛豫时间反而增大, 这导致在 6H-SiC 基底上硅烯热导率反而得到了增强。

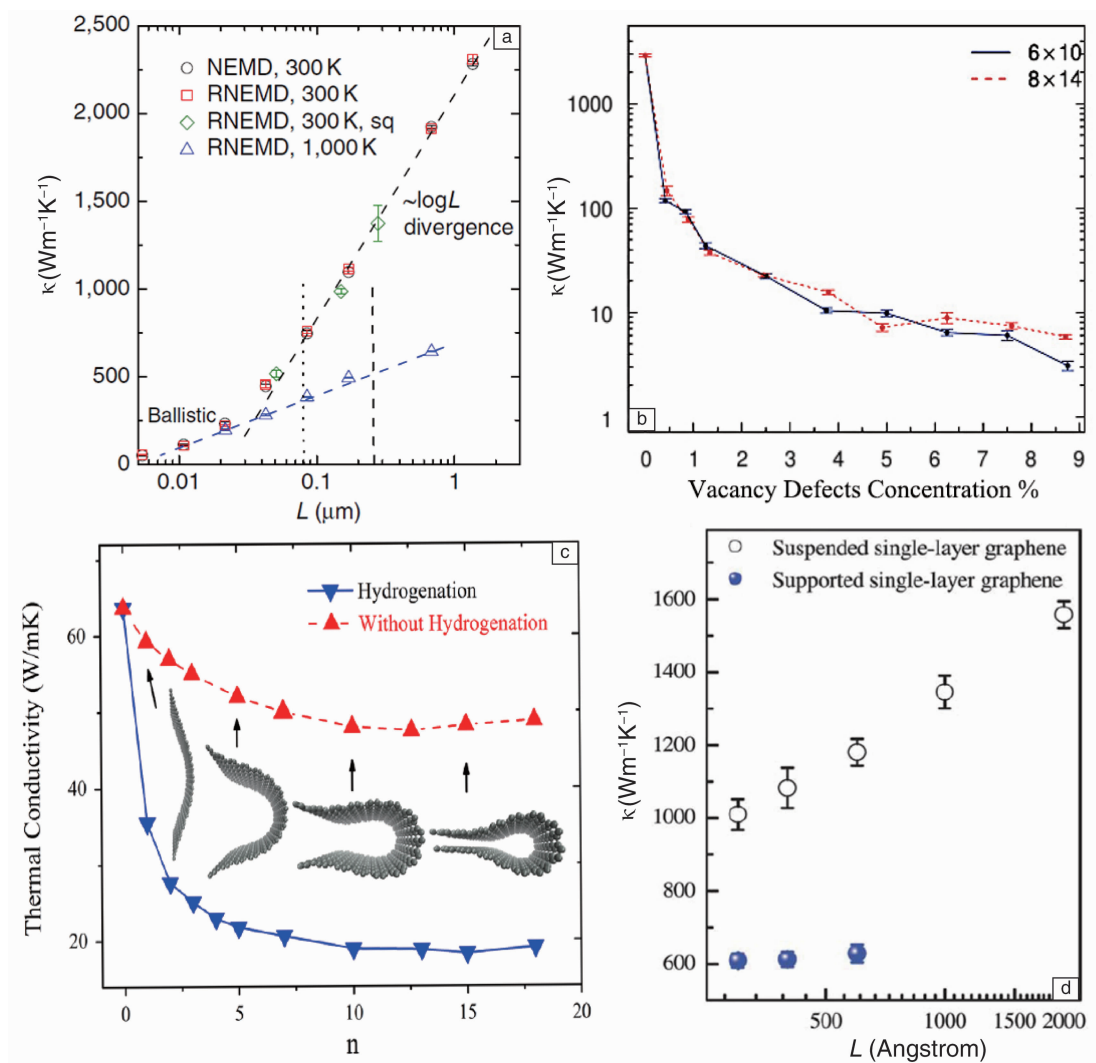


图3 二维材料中热传导的物理现象: (a) 石墨烯中热导率的尺寸效应^[16], (b) 缺陷效应^[66], (c) 氢吸附效应^[70], (d) 基底效应^[71]

Fig. 3 Physical factors on thermal transport of two-dimensional materials: (a) Size effects^[16], (b) vacancy defects concentration effects^[66], (c) hydrogenation effects^[70] and (d) substrate effects of graphene thermal conductivity^[71]

3.4 功能化应用

3.4.1 热耗散

石墨烯在平面内具有较高的热导率,使其在散热方面具有很强的应用前景。比如,通过分子动力学方法,Luo 等^[74]研究发现可以通过在有机物中插入石墨烯纳米片,通过控制它们之间的成键,可以较大幅度增强有机物的传热能力。同时,Chen 等^[75]分别通过平面内和层间的应力对石墨烯层间热阻进行了较大幅度的调控。并且发现,2 GPa 的层间压强可以降低热阻 50%。他们的进一步工作发现,如图 4a 所示,通过将石墨烯和碳纳米

管以共价键的方式连接在一起,可以极大地增强界面热传导,降低石墨烯层间热阻^[76]。共价键的连接有效地提高了声子传输系数,将界面热阻降低了 3 个数量级,远低于多层石墨烯的层间热阻^[18,76],如图 4b 所示。并且,通过在该混合结构外引入流体,能达到很好的传热效果,可用于高温表面的快速冷却^[77]。另外,他们关于多层石墨烯和水之间界面热阻的研究发现,如图 4c 和 4d,界面热阻会随着界面处水密度峰值的增大而减小^[78],改变界面处的亲疏水性可以有效地调控固液界面热阻。

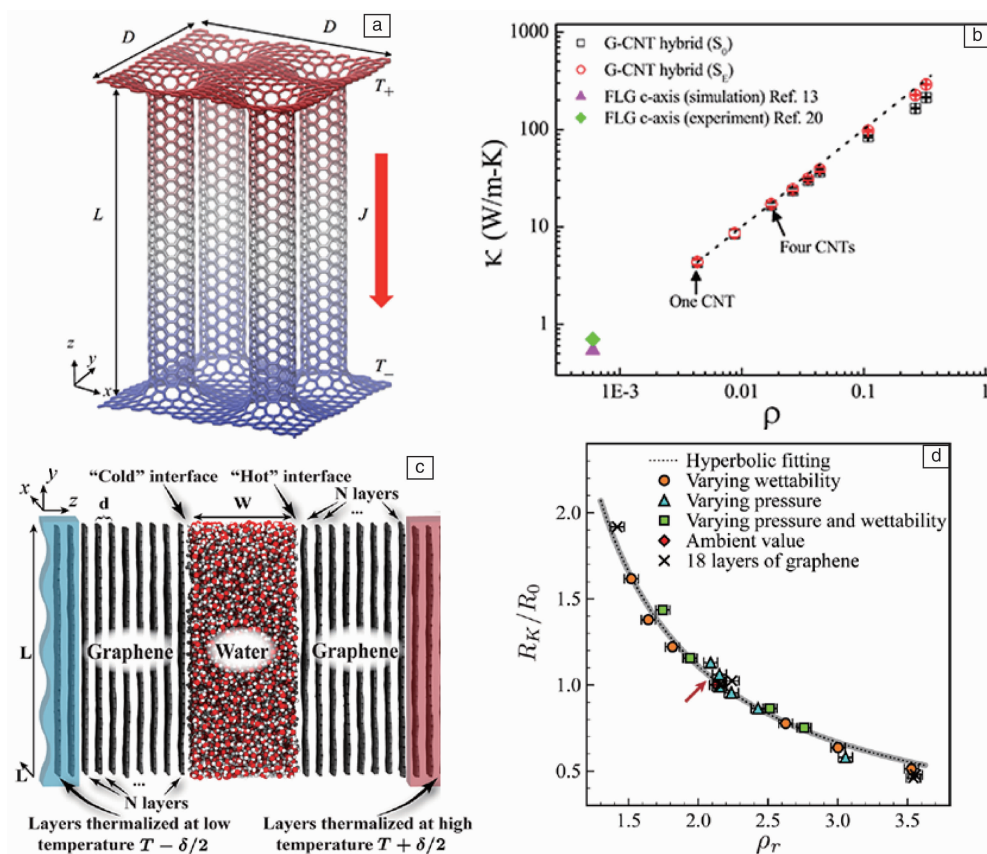


图 4 二维材料的功能化应用: (a) 共价键相连的石墨烯和碳纳米管复合材料, (b) 层间热导率随着碳纳米管密度的变化^[76]; (c) 多层石墨烯和水组成的固液界面, (d) 固液热阻随着水密度峰值的变化^[78]

Fig. 4 Functional applications of two-dimensional materials: (a) The covalently bonded graphene-carbon nanotube (G-CNT) hybrid structure, and (b) cross-plane thermal conductivity versus CNT density^[76]; (c) Few-layer graphene and water hybrid structure, and (d) the dependence of interfacial Kapitza resistance on the reduced water density peak water^[78]

3.4.2 热整流

同时,低维纳米材料中的热传导以及声子调控也引起了人们浓厚的研究兴趣。声子学的提出使得人们认识到可以像控制电子一样对声子进行精确的控制,并且提出一些类似于电子的声子元器件^[79,80],如热整流器、热逻辑门以及热晶体管等。在二维材料中,声子具有很强的可调性。基于此,有人进一步设计出多样的声子器件,

比如,热二极管,热逻辑门等。Yang 等^[81]在不对称的三角形或者 T 型结构中发现了热整流效应,提出了石墨烯热二极管的概念。并且,近期在二硫化钼中也发现了类似的热整流现象^[82]。

3.4.3 热电

能源与环境问题使得热电材料受到了极大的关注。热电材料能实现热能与电能之间的相互转换,尤其可以

把低级废热转换成电能。对于一个好的热电材料, 它必须具备较高的热电品质因子 ZT 。一个具有较高 ZT 值的结构, 需要具备较高的热电功率 (Thermo Power) 和低的热导率。而大部分二维材料由于其非完全平面的结构特性, 其热传导性能并不高, 但这一类材料都具有良好的电学性质, 所以二维材料被认为是一种潜在的热电材料^[83,84]。另外, 二维材料的热传导具有很高的可调性, 可以进一步进行结构调控降低热导率从而提高热电性能^[21,61]。比如在二维材料中通过界面、缺陷以及表面吸附等降低热导率, 如图 2b 所示。

4 结 语

在本篇综述中, 介绍了几种典型的二维材料及其复合材料的热传导性质, 比如石墨烯、六角氮化硼、硅烯以及二硫化钼等。并且对二维材料中出现的一些奇特的传热效应进行了总结, 比如尺寸效应, 点缺陷以及吸附效应, 基底效应等。最后, 对二维材料传热性质的部分功能化应用进行了总结。这些二维材料具备多样的热传导性质, 现有研究既有利于这类材料的实际应用, 也是物理科学发展的重要部分。虽然受到了大量的研究关注, 关于二维材料中热传导仍有许多问题有待进一步研究和解决。比如, 基底对热传导抑制问题, 极低的层间传热问题, 理论模拟中不同作用势和近似方法间的差异问题等。另一方面, 二维材料热传导性能的研究和认识将有助于指导新结构预测, 推动具有特定功能化的热学新材料发展。

参考文献 References

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. *Nature*[J], 2005, 438 (7065): 197–200.
- [2] Hwang E H, Adam S, Sarma S D. *Physical Review Letters*[J], 2007, 98(18): 186806.
- [3] Qin G, Hu M. *Diverse Thermal Transport Properties of Two-Dimensional Materials: A Comparative Review* [M]. Rijeka: InTech, 2016: 199–217.
- [4] Xu X, Chen J, Li B. *Journal of Physics: Condensed Matter*[J], 2016, 28(48): 483001.
- [5] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, et al. *Nano Letters*[J], 2010, 10(4): 1271–1275.
- [6] Albert B, Hillebrecht H. *Angewandte Chemie International Edition* [J], 2009, 48(46): 8640–8668.
- [7] Song L, Ci L, Lu H, et al. *Nano Letters*[J], 2010, 10(8): 3209–3215.
- [8] Mannix A J, Zhou X F, Kiraly B, et al. *Science* [J], 2015, 350 (6267): 1513–1516.
- [9] Ni Z, Liu Q, Tang K, et al. *Nano Letters*[J], 2012, 12(1): 113–118.
- [10] Zhang J L, Zhao S, Han C, et al. *Nano Letters*[J], 2016, 16(8): 4903–4908.
- [11] Kwak J Y, Hwang J, Calderon B, et al. *Nano Letters*[J], 2014, 14 (8): 4511–4516.
- [12] Qiu H, Pan L, Yao Z, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2012, 100 (12): 123104.
- [13] Liu Z, Ma L, Shi G, et al. *Nature Nanotechnology*[J], 2013, 8(2): 119–124.
- [14] Zhu T, Ertekin E. *Physical Review B*[J], 2014, 90(19): 195209.
- [15] Ghosh S, Calizo I, Teweldebrhan D, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2008, 92(15): 151911.
- [16] Xu X, Pereira L F, Wang Y, et al. *Nature Communications* [J], 2014, 5: 3689.
- [17] Ouyang T, Chen Y, Xie Y, et al. *Nanotechnology*[J], 2010, 21(24): 245701.
- [18] Wang C, Liu Y, Li L, et al. *Nanoscale*[J], 2014, 6(11): 5703–5707.
- [19] Ouyang T, Chen Y, Xie Y, et al. *Physical Review B*[J], 2010, 82 (24): 245403.
- [20] Hu J, Ruan X, Chen Y P. *Nano Letters*[J], 2009, 9(7): 2730–2735.
- [21] Zhang Z, Xie Y, Peng Q, et al. *Scientific Reports*[J], 2016, 6: 21639.
- [22] Wang J, Zhu L, Chen J, et al. *Advanced Materials*[J], 2013, 25 (47): 6884–6888.
- [23] Bu H, Chen Y, Zou M, et al. *Physics Letters A*[J], 2009, 373(37): 3359–3362.
- [24] Geim A K. *Science*[J], 2009, 324(5934): 1530.
- [25] Huang X, Yin Z, Wu S, et al. *Small*[J], 2011, 7(14): 1876–1902.
- [26] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. *Nano Letters*[J], 2008, 8(3): 902–907.
- [27] Chen S, Wu Q, Mishra C, et al. *Nature Materials*[J], 2012, 11(3): 203–207.
- [28] Seol J H, Jo I, Moore A L, et al. *Science*[J], 2010, 328(5975): 213.
- [29] Cai W, Moore A L, Zhu Y, et al. *Nano Letters*[J], 2010, 10(5): 1645–1651.
- [30] Elbrahimi F, Heidari E. *A Review on Modeling, Synthesis, and Properties of Graphene* [M]. Rijeka: InTech, 2015: 953–978.
- [31] Lindsay L, Broido D A, Mingo N. *Physical Review B*[J], 2010, 82 (11): 115427.
- [32] Feng T, Ruan X, Ye Z, et al. *Physical Review B*[J], 2015, 91(22): 224301.
- [33] Balandin A A. *Nature Materials*[J], 2011, 10(8): 569–581.
- [34] Zhang X, Xie H, Hu M, et al. *Physical Review B*[J], 2014, 89(5): 054310.
- [35] Qin G, Yan Q B, Qin Z, et al. *Physical Chemistry Chemical Physics* [J], 2015, 17(7): 4854–4858.
- [36] Zhang Z, Xie Y, Peng Q, et al. *Nanotechnology* [J], 2016, 27 (44): 445703.
- [37] Jo I, Pettes M T, Kim J, et al. *Nano Letters*[J], 2013, 13(2): 550–

- 554.
- [38] Wang C, Guo J, Dong L, *et al.* *Scientific Reports* [J], 2016, 6: 25334.
- [39] Lindsay L, Broido D A. *Physical Review B* [J], 2012, 85(3): 035436.
- [40] Liu B, Reddy C D, Jiang J, *et al.* *Journal of Physics D: Applied Physics* [J], 2014, 47(16): 165301.
- [41] Gu X, Yang R. *Journal of Applied Physics* [J], 2015, 117(2): 025102.
- [42] Cai Y, Lan J, Zhang G, *et al.* *Physical Review B* [J], 2014, 89(3): 035438.
- [43] Jiang J W, Park H S, Rabczuk T. *Journal of Applied Physics* [J], 2013, 114(6): 064307.
- [44] Zhou W X, Chen K Q. *Scientific Reports* [J], 2015, 5: 15070.
- [45] Zhang X, Sun D, Li Y, *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2015, 7(46): 25923–25929.
- [46] Liu J, Choi G M, Cahill D G. *Journal of Applied Physics* [J], 2014, 116(23): 233107.
- [47] Wang Y, Vallabhaneni A K, Qiu B, *et al.* *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering* [J], 2014, 18(2): 155–182.
- [48] Yan R, Simpson J R, Bertolazzi S, *et al.* *ACS Nano* [J], 2014, 8(1): 986–993.
- [49] Li W, Carrete J, Mingo N. *Applied Physics Letters* [J], 2013, 103(25): 253103.
- [50] Liu X, Zhang G, Pei Q X, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2013, 103(13): 133113.
- [51] Jiang J W, Park H S. *Nature Communications* [J], 2014, 5: 4727.
- [52] Jang H, Wood J D, Ryder C R, *et al.* *Advance Materials* [J], 2015, 27(48): 8017–8022.
- [53] Zhang Z, Penev E S, Yakobson B I. *Nature Chemistry* [J], 2016, 8(6): 525–527.
- [54] Feng B, Zhang J, Zhong Q, *et al.* *Nature Chemistry* [J], 2016, 8(6): 563–568.
- [55] Chen X K, Xie Z X, Zhou W X, *et al.* *Carbon* [J], 2016, 100: 492–500.
- [56] Gao Y, Liu Q, Xu B. *ACS Nano* [J], 2016, 10(5): 5431–5439.
- [57] Zhang Z, Xie Y, Peng Q, *et al.* *Nanotechnology* [J], 2015, 26(37): 375402.
- [58] Yan Z, Chen L, Yoon M, *et al.* *Nanoscale* [J], 2016, 8(7): 4037–4046.
- [59] Pak A J, Hwang G S. *Physical Review Applied* [J], 2016, 6(3): 034015.
- [60] Zhou Y, Dong J, Li H. *RSC Advances* [J], 2015, 5(82): 66852–66860.
- [61] Yang K, Chen Y, D'Agosta R, *et al.* *Physical Review B* [J], 2012, 86(4): 045425.
- [62] Nika D L, Ghosh S, Pokatilov E P, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2009, 94(20): 203103.
- [63] Zhu L, Zhang G, Li B. *Physical Review B* [J], 2014, 90(21): 214302.
- [64] Ghosh S, Bao W, Nika D L, *et al.* *Nature Materials* [J], 2010, 9(7): 555–558.
- [65] Sahoo S, Gaur A P S, Ahmadi M, *et al.* *The Journal of Physical Chemistry C* [J], 2013, 117(17): 9042–9047.
- [66] Zhang H, Lee G, Cho K. *Physical Review B* [J], 2011, 84(11): 115460.
- [67] Ding Z, Pei Q X, Jiang J W, *et al.* *The Journal of Physical Chemistry C* [J], 2015, 119(28): 16358–16365.
- [68] Hu S, An M, Yang N, *et al.* *Nanotechnology* [J], 2016, 27(26): 265702.
- [69] Pei Q X, Sha Z D, Zhang Y W. *Carbon* [J], 2011, 49(14): 4752–4759.
- [70] Zhang Z, Xie Y, Peng Q, *et al.* *Solid State Communications* [J], 2015, 213 – 214: 31–36.
- [71] Chen J, Zhang G, Li B. *Nanoscale* [J], 2013, 5(2): 532–536.
- [72] Sadeghi M M, Jo I, Shi L. *Proc Natl Acad Sci U S A* [J], 2013, 110(41): 16321–16326.
- [73] Zhang X, Bao H, Hu M. *Nanoscale* [J], 2015, 7(14): 6014–6022.
- [74] Luo T, Lloyd J R. *Advanced Functional Materials* [J], 2012, 22(12): 2495–2502.
- [75] Chen J, Walther J H, Koumoutsakos P. *Nano Letters* [J], 2014, 14(2): 819–825.
- [76] Chen J, Walther J H, Koumoutsakos P. *Advanced Functional Materials* [J], 2015, 25(48): 7539–7545.
- [77] Chen J, Walther J H, Koumoutsakos P. *Nanotechnology* [J], 2016, 27(46): 465705.
- [78] Alexeev D, Chen J, Walther J H, *et al.* *Nano Letters* [J], 2015, 15(9): 5744–5749.
- [79] Li B, Wang L, Casati G. *Physical Review Letters* [J], 2004, 93(18): 184301.
- [80] Zhang Z, Chen Y, Xie Y, *et al.* *Applied Thermal Engineering* [J], 2016, 102: 1075–1080.
- [81] Yang N, Zhang G, Li B. *Applied Physics Letters* [J], 2009, 95(3): 033107.
- [82] Medrano S L, Gutierrez R, Dianat A, *et al.* *RSC Advance* [J], 2015, 5(67): 54345–54351.
- [83] Ouyang T, Hu M. *Nanotechnology* [J], 2014, 25(24): 245401.
- [84] Xu Y, Li Z, Duan W. *Small* [J], 2014, 10(11): 2182–2199.

(本文为本刊约稿, 编辑 吴 琛)