

专题: 热传导及其相关交叉领域研究

悬空透明二维热整流器件的热反射
温度场测量方法*郭立本 谢思齐 刘智珂 丁文扬 王海东[†] 曹炳阳[‡]

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

(2026 年 4 月 17 日收到; 2026 年 5 月 13 日收到修改稿)

高效热管理是提升电子器件性能与可靠性的关键, 热整流器件因可主动调控热流方向而备受关注, 其中二维材料展现出独特优势. 现有实验多采用悬空电极法, 仅能测量空间平均的热整流比; 反射热成像技术虽可实现高分辨率的温度场测量以揭示局域热输运行为, 但在透明二维样品中, 热反射信号受到下方衬底反射光干扰, 致使样品的本征温度场无法提取. 针对上述问题, 本文提出一种改进的热反射温度场测量方法, 其核心是通过双电极加热实现样品的独立温度控制以进行信号标定, 进而解耦透明样品与衬底的混合热反射信号, 获取样品的本征温度场. 以三角形 WSe_2/PMMA 复合样品为例, 测量获得正向与反向热流条件下的二维温度分布, 并与纯 PMMA 悬空样品进行对比分析. 结果表明, 该器件的热整流效应主要源于形状不对称性与材料热导率温度依赖性的协同作用. 其中, 几何不对称提供了热流调控的结构基础, 而 WSe_2 热导率的温度依赖特性进一步放大了正反向热流条件下的等效热导率差异. 该方法为悬空透明二维材料的热输运机理研究提供了有效的实验表征手段, 并为热整流器件的结构设计与性能优化奠定了重要方法基础.

关键词: 热整流, 二维材料, 温度场表征, 反射热成像**DOI:** 10.7498/aps.75.20260538**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260538

1 引言

随着芯片特征尺寸的持续缩小及功率密度的不断提升, 高效热管理已成为影响其性能与可靠性的关键问题^[1-6]. 类似电二极管、热整流 (thermal rectification, TR) 器件能够实现热流方向的主动调控, 因此被视为下一代热管理系统的重要组成部分^[7-10]. 在众多候选材料中, 二维材料因其与现代电子器件良好的兼容性而备受关注. 一方面, 二维材料具有高载流子迁移率和栅极可调性, 使其易于实现器件集成; 另一方面, 其结构灵活

性使其能够实现高效热整流所需的几何非对称设计, 从而展现出重要的应用潜力^[11-16], 并已在热整流研究中得到广泛应用^[17-19]. 因此, 对热整流器件的热输运行为的准确表征是实现其性能优化的关键.

在热整流器件的实验表征中, H 型测试方法 (两个平行悬空电极作为加热器和温度计, 中间连接待测二维样品, 整体形似字母 H) 被广泛采用^[20-24]. 该方法通过测量固定热流条件下器件整体的温差来获取热整流比, 具有结构简单、易于实现等优点. 然而, 该方法本质上将热整流器视为一个整体平均系统, 只能获得空间平均的热整流值, 无法揭示热

* 国家自然科学基金 (批准号: 52327809, 52425601)、国家重点研发计划 (批准号: 2023YFB4404104) 和北京市自然科学基金 (批准号: L233022) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hdwang@tsinghua.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: caoby@tsinghua.edu.cn

整流的局域起源,而热整流现象本质上源于结构内部非对称的热输运行为^[25-27].温度场作为热输运的关键表征量,其空间分布直接反映了热流路径上各点的热阻特性.在几何非对称结构中,由于热流截面积的渐变以及材料热导率可能存在的温度依赖性,温度梯度沿热流方向必然呈现非均匀分布.因此,仅仅获得整体的温差值,无法区分几何效应与本征材料非线性效应对热整流行为的相对贡献,只有获取二维器件表面精细的温度分布,才能将实验观测与理论预测进行空间定量比对,从而深入揭示热整流的物理机理.近年来,研究者日益认识到空间分辨的温度场测量对于理解低维材料热输运行为的关键意义^[28-31].

反射热成像 (thermoreflectance imaging, TRI)^[32,33] 技术为实现高空间分辨率的温度分布测量提供了可行途径.该技术利用材料反射率与温度之间的线性关系,实现对样品表面温度场的非接触测量,具有高分辨率和快速成像等优势.然而,作为一种光学测量方法,其应用于悬空透明二维样品时面临根本性困难:由于二维材料仅原子级厚度,对入射光的反射极弱,大部分光穿透样品并被下方衬底反射,导致传感器采集到的信号中衬底反射占主导地位.此时,探测到的反射光信号实际包含样品本身的反射光与透过样品后的衬底反射光,两者相互耦合,使得二维材料本征的热反射信号被衬底响应所掩盖.这一固有耦合导致无法直接从反射率信号中提取样品的真实温度分布,从而严重限制了反射热成像在透明二维材料热学研究中的应用.

针对上述问题,本文提出了一种用于悬空透明二维材料高空间分辨率温度场测量的反射热成像改进方法.该方法的核心在于利用悬空电极独立控制样品相对于衬底的温度变化,从而通过标定过程实现样品信号与衬底信号的解耦分析,有效消除衬底干扰,重构二维样品的本征温度分布.基于该方法,本文以 WSe₂/PMMA 三角形样品为研究对象,系统测量了其在正、反向热流下的二维温度分布,并结合纯 PMMA 样品对照实验,揭示了形状不对称与材料热导率温度依赖性的协同整流机制.本工作为悬空透明二维材料的热输运研究提供了有效的实验表征手段,并为热整流器件的机理验证与性能优化提供了方法支撑.

2 悬空透明二维材料反射热成像表征方法

2.1 材料透明对悬空二维材料反射热成像的影响

反射热成像测温的基本原理基于材料的反射率与温度的函数相关性关系.当光束照射材料表面时,会发生反射信号,而当材料的温度发生变化时,其光学反射率会随之发生变化^[34,35].在一定温度变化范围内(如<60 K),反射率的相对变化值与温度变化之间的关系可近似为一阶函数:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \right) \Delta T = C_{TR} \Delta T, \quad (1)$$

其中, C_{TR} 表示反射率温度系数,取决于材料种类、入射光波长等多种因素.

对于悬空透明二维样品,在光照射到材料表面后,部分光线会穿透二维样品并入射到下方一定距离处的衬底,衬底的反射光与二维样品本身反射出来的光重叠(图1),因此测量所得到的反射率信号包含了二维样品本身与衬底的混合贡献,即 $R = R(R_{sam,1}, R_{sam,2}, R_{sub})$.这种固有的耦合导致二维样品的信号被衬底的热反射响应所掩盖.在分析中具体而言,忽略空气和二维样品的吸收,同时考虑到二维材料的原子级的厚度,其对整体光学性质的影响极小,将样品两面反射率视为相同,即 $R_{sam,1} = R_{sam,2}$, 记为 R_{sam} , 此时当样品或衬底的反射率随温度发生变化时,所测得的反射率信号场可近似线性表示为

$$R = R(R_{sam}, R_{sub}) = R_0 + \frac{\partial R}{\partial R_{sam}} \Delta R_{sam} + \frac{\partial R}{\partial R_{sub}} \Delta R_{sub}, \quad (2)$$

其中, R_0 为参考状态下反射率信号.本文中,参考状态定义为室温下整个被测器件(包括二维样品及衬底)所处时的状态.将热反射关系(1)式代入(2)式,可重新整理为

$$\begin{aligned} \frac{R - R_0}{R_0} &= \frac{\partial R}{\partial R_{sam}} \frac{R_{sam}}{R_0} C_{TR,sam} \Delta T_{sam} \\ &+ \frac{\partial R}{\partial R_{sub}} \frac{R_{sub}}{R_0} C_{TR,sub} \Delta T_{sub}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 R_{sam} , R_{sub} 分别为工作波长下样品和衬底的本征反射率, $C_{TR,sam}$, $C_{TR,sub}$ 为对应的反射率温度系数.分析(3)式可知,反射热成像系统所测得的信

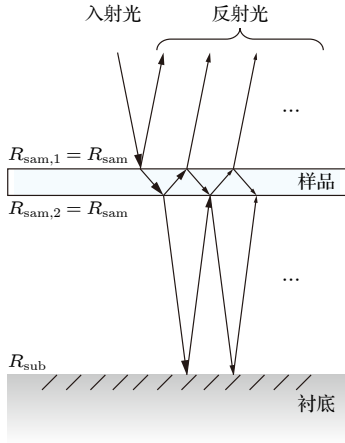


图1 衬底对悬空透明二维样品的热反射信号影响

Fig. 1. Substrate's influence on thermoreflectance signal of suspended transparent 2D sample.

号由样品温度与衬底温度共同决定,且二者温度依赖关系同时包含有总反射信号 R 的偏导项,因此二维材料样品热信号与衬底反射热信号相互耦合。

2.2 热反射信号解耦的透明材料表征方法

针对二维样品与衬底热反射信号耦合问题,本文提出了一种专门用于悬空透明二维样品温度场测量的改进型反射热成像方法.整体流程如图2所示4个关键步骤。

1) 悬架金电极电阻温度系数 (temperature coefficient of resistance, TCR) 的标定: 在两个材质、尺寸一致的微电极下方刻蚀衬底形成悬架区域,将二维材料搭接于电极上方.将被测器件整体置于控温平台上,通过控温计算得到电极的电阻温度系数。

2) 双电极均匀加热与信号测量: 向两个电极通入加热电流,通过电阻温度系数和电阻的计算,控制两个电极温升为相同值,此时整个悬架二维材料都处于温度均匀状态.由于电极加热功率较低且悬空于下方的刻蚀面,衬底温升忽略不计.此时使用反

射热成像系统同步采集反射率信号场,记为 ΔR^{calib} .

3) 单电极非对称加热与信号测量: 与步骤2)类似,分别给单个电极施加加热电流,使二维样品产生局域非对称温升,并测定反射率信号场.为了方便区分,对于三角形样品将正向热流(从宽端流向窄端)和反向热流(从窄端流向宽端)条件下测得的反射率信号分别记为 ΔR^+ 和 ΔR^- .

4) 二维样品温度场解耦计算: 步骤2)和步骤3)获得的反射率信号相除,即可得到非均匀加热条件下二维材料表面的温度分布(式中矩阵运算均为逐元素运算):

$$\Delta T_{\text{sam}} = \frac{\Delta R^{+/-}}{\Delta R^{\text{calib}}} \cdot \Delta T. \quad (4)$$

在测量过程的步骤2)中,二维样品被电极均匀加热,产生温升 $\Delta T_{\text{sam}} = \Delta T$ 已知,而悬空二维样品下方为空气间隙,且衬底位于刻蚀区域底部,与恒温热沉紧密接触,因此悬空电极通过焦耳加热产生温升对下方衬底影响很小,衬底温度可认为保持不变(即 $\Delta T_{\text{sub}} = 0$).此时,(3)式中测得的反射率相对变化为

$$\frac{\Delta R^{\text{calib}}}{R_0} = \frac{\partial R}{\partial R_{\text{sam}}} \frac{R_{\text{sam}}}{R_0} C_{\text{TR,sam}} \cdot \Delta T. \quad (5)$$

而在步骤3)中,衬底同样没有温度变化($\Delta T_{\text{sub}} = 0$).该条件下采集到的信号为

$$\frac{\Delta R^{+/-}}{R_0} = \frac{\partial R}{\partial R_{\text{sam}}} \frac{R_{\text{sam}}}{R_0} C_{\text{TR,sam}} \cdot \Delta T_{\text{sam}}, \quad (6)$$

将(5)式与(6)式相除,即可消去两式中共有的耦合偏导项,从而得到(4)式给出的解耦温度关系。

3 实验对象及测量结果

3.1 样品制备

本工作制备并测试了PMMA上单层WSe₂样

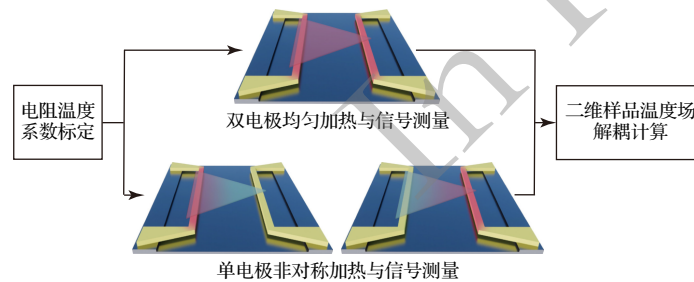


图2 测试流程

Fig. 2. Measuring procedure.

品与无二维材料的纯 PMMA 样品. 其制备过程主要包括 3 个步骤: 首先制备悬空电极结构, 通过电子束光刻和物理气相沉积技术在 SiO_2/Si 衬底上沉积两个平行的金电极 (长 $80\text{ }\mu\text{m}$ 、宽 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、厚 100 nm), 作为焦耳加热器与温度计. 随后, 利用反应离子刻蚀和 XeF_2 气体对电极下方的衬底进行选择性刻蚀, 使结构悬空. 其次, 制备 WSe_2/PMMA 样品. 在 WSe_2 /蓝宝石衬底上旋涂 300 nm 厚的 PMMA 薄膜. 然后, 将样品浸泡在 10% NaOH 溶液中 $1\text{--}3\text{ h}$, 使 WSe_2/PMMA 双层膜从蓝宝石衬底上剥离. 接着, 用去离子水彻底清洗, 以去除任何化学残留物. 最后, 将剥离的 WSe_2/PMMA 叠层转移到洁净的 SiO_2 衬底上, 以备后续处理. 最终, 利用集成在微操纵系统中的 MKS-15 微型刀具, 从 SiO_2 衬底上切割并剥离出一个 WSe_2/PMMA 三角形区域, 其形状为边长约 $45\text{ }\mu\text{m}$ 的等边三角形. 使用一对微探针 (TP-001, 尖端直径 $1\text{ }\mu\text{m}$) 将该分离的三角形区域机械转移至第 1 步制备的目标悬空电极结构上居中位置. 样品的最终结构如图 3 光镜图所示.

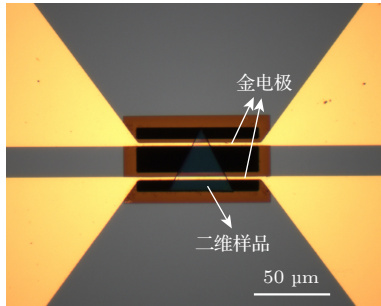


图 3 WSe_2/PMMA 样品光镜图

Fig. 3. Optical microscope image of WSe_2/PMMA sample.

3.2 温度场表征

首先, 根据实验流程, 分别对金电极的电阻温度系数及解耦反射率信号进行标定. 为了获得最佳信噪比, 我们预先在 $365\text{--}780\text{ nm}$ 的宽波段范围内对 WSe_2/PMMA 样品进行了热反射波长的系统筛选. 通过比较 8 个典型波长 ($365, 405, 455, 470, 530, 625, 656, 780\text{ nm}$) 在固定温升下的反射率变化, 发现 470 nm 蓝光具有最高的反射率温度灵敏度. 基于此, 全部标定及后续测量实验均在波长为 470 nm 的蓝光照明下开展. 所制备器件中, 金电极长度为 $80\text{ }\mu\text{m}$, 而三角形二维样品搭接于电极上的宽端宽度约为 $35\text{ }\mu\text{m}$. 由于实际电极无法实现均匀

温升, 其温度分布近似呈抛物型, 因此电极电阻仅反映其平均温度, 而二维样品搭接于电极中部, 其实际温度高于由电极电阻计算所得的温度值. 电极温度的非均匀性使得在解耦反射率信号标定过程中, 二维样品无法实现均匀温升, 从而对标定结果产生影响.

为解决上述因电极温度非均匀性带来的信号标定问题, 本文采用 COMSOL MultiphysicsTM 仿真软件对解耦信号标定过程中的温度分布进行模拟. 仿真中, 设置金电极两侧与衬底的接触面为恒温边界条件, 其温度值与实验中设定的热沉温度一致 ($25\text{ }^\circ\text{C}$); 其余表面均设为绝热边界条件. 金电极区域设置为体热源, 其发热功率由标定实验中获得. 将仿真所得的温度场矩阵与实测的反射率温度信号场逐像素对应, 并取平均得到单一数值, 用于后续非均匀加热条件下的温度计算. 值得补充说明的是, 仿真仅提供均匀加热条件下样品表面温升的空间分布权重, 本工作的核心结论: 正反向热流下温度梯度的不对称性及热整流效应, 均直接来源于实验测量的反射率信号及其比值, 仿真不引入额外的物理假设或主观偏见.

完成标定后, 对 WSe_2/PMMA 样品的单侧电极施加电流, 使其平均温升达到 20 K , 另一侧电极不施加电流, 此时测量反射率信号; 随后对调加热端, 重复上述测量, 从而分别获得正向热流与反向热流条件下样品的温度场. 金电极及其他区域的温度分布则由 (1) 式直接计算获得, 无需进行反射率温度系数解耦标定. 两部分区域的温度分布拼接结果如图 4 所示, 其中图 4(a), (b) 对应正向热流条件, 图 4(c), (d) 对应反向热流条件. 在两种热流条件下, 两电极之间的样品区域均表现出沿热流方向近似一维分布的温度下降, 与物理预期一致. 而在样品与电极的搭接区域附近, 由于样品转移过程中无法实现完全平齐的搭接, 该区域信号存在一定失真. 后续分析中, 将该部分信号予以舍弃, 仅取中心区域的均匀信号数据进行处理. 上述结果表明, 尽管透明样品的热反射信号同时受到样品与衬底二者的耦合干扰, 但采用本文所提出的解耦测试方法, 能够有效提取样品的本征热反射信号, 从而直接测量其二维温度场分布. 此外, 本解耦方法成立 (即 (5) 式与 (6) 式成立) 的前提是在均匀加热与非对称加热过程中衬底温度均保持无温度变化. 图 4

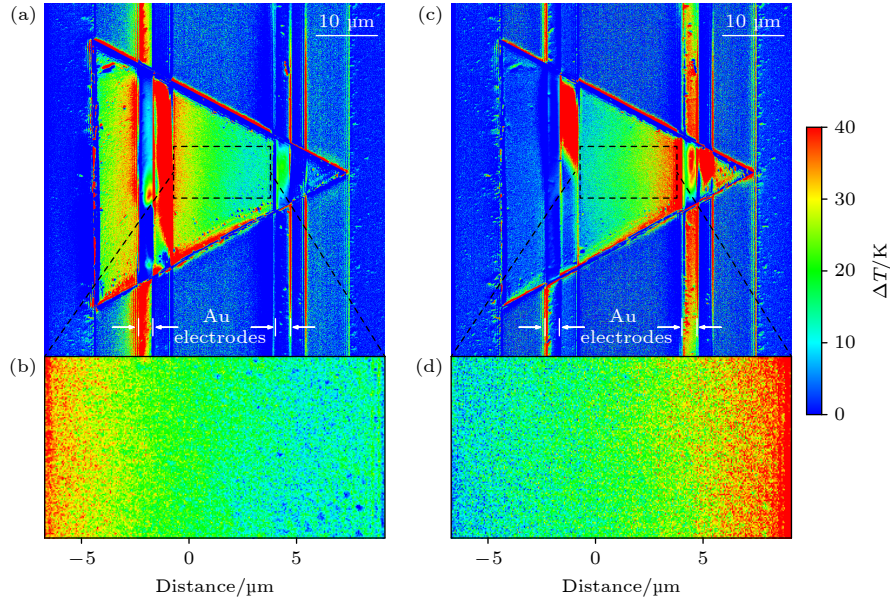


图 4 WSe₂/PMMA 样品温度场测量结果 (a), (b) 正向热流条件; (c), (d) 反向热流条件

Fig. 4. Temperature mapping of WSe₂/PMMA sample with: (a), (b) Forward direction heat flow; (c), (d) backward direction heat flow.

的实验测量表明, 在本实验条件下衬底温升小于 0.5 K, 其反射率变化可忽略; 两种加热状态下衬底反射率的温度依赖性对信号比值的影响可被有效排除. 因此, 所测得的反射率信号差值主要反映悬空二维样品自身的温度变化, 因衬底温升而导致的系统误差可忽略不计.

3.3 热整流分析

为了分析二维透明材料的热整流特性及其物理机制, 首先对测得的温度场进行一维分布提取, 如图 5 所示. 理论上, 当流经样品的总热流恒定时, 热流通道截面积的变化应导致温度梯度相应改变; 若不存在热整流效应, 则相同位置处正向与反向温度梯度的绝对值之比 $r(x) = \nabla T^+(x) / \nabla T^-(x)$ 应等于正向与反向热流之比 J^+ / J^- , 为一常数. 然而实测结果表明, 宽端处该比值 $r = 2.932 / 1.320 \approx 2.22$, 而窄端处 $r = 2.346 / 0.698 \approx 3.36$, 在样品两端显著不同. 这说明在相同热流比下, 不同位置的正反向温度梯度不对称程度存在差异, 正反两种热流条件下样品表现出不同的热输运行为, 这正是热整流效应的直接体现. 作为对照, 仅含 PMMA 的样品在正、反向热流下温度沿热流方向近似线性分布, 各位置处的温度梯度基本相等且对称, 其 $r(x)$ 近似为常数, 未表现出上述位置依赖性. 以上结果证实了 WSe₂/PMMA 样品中存在显著的热整流效应.

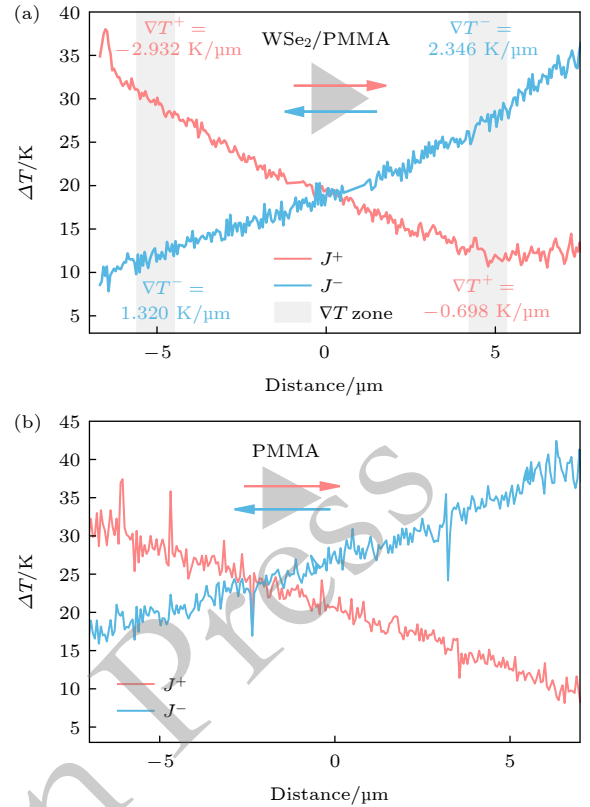


图 5 热流方向温度分布 (a) WSe₂/PMMA 样品; (b) PMMA 样品

Fig. 5. Temperature distribution: (a) WSe₂/PMMA sample; (b) PMMA sample.

进一步对热整流效应进行定量表征. 由于测试过程中金电极作为加热器, 其加热功率已知, 结合

仿真可以获得金电极向热沉导热的能量损失,从而得到流经样品的净热流.同时,利用反射热成像可直接测量金电极与样品接触区域的温度,由此计算器件的等效热导率,并定义热整流比.在本实验中,得益于 PMMA 极低的热导率(约 $0.192 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)以及器件较大的悬空跨距 ($20 \text{ }\mu\text{m}$),样品本征热阻占据绝对主导地位.采用翅片模型^[20,36,37]的定量分析进一步表明,两端接触热阻的大小仅为器件本征热阻的约 0.125% — 0.364% ,端部接触热阻可忽略不计.实验测得 WSe_2/PMMA 样品的热整流比为 8.30% ,而纯 PMMA 对照样品的整流比仅为 0.59% ,可忽略不计.这表明单层 WSe_2 的引入带来了显著的热整流效应.

进一步分析热整流的微观机理.由于 WSe_2/PMMA 样品特征尺寸 ($10\text{--}30 \text{ }\mu\text{m}$) 远大于的声子平均自由程(约数十纳米)^[38,39],边界散射对声子输运的影响可忽略,尺寸效应不显著.纯 PMMA 样品的整流比极低,表明单纯由截面积变化导致的几何不对称性对热整流的贡献十分微弱.因此, WSe_2/PMMA 复合样品的热整流效应主要源于二维材料热导率的温度依赖性^[39,40].具体而言:在正向热流条件下(宽端为高温端),宽端 WSe_2 热导率较低但截面积较大,窄端截面积减小但因温度降低使热导率升高,两者效应相互抵消,导致温度梯度沿热流方向呈减小趋势.在反向热流条件下(窄端为高温端),宽端温度低、热导率高且截面积大,在固定热流下温度梯度较小;窄端因温度升高导致热导率降低,且截面积更小,温度梯度显著增大.上述结果表明,该三角形二维器件的热整流效应源于材料热导率的温度依赖性与截面积变化的协同作用;若无温度依赖性,仅凭几何不对称几乎不产生可观的整流效应,这一结论与前人研究一致^[41,42].为验证上述机理,基于实验参数建立了 COMSOL 有限元模型,并输入 WSe_2 热导率的实测温度依赖关系^[39].模拟结果定量再现了正反向热流下温度梯度的不对称性:反向热流下梯度变化更陡峭,正向热流下梯度变化平缓.

4 结 论

本工作针对热反射温度场测量中,悬空透明样品的热反射信号受到下方衬底反射光耦合干扰的问题,提出了一种改进的热反射温度场测量方法.

该方法的核心在于通过双电极加热实现对样品的独立温度控制与信号标定,进而解耦透明样品与衬底之间的耦合反射信号,获取样品的本征温度分布,为二维材料热输运机理及热整流效应的实验研究提供了可靠的表征手段.利用该方法对三角形的 WSe_2/PMMA 样品进行系统测量,表明该样品在正向与反向热流条件下表现出显著的非对称热输运行为,其热整流比为 8.90% .进一步通过 WSe_2/PMMA 样品与纯 PMMA 对照样品的对比研究发现,纯 PMMA 样品在相同几何不对称条件下仅产生约 0.59% 的微弱热整流效应,而引入 WSe_2 后热整流比显著提升,表明单层 WSe_2 的引入具有明显的热整流效应.综合尺寸效应分析(样品特征尺寸远大于声子平均自由程)及对对照实验结果,该三角形二维器件的热整流效应主要源于形状不对称性与二维材料热导率温度依赖性的协同作用.其中,几何不对称提供了热整流的物理基础,而 WSe_2 热导率随温度升高而降低的特性进一步放大了正、反向热流条件下的等效热导率差异,从而实现了显著的热整流效果.本测试方法原则上可直接推广至其他悬空透明二维材料,如 MoS_2 , MoSe_2 , h-BN 以及石墨烯等,只需满足悬空电极可独立加热以实现标定的前提条件.对于不同材料,热反射系数 C_{TR} 的最佳工作波长可能有所差异,但可通过本文所述的宽频谱波长筛选策略确定最优探测波长(见第 3.2 节).因此,本工作不仅为 WSe_2 热整流机理提供了实验验证,也为更广泛的二维材料热物性研究提供了一种通用的温度场表征工具.此外,结合反射热成像系统的超快时间分辨技术^[43,44],本方法还有望进一步拓展至相关研究对象的动态热输运过程测量.

参考文献

- [1] Hua Y C, Li H L, Cao B Y 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 3296
- [2] Cao B Y 2025 *J. Appl. Phys.* **138** 180901
- [3] Shen Y, Chen X S, Hua Y C, Li H L, Wei L, Cao B Y 2023 *IEEE Trans. Electron Devices* **70** 409
- [4] Deng C K, Tang Z L, Shen Y, Cao B Y 2026 *Appl. Phys. Lett.* **128** 063502
- [5] Tang Z L, Cao B Y 2024 *IEEE J Electron Devi.* **12** 350
- [6] Yan Q, Kanatzidis M G 2022 *Nat. Mater.* **21** 503
- [7] Starr C 1936 *Physics* **7** 15
- [8] Roberts N A, Walker D G 2011 *Int. J. Therm. Sci.* **50** 648
- [9] Zhao H B, Yang X, Wang C Y, Lu R, Zhang T, Chen H S, Zheng X H 2023 *Mater. Today Phys.* **30** 100941

- [10] Sood A, Xiong F, Chen S D, Wang H T, Selli D, Zhang J S, McClellan C J, Sun J, Donadio D, Cui Y, Pop E, Goodson K E 2018 *Nat. Commun.* **9** 4510
- [11] Liu A H, Zhang X W, Liu Z Y, Li Y N, Peng X Y, Li X, Qin Y, Hu C, Qiu Y Q, Jiang H, Wang Y, Li Y F, Tang J, Liu J, Guo H, Deng T, Peng S A, Tian H, Ren T L 2024 *Nano Micro Lett.* **16** 119
- [12] Schwierz F 2013 *Proc. IEEE* **101** 1567
- [13] Liu C, Chen H W, Wang S Y, Liu Q, Jiang Y G, Zhang D W, Liu M, Zhou P 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 545
- [14] Song H F, Liu J M, Liu B L, Wu J Q, Cheng H M, Kang F Y 2018 *Joule* **2** 442
- [15] Huang X Y, Han X, Chen H, Wu X, Liu L W, Ji W, Wang Y L, Huang Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 108201 (in Chinese) [黄新玉, 韩旭, 陈辉, 武旭, 刘立巍, 季威, 黄元 2022 物理学报 **71** 108201]
- [16] Yang G C, Ma C L, Xu L L, Shi W H, Huang X Y, Sun M J, Bi M, He X, Meng X H, Lv S J, Lin W J, He M, Tong L, Ye L 2025 *Acta Phys. Sin.* **75** 010810 (in Chinese) [杨高琛, 马辰龙, 徐浪浪, 史文昊, 黄鑫宇, 孙铭君, 毕铭, 何啸, 孟潇涵, 吕晟杰, 林维佳, 贺敏, 童磊, 叶镭 2025 物理学报 **75** 010810]
- [17] Zhao S Y, Zhou Y H, Wang H D 2022 *Int. J. Heat Mass Transfer* **195** 123218
- [18] Medrano S L, Gutierrez R, Dianat A, Cuniberti G 2015 *RSC Adv.* **5** 54345
- [19] Hu S Q, An M, Yang N, Li B W 2017 *Small* **13** 1602726
- [20] Wang H D, Hu S Q, Takahashi K, Zhang X, Takamatsu H, Chen J 2017 *Nat. Commun.* **8** 15843
- [21] Yang X, Zheng X H, Liu Q S, Zhang T, Bai Y, Yang Z, Chen H S, Liu M 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 28306
- [22] Zhang Y F, Lv Q, Wang H D, Zhao S Y, Xiong Q H, Lv R T, Zhang X 2022 *Science* **378** 169
- [23] Yang X, Wang S Z, Wang C Y, Lu R, Zheng X H, Zhang T, Liu M, Zheng J, Cheng H S 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 4434
- [24] Wang H D, Zhou Y H, Xie S Q, Zheng J, Zhu H X, Cao B Y 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 57403
- [25] Zeng N, Wang J S 2008 *Phys. Rev. B* **78** 024305
- [26] Ju S H, Liang X G 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 024307
- [27] Zhong W R, Huang W H, Deng X R, Ai B Q 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 193104
- [28] Kasprzak M, Sledzinska M, Zaleski K, Iatsunskyi I, Alzina F, Volz S, Sotomayor Torres C M, Graczykowski B 2020 *Nano Energy* **78** 105261
- [29] Rosul M G, Lee D, Olson D H, Liu N M, Wang X M, Hopkins P E, Lee K, Zebarjadi M 2019 *Sci. Adv.* **5** eaax7827
- [30] Hu X, Yasaei P, Jokisaari J, Oğüt S, Salehi-Khojin A, Klie R F 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 055902
- [31] Braun O, Furrer R, Butti P, Thodkar K, Shorubalko I, Zardo I, Calame M, Perrin M L 2022 *npj 2D Mater. Appl.* **6** 6
- [32] Tessier G, Bardoux M, Boué C, Filloy C, Fournier D 2007 *Applied Physics Letters* **90** 171112
- [33] Tessier G, Bardoux M, Boué C, Filloy C, Fournier D 2007 *Sensor Rev.* **27** 291
- [34] Tessier G, Jerosolinski G, Holé S, Fournier D, Filloy C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 495
- [35] Meng B W, Ma Y L, Wang X H, Yuan C 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 115102
- [36] Mavrokefalos A, Pettes M T, Zhou F, Shi L 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 034901
- [37] Sandell S, Maire J, Chávez-Ángel E, Sotomayor Torres C M, Kristiansen H, Zhang Z L, He J Y 2020 *Nanomaterials* **10** 670
- [38] Farris R, Hellman O, Zanolli Z, Reig D S, Varghese S, Ordejón P, Tielrooij K J, Verstraete M J 2024 *Phys. Rev. B* **109** 125422
- [39] Gupta M K, Kumar S, Mittal R, Mishra S K, Rols S, Delaire O, Thamizhavel A, Sastry P U, Chaplot S L 2023 *J. Mater. Chem. A* **11** 21864
- [40] Wang Y T, Gao Y, Easy E, Yang E H, Xu B X, Zhang X 2020 *IEEE 15th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular System* San Diego, CA, USA, September 27–30, 2020 p575
- [41] Gordiz K, Vaez Allaei S M, Kowsary F 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 251901
- [42] Zhao J N, Liu D H, Wei D, Shang X C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 056501 (in Chinese) [赵建宁, 刘冬欢, 魏东, 尚新春 2020 物理学报 **69** 056501]
- [43] Liu Z K, Yang G, Cao B Y 2023 *Rev. Sci. Instrum.* **94** 094902
- [44] Liu Z Y, Liu Z K, Yang G, Cao B Y 2024 *Int. J. Heat Mass Transfer* **229** 125737

SPECIAL TOPIC—Heat conduction and its related interdisciplinary areas

A thermorefectance temperature imaging method for suspended transparent 2D thermal rectifiers*

GUO Liben XIE Siqi LIU Zhike DING Wenyang

WANG Haidong[†] CAO Bingyang[‡]

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52327809, 52425601), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB4404104), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. L233022).

[†] Corresponding author. E-mail: hdwang@tsinghua.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: caoby@tsinghua.edu.cn

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 17 April 2026; revised manuscript received 13 May 2026)

Abstract

With the ongoing miniaturization of electronic devices and the pursuit of higher power densities, efficient thermal management has become critical for device performance and reliability. Thermal rectifiers, which actively control heat flow direction analogous to electronic diodes, hold great promise for next-generation thermal management technologies. Two-dimensional (2D) materials have attracted researchers' interest due to their compatibility with modern electronics (e.g., electrical properties and structural flexibility). So far, most existing characterization experiments employ the H-type method with suspended electrodes as both heaters and resistance thermometers to measure the thermal rectification ratio (TR), which typically treats the device as a zero-dimensional system, yielding only spatially averaged values and obscuring local heat transport. Resolving the temperature distribution on 2D devices is essential for understanding thermal rectification mechanisms. Although thermoreflectance imaging directly measures temperature distributions, its application to suspended transparent 2D samples suffers from signal coupling between the transparent 2D material and the underlying substrate. To address this challenge, this work proposes an adapted thermoreflectance imaging method specifically designed for temperature mapping of suspended transparent 2D materials. The key innovation lies in decoupling the mixed reflectance signals of the sample from substrate by independently controlling sample's temperature rises via electrode heating. Specifically, uniform heating of the sample using both electrodes provides a reference calibration signal. The ratio of this reference signal to the signal acquired under desired heat flow conditions enables a pixel-wise decoupling calculation, which reconstructs the intrinsic temperature distribution of the suspended 2D sample. Using this method, the two-dimensional temperature distributions of a triangular single-layer WSe₂ on PMMA hybrid sample are measured under both forward and backward heat flow conditions. The obtained thermal rectification ratio of the WSe₂/PMMA sample is 8.90%, whereas a control sample consisting of only PMMA exhibited a rectification ratio of only about 0.59% under the same geometrical asymmetry. Comparative analysis reveals that the observed thermal rectification effect primarily arises from the synergistic action of shape asymmetry and the temperature-dependent thermal conductivity of WSe₂. The geometrical asymmetry provides the structural basis, while the decrease of WSe₂ thermal conductivity with increasing temperature further amplifies the difference in effective thermal conductivity between the forward and backward heat flow directions. This adapted thermoreflectance imaging method offers an effective experimental tool for investigating heat transport mechanisms in suspended transparent 2D materials and lays a methodological foundation for optimizing thermal rectifier devices.

Keywords: thermal rectification, 2D materials, temperature field measurement, thermoreflectance imaging

DOI: [10.7498/aps.75.20260538](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260538)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260538](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260538)