



一个评估石墨导热膜散热性能的综合参数

郭志军^{1,2,3}, 郭孟川¹, 孙波^{1,3}, 陈仁政², 杨兰贺², 成会明^{4,*}

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳, 518055;

2. 苏州鸿凌达电子科技股份有限公司, 江苏 苏州, 215155;

3. 广东省热管理工程与材料重点实验室, 广东 深圳, 518055;

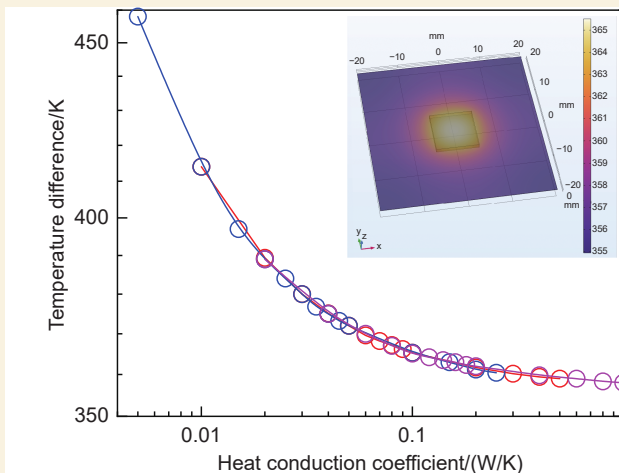
4. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳, 518055)

摘要: 针对电子器件散热用导热膜的性能评估问题, 本文提出以“热流因子”(厚度 × 面内热导率)作为核心评价指标。通过建立“导热膜-器件”有限元模型, 系统研究了石墨导热膜面内热导率与厚度对散热性能的影响机制。仿真结果表明, 在石墨导热膜的厚度 ≤ 100 μm 时, 面内热导率与厚度对散热效果具有等效作用: 在相同热流因子下, 不同面内热导率与厚度组合的温度分布基本一致; 提高热流因子可显著降低器件表面温度, 但当其过高时散热性能增益急剧减弱; 当厚度超过 1 mm 时, 因侧面积增大导致垂直方向(Z向)热阻及对流面积变化, 破坏二维假设, 此时热流因子模型不再适用。本文进一步采用稳态温差法对系列商用石墨膜样品开展验证实验。结果表明, 实验数据与有限元模拟分析结果基本一致, 证实了热流因子可作为指导导热膜选型的有效参数, 为电子设备热设计提供理论依据。

关键词: 石墨导热膜; 导热性能; 热流因子; 有限元仿真; 薄型石墨

中图分类号: TB33

文献标识码: A



1 前言

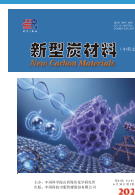
在电子设备日益追求高性能、小型化与轻薄化的背景下, 散热问题已成为制约其发展的重要瓶颈。器件工作时产生的热量若不能有效散发, 将导致温度升高, 从而降低其性能、可靠性与使用寿命^[1-4]。常见的散热方式包括金属散热片、水冷系统、强制风冷和热管等。尽管这些方案工艺成熟, 但由于受到空间、质量和噪音的限制, 在手机等小型电子设备中难以广泛应用^[5-7]。导热膜, 尤其是石墨导热膜, 作为一种新型被动式导热材料, 凭借其独特的物理结构和卓越性能, 正迅速成为解决小型电子设备散热难题的关键技术之一^[8-9]。该类材料(如石墨烯散热膜、人工石墨膜等)通常在平面方向(XY方向)具备极高的热导率, 远优于 Cu、Al 等金属^[10-21]。这种各向异性导热特性使其能够快速高效地将热源产生的热量沿膜平面扩散, 形成更均匀的温度场, 有效避免局部过热^[22-25]。同时, 导热膜厚度仅

为微米级(几十至几百微米), 兼具优异的柔韧性和可弯曲性, 可紧密贴合各种复杂曲面与不规则表面, 适应现代电子设备内部紧凑异形的空间布局, 这是传统刚性散热器难以实现的。石墨类导热膜(如石墨烯散热膜、人工石墨膜)通常具有高度定向排列的石墨微晶结构, 面内方向晶格完整性高、缺陷少, 导致其面内热导率极高; 而垂直膜面方向仅依靠弱范德华力结合, 热导率较低。这种结构特性使其在面内方向上表现出远超铜、铝等金属的导热能力, 同时密度显著降低, 更适合轻量化电子设备。对手机、平板电脑、笔记本电脑等便携设备以及航空航天、汽车电子领域尤为重要。此外, 作为

收稿日期: 2026-01-27

修回日期: 2026-03-23

接收日期: 2026-03-23



被动散热材料,其无需风扇等机械运动部件,彻底杜绝了磨损、故障和噪音问题,具备极长的工作寿命和高可靠性。导热膜还可像普通材料一样进行裁剪、冲型和背胶处理,安装工艺简单,便于实现自动化生产,从而有效降低组装成本。

如何提升散热效果,是导热膜设计、研发与实际应用中的核心命题,而解决这一命题的前提,在于建立对导热膜散热效果的科学评估方法。在石墨导热膜的研究与应用领域,行业内长期存在单一维度的性能评判误区:或是仅将面内热导率作为核心评估指标,却忽视了材料厚度对实际散热效果的显著影响;或是过度关注厚度参数,反而弱化了面内热导率的关键作用。这种片面的表征方式,往往难以全面、准确地反映石墨导热膜在实际场景中的真实散热性能,为后续设计方案的制定埋下隐患。

在器件热管理的实际应用中,导热膜的面积通常受限于器件结构尺寸,调整空间极小,相比之下,材料本身的热导率与膜层厚度具有更大的优化潜力,二者共同决定了导热膜的散热效能。具体而言,高面内热导率的优势在于能快速将热源产生的热量在膜材平面内扩散,从而有效降低热点温度、提升整体温度均匀性;而厚度则直接关联热阻大小、热容量与机械柔性,对散热效果和工程适用性产生双重影响。

单一追求高热导率或特定厚度均非最优解。只有精准掌握热导率与厚度的协同规律,明确不同组合下的实际散热效能,才能针对具体应用场景中的空间约束、热负荷分布及温升要求,设计或筛选出最优散热方案——既避免因性能不足导致的热管理失效,又防止因性能过剩造成的成本浪费与设计风险。这也凸显了建立科学评估方法、厘清热导率与厚度耦合机制的重要性。

因此,针对面积较大的散热膜覆盖在面积较小的热源上这一典型应用场景,提出“热流因子”作为评估散热效果的关键参数。采用有限元模拟方法,建立了“导热膜-器件”系统的仿真模型。通过改变导热膜的面内热导率及厚度,研究了两者对稳态后器件表面温度和散热膜温度分布的影响,并验证了热流因子衡量散热效果的合理性。

2 实验

2.1 热流因子的定义

考虑一个典型的散热场景:一个面积较小的芯

片热源被一片面积较大的石墨导热膜覆盖。该系统主要包括3部分:热源(芯片)、石墨导热膜以及周围环境。热源工作时产生恒定的热流量 Q 。石墨膜的核心功能是导热,即利用其极高的面内热导率,将热源产生的热量快速在膜平面内扩散,从而降低热源区域的温度(热点消除),并使膜表面温度分布更加均匀(均热)。最终,热量通过石墨膜上、下表面与空气的自然对流换热散失到环境中。热量从热源注入石墨膜后,主要沿膜平面传导。根据傅里叶导热定律,在膜平面内,沿某一径向方向的热流量可表示为:

$$Q_1 = \Lambda \times A \times \nabla T \quad (1)$$

Q_1 为石墨传导的热流量, Λ 为石墨的面内热导率, A 为侧面积, T 为温度。在稳态下,下表面中心与边缘的温度接近线性关系:此时有 $A = h \cdot w$, $\nabla T = \Delta T / \Delta w$, w 为散热膜宽度, h 为散热膜厚度。而此时热流量满足:

$$Q_1 = \Lambda \times h \times \Delta T \approx \Lambda \times h \times (T_{\text{center}} - T_{\text{edge}}) \quad (2)$$

T_{center} 为热源中心的温度, T_{edge} 为导热膜边缘温度。而系统达到稳态后唯一的散热途径为向空气对流换热,有:

$$Q_2 = h_c \times (T_{\text{surf}} - T_{\text{env}}) \quad (3)$$

Q_2 为向空气发散的热流, h_c 为对流换热系数, T_{surf} 为散热膜表面温度, T_{env} 为环境温度。由此可见,在石墨散热膜的面积远大于热源、厚度远小于热源的情况下,厚度与面内热导率对散热起着同样的作用,故将 $\Lambda \cdot h$ 定义为热流因子。热流因子增大时,下表面温度梯度下降。由式(3)可知,在热源功率一定时,若导热膜表面积一定,则其表面平均温度亦为定值。因此,更低的温度梯度意味着更高的最低温度与更低的最高温度,而导热膜最高温度即为器件表面温度,故更大的热流因子带来更好的散热效果。且在厚度较薄的情况下,相同热流因子的散热膜即使具有不同面内热导率,其温度分布也应基本一致,如图1所示。

2.2 仿真散热模型的建立

装有导热膜散热的器件的散热流程如下:器件工作产热,热量传至导热膜,导热膜通过与空气对流换热散出热量,其温度随时间逐渐上升,直至对流换热散热量与器件产热相等,系统达到稳态。采用COMSOL构建3D热传导-对流耦合模型,结构建模及网格划分如图2a所示。初始模拟中,器件尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,导热膜尺寸为 $40 \text{ mm} \times$

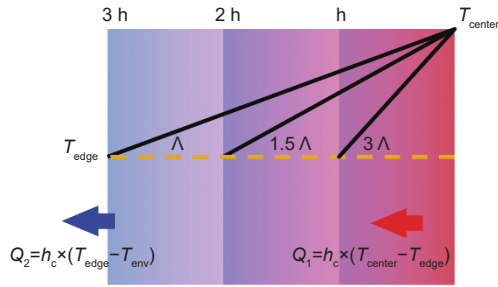


图1 热流因子对温度分布的影响

Fig. 1 The effect of heat flux factor on temperature distribution

40 mm × 0.1 mm, 器件紧贴散热膜下表面正中心, 使用功率为 5 W 的器件作为热源。石墨导热膜的面间热导率设为 $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[12]。为证明热流因子对衡量散热能力方面的普适性, 设定范围大于实际热导率分布范围, 因此在模拟时使面内热导率在 $100 \sim 5000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 范围内变化。将热源的底面和 4 个侧面设为绝热壁面, 散热膜所有面的边界条件设为换热系数 $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、环境温度 293 K 的对流换热。系统达到稳态后的温度分布如图 2b 所示, 散热系统的最高温度位于热源中心区域; 基板温度分布不均匀, 热量由中心向周边传递, 金属基板的 4 个角落温度最低; 上下表面温度无显著差异; 侧面温度较低, 散热量较小, 因此在厚度较薄时, 前述二维假设基本适用。

3 结果与讨论

3.1 面内热导率对温度分布的影响

通过截取一条位于导热膜下表面经过热源中

心且与边界平行的线来显示下表面的温度分布情况。

不同面内热导率对温度分布的影响如图 3 所示, 图中距离为 0 处的温度即为器件下表面中心温度。由图 3a 可见使用高面内热导材料对散热效果有显著提升。面内热导率从 200 提升至 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 会使器件温度降低 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与前述分析一致的是, 更高的面内热导率带来了更高的最低温度与更低的最高温度, 起到了更好的均热效果(图 3b)。值得注意的是, 面内热导率越高, 增加面内热导率带来的散热效果提升越微弱。这是由于热流相同且厚度一定时, 热导率与温度梯度呈反比关系, 热导率越大对温度梯度的影响反而更小。

3.2 厚度对散热效果的影响

在导热膜上表面相同位置截取一条线, 研究其厚度对散热效果的影响。石墨导热膜的常用厚度是 $50/70/100 \text{ }\mu\text{m}$, 通过堆叠方法石墨的厚度可以达到 $200 \sim 350 \text{ }\mu\text{m}$, 所以仿真时取 $50/100/200/500 \text{ }\mu\text{m}$, 覆盖实际使用的厚度范围。如图 4 所示, 厚度对散热效果的影响与面内热导率的影响类似: 厚度越大散热效果越好, 当厚度增加到一定水平后再增加厚度对散热效果的提升会显著减弱。与面内热导率不同的是, 厚度增加还意味着表面积的增加: 随着导热膜厚度的增加, 其侧面积(垂直于膜面的四个侧面)随之增大。石墨在面内方向因定向排列而具有极高的热导率, 而在面间方向因层间仅靠弱范德华力结合, 热导率极低, 当膜厚较薄时面间热阻极

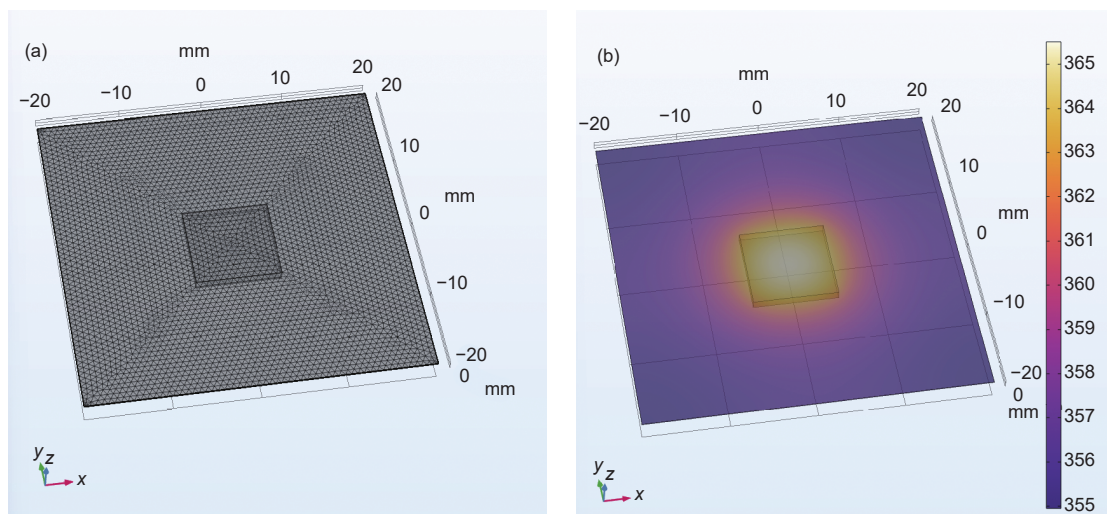


图2 散热系统 3D 几何模型与网格离散化结果: (a) 散热系统的 3D 几何结构与网格离散化模型, (b) 对应的稳态温度分布

Fig. 2 3D Geometric model and mesh discretization of the heat dissipation system. (a) 3D geometry and mesh discretization of the heat dissipation system, and (b) its corresponding steady-state temperature distribution

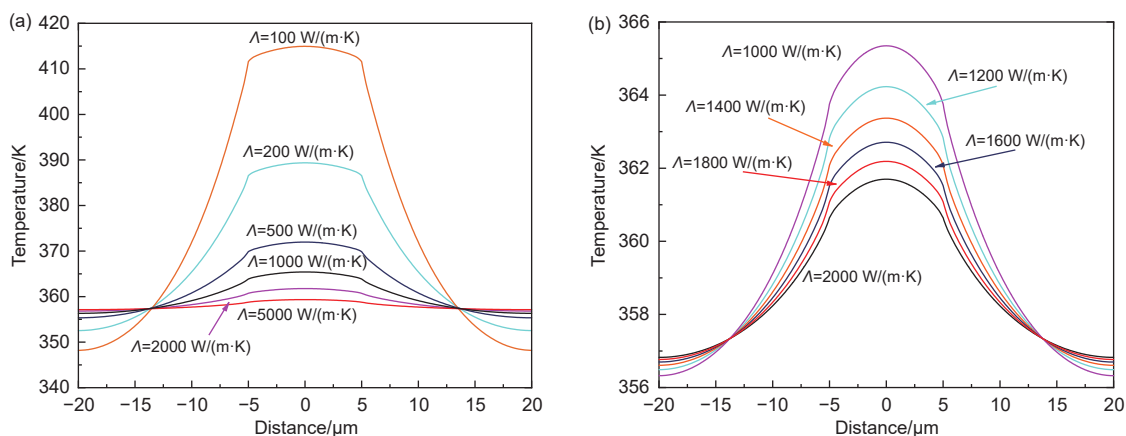


图3 厚度为100 μm的导热膜下表面温度分布: (a) 面内热导率: 100~2000 W·m⁻¹·K⁻¹ 与 (b) 面内热导率: 1000~2000 W·m⁻¹·K⁻¹.
Fig. 3 Temperature distribution on the lower surface of 100-μm-thick thermal conductive films. (a) In-plane thermal conductivity: 100–2000 W·m⁻¹·K⁻¹. (b) In-plane thermal conductivity: 1000–2000 W·m⁻¹·K⁻¹

大, 热量主要沿面内扩散, 可视为 2D 导热问题。当厚度较小时, 侧面积占比可忽略; 但当厚度达到毫米级 (如 ≥1 mm) 时, 侧面积不可忽略, 对流散热面积增大, 从而使得基于 2D 假设的热流因子模型不再适用。导热膜较厚时在增大厚度会带来与空气的接触面积显著提升, 进而导致最高温度与最低温度的同时下降。此外, 厚度较大时石墨的低面间热导率会导致 Z 轴方向有明显的温度梯度, 导致上下表面温度分布出现显著差异。但这两种异常情况均由远超实际散热膜厚度的厚度设定引起, 而本文主要研究厚度 100 μm 左右的散热膜, 在图 3 中也表现出了与预测类似的结果, 因此可认为前述的几点假设成立。

3.3 热导率与厚度协同效应对散热的影响

为研究热导率和厚度对整体散热效果的影响, 采用 500, 1000, 2000 W·m⁻¹·K⁻¹ 3 个面内热导率改变厚度进行模拟并提取热源表面最高温度如图 5a 所示。与之前分析一致的是, 厚度越大增大厚度对散热效果的提升越小。将此图的结果以热流因子的形式提取到图 5b。如图所示, 在厚度较低时, 具有相同热流因子与不同热导率和厚度的散热膜有一致的散热效果。热流因子与器件表面温度呈负相关关系, 即随着热流因子增大, 器件表面温度逐渐降低, 但降低趋势逐渐减缓。热流因子较大时细微的差距主要由厚度较大带来的侧面散热面积增大所致。

3.4 热流因子的等效性验证

相同热流因子不同厚度导热膜与面内热导率下的温度分布如图 6 所示。可见, 具有相同热流因子的散热膜有着相近的温度梯度, 再次证明了前述

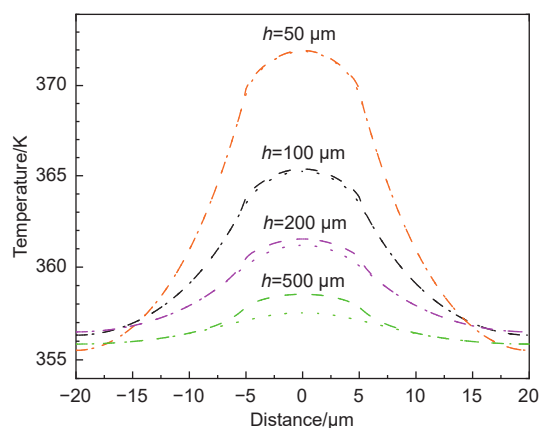


图4 不同厚度下散热膜正反两面的温度分布。划线为上表面温度, 点线为下表面温度

Fig. 4 Temperature distribution across the front and back surfaces of the thermal diffusion film at different thicknesses. Solid lines represent the temperature of the upper surface; dashed lines represent the temperature of the lower surface

假设的正确性。由于侧面散热的原因, 厚度增大会使整体温度降低, 体现在图中就是厚度越大越向下偏移。当侧面面积增大到不再远小于上下表面面积时假设失效, 体现在图中就是散热膜厚度达到 1 mm 时整体温度分布已经显著偏低。

3.5 实验验证与分析

为了对前述有限元仿真所揭示的规律进行实证检验, 并进一步验证“热流因子”作为导热膜核心评价参数的有效性, 本研究设计并搭建了一套用于快速表征石墨薄膜面内导热性能的测试系统, 该测试方法参考了现有研究中对石墨烯高导热薄膜散热性能的测量思路^[22]。该系统的核心是一个温度可控的透明箱体, 内部放置有固定尺寸的样品底座。测试时, 将裁剪好的石墨膜样品置于底座上,

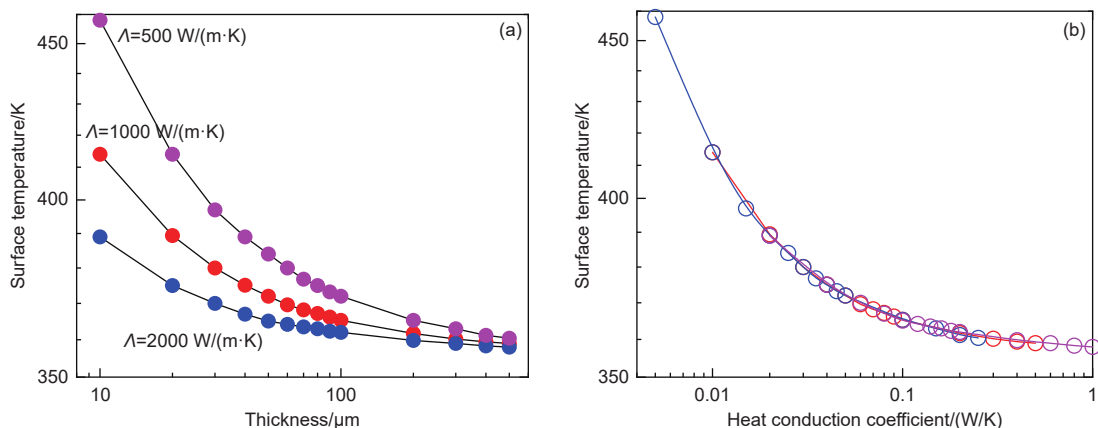


图5 (a) 使用不同热导率与厚度的导热膜稳定后器件表面的温度变化与 (b) 使用不同热流因子的导热膜稳定后器件表面的温度变化

Fig. 5 (a) Temperature variation at the device surface after stabilization using thermal interface materials of different thermal conductivities and thicknesses.

(b) Temperature variation at the device surface after stabilization using thermal interface materials with different thermal flow factors

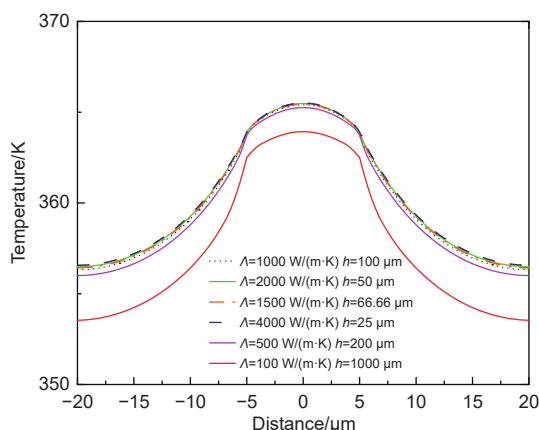


图6 相同热流因子下散热膜背面的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the back surface of heat dissipation films under the same heat flux factor

在其中心区域安放一个模拟芯片发热的加热块,并在加热块上以及距离加热块一定位置的石墨膜远端分别布置高精度热电偶用于温度监测。系统外接可编程加热电源提供稳定热负荷,热电偶信号由数据采集仪接收,并最终传输至计算机进行实时记录与处理(测试治具示意图见图7)。

测试过程中,在加热电源上设定与典型移动设备(如手机)功耗相近的功率档位,例如3与5 W。热量从加热块传导至石墨样品,通过采集系统记录加热块温度(近似热源温度, T_0)和远端测温点温度(T_{cold} , T_1 和 T_2 的平均值)随时间的变化。当系统达到热稳态(通常以持续加热约30 min后温度波动小于1%为准)时,计算热源与远端之间的温差($\Delta T = T_0 - T_{\text{cold}}$)。此温差 ΔT 直观地反映了石墨膜将热量从热点扩散开的能力:在相同输入功率下, ΔT 越小,表明膜的面内导热性能越好,热量扩散越均匀,

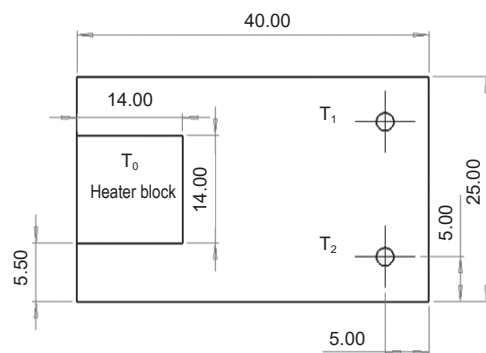


图7 快速表征石墨膜导热性能的测试治具示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the test fixture for rapid characterization of graphite film thermal conductivity

散热效果越佳。应用该测试方法,对一系列不同厚度与标称热导率的商用石墨膜样品进行了测量,涵盖了从较薄(17 μm)到较厚(100 μm),热导率从约1400到超过 $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 的多种组合。所有测试样品的规格参数、计算得到的热流因子($\lambda\cdot A$),以及在3和5 W输入功率下测得的稳态温差数据均汇总于表1,石墨规格中“-”前为标称石墨厚度,“-”后数字为标称热导率。可观察到温度差随热导率和厚度的增加而降低,这与其它研究中通过不同工艺制备的复合散热材料所观察到的规律相符^[23-25]。

对表1中的实验数据进行深入分析,可清晰地观察到热流因子与散热性能的强关联性。随着热流因子($\lambda\cdot h$)的增大,无论是在3 W还是5 W功率下,测得的稳态温差(ΔT)均呈现单调下降趋势。例如,当热流因子从约 $0.0253 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ (实验序号1)增加至约 $0.166 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}$ (实验序号20)时,3 W功率下的温差从 $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $6.7 \text{ }^\circ\text{C}$,5 W功率下的温差从 51.0 降至 $17.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这一趋势与有限元模拟的结

表 1 不同石墨厚度、不同热导率的热流因子和 3 W/5 W 功率下的温差性能

Table 1 Heat flux factors and ΔT (3 W/5 W) for graphite films with varied thicknesses and thermal conductivities

No.	Graphite specification	Thickness/ (μm)	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Thermal flux factor/ ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)	Temperature difference at 3 W Power/($^{\circ}\text{C}$)	Temperature difference at 5 W Power/($^{\circ}\text{C}$)
1	17 μm -1400	18	1405	0.0253	22.8	51.0
2	25 μm -1400	23	1439	0.0331	20.0	45.6
3	17 μm -1800	19	1776	0.0337	19.3	46.0
4	32 μm -1400	30	1383	0.0415	16.9	43.0
5	25 μm -1800	24	1779	0.0427	16.8	41.2
6	40 μm -1400	35	1385	0.0485	15.1	37.5
7	32 μm -1800	29	1824	0.0529	14.6	36.3
8	40 μm -1800	39	1756	0.0685	12.4	31.0
9	50 μm -1400	46	1493	0.0687	12.4	29.9
10	40 μm -2000	41	2045	0.0838	10.6	27.4
11	50 μm -1800	48	1771	0.0850	10.5	26.5
12	60 μm -1400	61	1460	0.0891	10.4	25.3
13	70 μm -1400	68	1435	0.0976	9.5	24.2
14	80 μm -1400	76	1428	0.1085	8.9	22.5
15	60 μm -1800	62	1880	0.1165	8.8	22.4
16	60 μm -2000	57	2077	0.1183	8.7	22.2
17	70 μm -1800	68	1851	0.1259	8.2	20.9
18	100 μm -1400	96	1348	0.1294	8.1	19.9
19	70 μm -2100	67	2113	0.1416	7.6	18.6
20	100 μm -1800	88	1886	0.1660	6.7	17.4

注: 石墨规格中“-”前为标称石墨厚度,“-”后数字为标称热导率。

Note: In graphite specifications, the number before the “-” indicates the nominal graphite thickness; the number after the “-” represents the nominal thermal conductivity.

论高度一致,有力地证明了热流因子是决定散热膜最终散热效能的一个关键综合性参数。此外,对比具有相近热流因子但厚度与热导率组合不同的样品,其散热性能表现出高度一致性。例如,序号 2(25 μm -1400, 热流因子 0.0331 $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)与序号 3(17 μm -1800, 热流因子 0.0338 $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)的热流因子非常接近,它们在 3 和 5 W 功率下测得的温差也极为相近(20.0 $^{\circ}\text{C}$ vs. 19.3 $^{\circ}\text{C}$; 45.6 $^{\circ}\text{C}$ vs. 46.0 $^{\circ}\text{C}$)。同样,序号 8(40 μm -1800, 热流因子 0.0685 $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)与序号 9(50 μm -1400, 热流因子 0.0687 $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)也表现出几乎相同的散热性能。以热流因子为变量绘制温差随热流因子变化的关系,如图 8 所示,相同热流因子的石墨膜具有几乎相同的温差,曲线的趋势与图 4 的模拟结果高度符合。该现象验证了前述理论分析与数值模拟的核心论点:在薄型散热膜的应用场景下,厚度与面内热导率对散热效果的贡献在一定范围内是等效的,可通过热流因子这一单一参数进行有效表征和比较。

实验数据同样揭示了性能增益的饱和现象。当热流因子较小时,其数值的微小提升能带来温差(ΔT)的显著降低,即散热性能的明显改善。然而,随着热流因子持续增大,单位热流因子提升所带来

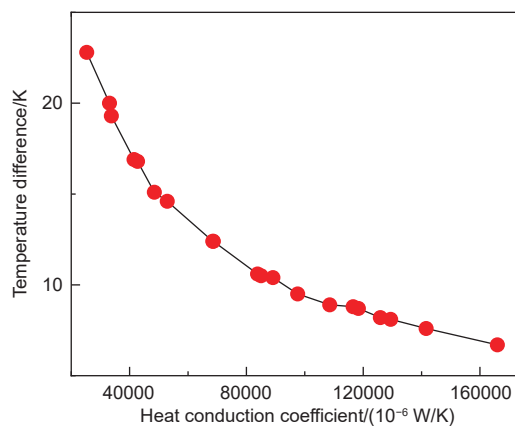


图 8 不同热流因子的石墨膜与温差之间的关系实验测试结果

Fig. 8 Experimental test results of the relationship between the temperature difference and graphite films with different thermal flow factors

的温差减小幅度逐渐变缓。这表明存在一个性能增益的“平台期”或“饱和点”,超过此点后,继续通过增加厚度或追求极高热导率来提升热流因子,所带来的散热收益将变得十分有限,不符合成本效益原则。这一发现为散热膜的优化选型提供了重要边界,提示设计者应避免盲目追求超高参数。对比 3 与 5 W 功率下的数据可看出,在相同热流因子下,更高的输入功率会导致更大的稳态温差。这说明散热膜

的工作效能与热负荷密切相关。然而,热流因子与温差之间的负相关关系在不同功率水平下均稳定存在,进一步证明了该参数在不同工况下的适用性和鲁棒性。

综合分析这些实验验证结果,可以明确得出以下结论:本文提出的“热流因子”(面内热导率与厚度的乘积)能够有效地整合散热膜的两个关键设计变量,作为评价其面内散热能力的核心指标。实验数据不仅证实了有限元模型的预测准确性,也强化了“在薄型散热膜中,相同热流因子意味着相近散热性能”这一等效性原则的实践价值。这为电子设备热设计工程师在有限的空间和成本约束下,快速筛选、比较和优化散热膜方案提供了简洁而有力的理论依据和实用工具。通过瞄准目标热流因子,设计师可以灵活地在不同的厚度与导热率组合中进行选择,从而实现散热性能、空间占用、机械柔性及成本之间的最佳平衡。

4 结论

通过有限元模拟揭示了导热膜的热导率与厚度对散热效果的影响规律,并提出了一个表征散热膜导热性能的关键的参数:热流因子。结果表明在导热膜面积远大于热源、厚度约 100 μm 时,热流因子直接决定了散热效能。其增大可显著降低热源最高温度并提升温度均匀性,且相同热流因子下不同热导率与厚度组合的散热效果基本等效。当厚度过大(如 1 mm)时,侧面散热面积及面间热阻的影响增强,导致二维假设失效,温度分布偏离预测值。提高热流因子可显著改善散热,但超过阈值后增益显著减弱,需避免盲目增加厚度或追求超高导热率导致的资源浪费。热流因子为散热膜选型与热设计提供了量化依据,在保证轻薄化的前提下,可通过优化热导率与厚度的组合实现高效散热。未来的研究可进一步结合新型石墨/石墨基散热膜^[26-29]、柔性复合膜^[30-31]等多尺度构效关系^[32],拓展热流因子在更先进、更复杂热管理场景中的应用。

参考文献

- [1] Li G Y, Zhang J H, Gao J X. A review on heat dissipation of high-power power electronic devices[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(11): 8-14.
- [2] Guo L. Research on the current development status of heat dissipation and cooling for electronic devices[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2014, 42(02): 62-66.
- [3] Yin H B, Gao X N. Current status and progress in heat dissipation technologies for electronic devices[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2013, 40(04): 67-68.
- [4] Zhou J, Li B W. Physical issues in heat dissipation processes for micro/nano electronic devices[J]. *Physics*, 2013, 42(02): 89-99.
- [5] Hao G X, Guo H M, Gao P. Thermal design methods for power devices[J]. *Electronic Engineer*, 2005, (11): 22-23+33.
- [6] Wang L, Wei X G, Tang X L, et al. A Review of thermal design for power device packaging structures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(07): 2748-2774.
- [7] Shen Q. Research on heat dissipation of led devices under natural convection conditions[D]. Zhejiang University, 2012.
- [8] Sun Z P, Ma C, Wang J T, et al. Novel thermal interface materials based on mesocarbon microbeads with a high through-plane thermal conductivity[J]. *New Carbon Materials*, 2025, 40(2): 422-437.
- [9] Qi W S. Application Research on graphite as a thermal management material for mobile phones[J]. *China Strategic Emerging Industry*, 2022(33): 148-150.
- [10] Li H L, Xiao S N, Yu H L, et al. Research progress on graphene heat dissipation films (in English)[J]. *New Carbon Materials*, 2021, 36(05): 897-910.
- [11] Zhang Y, Liu J Y. Applications of graphene in heat dissipation and thermal management[J]. *Electronic Components and Materials*, 2017, 36(09): 88-93.
- [12] Murakami M, Tatami A, Tachibana M. Fabrication of high quality and large area graphite thin films by pyrolysis and graphitization of polyimides[J]. *Carbon*, 2019, 145: 23-30.
- [13] Zhang Q, Wei Q, Huang K, et al. Defects boost graphitization for highly conductive graphene films[J]. *National science review*, 2023, 10(7): nwad147.
- [14] Hao Y, Ming X, Lu J, et al. Bidirectionally high - thermally conductive and environmentally adaptive graphene thick films enabled by seamless bonding assembly for extreme thermal management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(29): 2400110.
- [15] Zheng H, He P, Yang S, et al. Thermally conductive graphene-based films for high heat flux dissipation[J]. *Carbon*, 2025, 233: 119908.
- [16] Zhao L, Chen Z, Hu S, et al. Ultrahigh through-plane thermal conductivity of graphite by reducing inter-plane twist[J]. *Matter*, 2025.
- [17] Slack G A. Anisotropic thermal conductivity of pyrolytic graphite[J]. *Physical Review*, 1962, 127(3): 694.

- [18] Hooker C N, Ubbelohde A R J P, Young D A. Anisotropy of thermal conductance in near-ideal graphite[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*, 1965, 284(1396): 17-31.
- [19] Taylor R. The thermal conductivity of pyrolytic graphite[J]. *Philosophical Magazine*, 1966, 13(121): 157-166.
- [20] Shen K, Ren Q, Zhao L, et al. Point defects enhance cross - plane thermal conductivity in graphite[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): 2418569.
- [21] Fugallo G, Cepellotti A, Paulatto L, et al. Thermal conductivity of graphene and graphite: collective excitations and mean free paths[J]. *Nano letters*, 2014, 14(11): 6109-6114.
- [22] Tang Y Q, Hu L, Tang Q R, et al. Research progress on graphene and its composites in thermal management[J]. *Modern Chemical Research*, 2025(08): 20-29.
- [23] Xia X Y, Ye X C, Chen Y Z, et al. Analysis of heat dissipation characteristics of graphene composite materials[J]. *Electronic Technology*, 2023, 52(04): 258-259.
- [24] Zhong L, Guo L, Wang J, et al. Excellent heat transfer and mechanical properties of graphite material with rolled-up graphene layers[J]. *Carbon*, 2023, 208: 123-130.
- [25] Ban T, Pan Z L, Chen L. Research on Heat Dissipation Methods for Three-Dimensional Integrated Circuits Using Graphene Thermal Conduction Layers[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2018(05): 99-101.
- [26] Zhou Z F, Zhong Y Y, Hua W, et al. Research on measurement methods for heat dissipation performance of high thermal conductivity graphene films[J]. *Metrology & Testing Technique*, 2024, 50(12): 16-19.
- [27] Chen X G, Feng L, Lei B, et al. Research on heat dissipation performance of graphite-aluminum based composite materials[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2025, 41(05): 74-78.
- [28] Dong J X, Zhao H, Zhou Y. Analysis of the effect of graphite film on metal aluminum heat dissipation structure[J]. *Mechanical Engineer*, 2017(04): 136-137.
- [29] Song J C, Wang D B. Study on heat dissipation performance and model of heat sink coated with graphene film[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(08): 1185-1192.
- [30] Yan X. Preparation and properties of high-quality graphene oxide-based heat dissipation films[D]. China University of Petroleum (Beijing), 2024.
- [31] Wang Z T, Wang H, Yin J Y, et al. Preparation and thermal conductivity study of aramid flexible graphite heat dissipation films[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2023, 51(03): 112-116.
- [32] Li Z R. Research on the multi-scale structure-performance relationship of graphene heat dissipation films[D]. Shanghai University of Engineering Science, 2022.

A new parameter, heat conduction coefficient, for assessing the thermal conductivity of graphite films

Guo Zhijun^{1,2,3}, Guo Mengchuan¹, Sun Bo^{1,3}, Chen Renzheng²,
Yang Lanhe², Cheng Huiming^{4,*}

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, 518055, China;

2. Suzhou Kanronics Electronic Technology Co., Ltd., Suzhou 215155, China;

3. Guangdong Key Laboratory of Thermal Management Engineering and Materials, Shenzhen 518055, China;

4. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: An evaluation of the thermal performance of graphite films used for electronic device cooling suggests using the heat conduction coefficient (thickness \times in-plane thermal conductivity) as the core evaluation indicator. By establishing a thermal conductive film-device finite element model, the study investigates the factors that influence the in-plane thermal conductivity and thickness of graphite thermal conductive films on cooling performance. Simulations indicate that when the thickness of the graphite film is $\leq 100 \mu\text{m}$, the in-plane thermal conductivity and thickness have equivalent effects on cooling performance. Using the same conduction coefficient, the temperature distribution is basically the same for different combinations of in-plane thermal conductivity and thickness, while increasing the conduction coefficient significantly reduces the surface temperature of the device. When its value is too high, the gain in cooling performance decreases sharply and when the thickness exceeds 1 mm, there are changes in perpendicular thermal resistance and convective area, breaking the two-dimensional assumption. Experiments confirm that the heat conduction coefficient can effectively guide the selection of thermal conductive films, providing a theoretical basis for the thermal design of electronic devices.

Key words: Graphite thermal film; Thermal conductivity; Heat conduction coefficient; Finite element simulation; Thin type graphite

Corresponding author: Cheng Huiming, Professor.

First author: Guo Zhijun.