

储热储冷多场景应用专刊



相变材料热整流的相关研究进展

雷嘉琦¹, 赵彦琦^{1,2}, 丁玉龙³

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ²南京工业大学能源科学与工程学院, 江苏 南京 211816; ³伯明翰大学化学工程学院, 英国 伯明翰 B15 2TT)

摘 要: 近年来, 随着电子器件与芯片、工业能源系统与建筑节能、特种超材料等领域对高效热管理技术的需求越来越多, 有关热流的调控研究逐渐成为热科学与材料科学交叉研究的重要方向。其中基于相变材料的热整流效应受到了全世界各地研究者的广泛关注。本文系统回顾了相变材料在热整流领域的研究进展, 首先从材料相态变化的不同介绍了固-固相变与固-液相变材料的最新研究进展, 分析了不同热整流器的设计差异。随后, 重点阐述了基于相变材料的各类热整流器件的构建与优化, 包括异质结设计、界面工程及材料复合对其热整流性能的提升作用。最后, 介绍了有关于热整流材料在电子器件芯片散热、能源系统与建筑节能热管理及新型超材料中的应用进展, 说明了相变温度与区间的精确调控、热整流比的提升以及循环稳定性进一步提高等一系列关键问题与挑战, 并展望了面向下一代智能热管理的未来研究趋势。结合现有研究成果, 提出通过掺杂或复合高分子与高导热材料、界面强化与微纳封装以及非对称梯度结构设计等方法来优化相变温度区间且进一步提升热整流性能, 为高性能的热整流材料设计提供指导。

关键词: 相变材料; 热整流; 热二极管; 复合材料; 界面工程

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1159

中图分类号: TB 34

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1073-14

Recent advances in thermal rectification of phase change materials

LEI Jiaqi¹, ZHAO Yanqi^{1,2}, DING Yulong

(¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; ²School of Energy Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; ³School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom)

Abstract: In recent years, with the increasing demand for efficient thermal management technologies in fields such as electronic devices and chips, industrial energy systems, building energy conservation, and functional metamaterials, research on the regulation of heat flow has gradually become an important interdisciplinary direction in thermal science and materials science. Among these, the thermal rectification effect based on phase change materials has attracted widespread attention from researchers worldwide. This paper systematically reviews the research progress of phase change materials in the field of thermal rectification. First, it introduces the latest research advances in solid-solid and solid-liquid phase change materials

收稿日期: 2025-12-24; 修改稿日期: 2026-02-05。

基金项目: 国家自然科学基金 (52206253, 52311530083)。

第一作者: 雷嘉琦 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事热能存储技术研究, E-mail: 2222352015@stmail.ujs.edu.cn; 通信作者: 赵彦琦, 博士、教授, 从事热能存储技术研究, E-mail: hazhaoyq@126.com。

引用本文: 雷嘉琦, 赵彦琦, 丁玉龙. 相变材料热整流的相关研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1073-1086.

Citation: LEI Jiaqi, ZHAO Yanqi, DING Yulong. Recent advances in thermal rectification of phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1073-1086.

based on different material phase transitions, and analyzes the design differences among various thermal rectifiers. Then, it focuses on the construction and optimization of various thermal rectification devices based on phase change materials, including the improvement of thermal rectification performance through heterojunction design, interface engineering, and material compounding. Finally, the paper reviews the progress in the application of thermal rectification materials in electronic device chip heat dissipation, energy system and building energy-saving thermal management, and novel metamaterials. It discusses a series of key issues and challenges, including precise control of phase transition temperature and range, improvement of the thermal rectification (TR) ratio, and further enhancement of cyclic stability. The paper also looks forward to future research trends in next-generation intelligent thermal management. Based on existing research results, the paper proposes methods such as doping or compositing polymers with high thermal conductivity materials, interface strengthening and micro/nano encapsulation, and asymmetric gradient structure design to optimize the phase transition temperature range and further improve thermal rectification performance, providing guidance for the design of high-performance thermal rectification materials.

Keywords: phase change materials; thermal rectification; thermal devices; composite material; interface engineering

为实现到21世纪中叶全球碳中和的宏伟目标,世界能源体系正经历一场深刻的清洁化、低碳化与智能化的转型。提升能源的利用效率、实现对热能的高效利用与定向调控,已经成为减少能源消耗,推动全球可持续化发展的重要举措。在众多理想的热流调控方法中,热整流由于能够有效实现“热流单向传递”这一现象被视为构建热逻辑器件、热开关、热二极管以及智能热回路的重要核心原理,在未来热计算、微纳电子散热以及能源系统优化中具有潜在革命性影响,为解决在电子器件、集成电路芯片以及能源系统中的高效散热难题提供了全新的技术思路。随着新能源汽车、人工智能、航天通信等领域的飞速发展,高功率高能耗电子器件的使用领域也越来越广泛。基于这些方面的迫切需要,热整流技术不仅在基础物理层面揭示了调控热传输的新机制,更在实际应用层面展现出了巨大的潜力,近年来已迅速成为材料科学、热物理与微电子领域交叉的研究热点,吸引了全球学者的持续研究与广泛关注^[1]。

相变材料在相变过程中,其物理性质会发生显著的变化,这一特性也为实现热整流提供了材料基础^[2]。相较于传统固体材料中热导率随温度的微弱变化,相变材料在相变点附近时会发生晶体结构、原子键合方式、声子散射机制以及电子结构的急剧

变化,从而使热流的传递过程呈现明显的非线性与不对称性^[3-4]。例如,固-固相变材料二氧化钒(VO_2)在68℃附近发生金属-绝缘体相变,其热导率在转变过程中可出现数量级的突变^[5];而固-液相变材料如石蜡、水合盐等在熔融过程中,由于自然对流对热传递的影响,其材料本身的导热性能也会显著提高^[6-7]。基于这些物理特性,通过构建非对称结构^[8-9]、调控界面结构^[10-11]以及复合多种材料的方式^[12],可实现正向与反向传热性能的显著差异,从而形成高效的热整流效应。尽管相变材料热整流技术在多个领域展现出广阔前景,但在实际应用方面仍面临诸多挑战,例如相变温度区间的精准调控、热整流比的优化、相变材料的封装、器件的稳定性以及界面工程的优化等一系列问题。然而随着计算材料学以及复合材料合成领域的快速发展,研究者可以在更深层次上设计与研究热管理器件^[13]。未来的研究方向也将向多尺度的模拟以及更加复杂的复合材料实验领域拓展。本文系统性综述了相变材料热整流在关键领域的研究进展。为保证全文的连贯性,本文会回顾部分经典理论和早期研究,但并非全面总结所有技术,而是系统性概述近年来的新兴研究方向,旨在为热整流领域的研究者提供前沿视角和思路。

1 热整流概述

1.1 热整流意义与机制

热整流(thermal rectification)是指在热系统中,当存在温差时,沿一个方向的热流强度显著高于相反方向的热流强度的现象,相当于热量传播中的“二极管”效应。通过热整流效应可设计热二极管(thermal diode),使热量在需要的方向上有效导通,在相反方向上受到阻碍,从而实现对热流的单向控制。目前研究多采用热整流比这一概念定义热整流效应的强弱,通过以下公式计算:

$$TRR = \frac{|q_{\text{fwd}}| - |q_{\text{rev}}|}{|q_{\text{rev}}|} \quad (1)$$

式中, q_{fwd} 是正向热流, q_{rev} 是反向热流。这一效应为热管理领域带来了新思路:在废热回收、热能存储、器件散热等领域对热整流效应有关的研究有望实现定向热传导,从而大幅提高热能利用效率。例如,在微纳米尺度下,研究人员已经将热整流与热逻辑、热晶体等概念相结合,提出并实现了与电子器件类似的热隔离层、热开关、热晶体结构等新型热器件,用于热传输的定向控制和逻辑运算^[14-15]。Wang等^[16]总结指出,热整流效应可用于微

纳尺度的散热、热电性能提高、热开关和热晶体等应用,并认为利用非线性热导率、结构不对称或界面不对称三种主要途径产生热整流,是实现高效热管理的关键。近年来,随着微纳器件中热流密度的激增以及“声子学”新兴学科的发展,对热整流机制和器件的研究愈加活跃^[17-18]。从理论机制上看,热整流效应的产生主要源于系统的非线性热传输特性和方向上的不对称性,如图1所示。非线性热导率变化是实现热整流的基本条件之一,即材料的热导率随温度的变化而变化,从而使热流与温差之间产生非线性关系。当两端温度分布不同且热导率变化趋势不对称时,正反方向热传输不再等价,导致热流传输出现不对称性^[19]。另一重要机制是界面热阻的非对称性:在异质结界面,声子在双向传播时的耦合效率可能不同,导致同一界面在两个方向上的热阻不一致^[20]。研究表明,界面热阻的不对称正是热整流的直接物理来源。此外,几何结构不对称(如梯度材料、纳米结构等)也可使声子产生不对称散射,导致热流在不同方向上的传输效率差异明显,从而产生热整流现象^[21-22]。这些非线性和不对称性的组合构成了声子学中热二极管、热晶体等新型器件的理论基础。

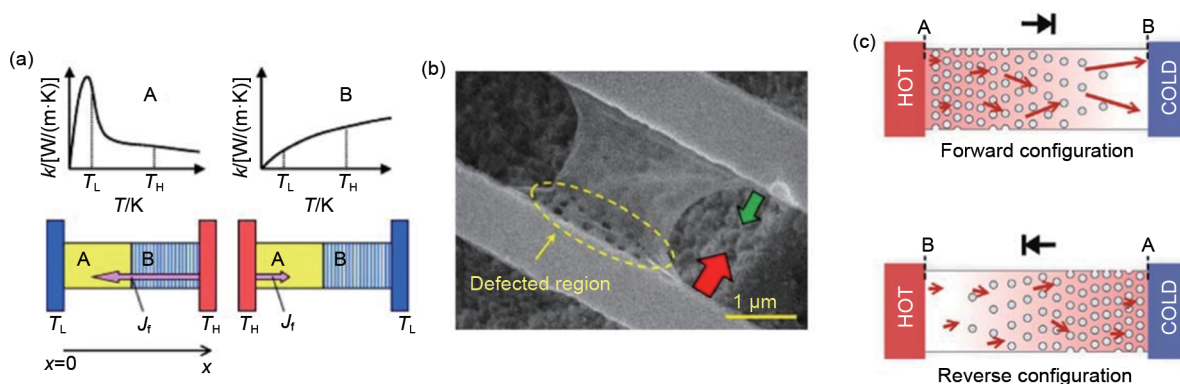


图1 (a) 氧化物热整流示意图; (b) 石墨烯热电二极管的扫描电子显微镜图像; (c) 基于空穴硅膜的热电二极管示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of oxide thermal rectification; (b) Scanning electron microscope image of a graphene thermoelectric diode; (c) Schematic diagram of a thermoelectric diode based on a porous silicon film

1.2 相变热整流材料

相变材料因其在相变过程中热物性突变的特性而成为构建热整流器件的核心材料。与传统的单一导热材料不同,相变材料能够在特定温度或外场激励下发生相变,并伴随相态、晶体结构或微观原子排列方式的改变,其热导率发生显著变化。因此通过合理设计材料体系与结构构型,可设计出具有热

流方向依赖性的“热二极管”,从而实现热量的非对称输运与单向导通。基于相变机制的不同,可用于热整流的相变材料主要分为固-固相变材料与固-液相变材料两大类,具体数据见表1。

固-固相变材料(如二氧化钒、钙钛矿型材料^[23]、部分聚合物等)在相变过程中保持固态形式,主要由材料内部晶格结构和原子排列方式的改变导致性

表 1 相变材料相变特性对比

Table 1 Comparison of phase change characteristics of phase change materials

相变材料	相变类型	相变温度/℃	相变前热导率/[W/(m·K)]	相变后热导率/[W/(m·K)]	相变前后热导率之比
Ge ₂ Sb ₂ Te ₅	固-固(非晶→立方晶)	162	0.20(非晶)	0.63(立方晶)	3.15
Sb ₂ Te ₃	固-固(无定形→晶体)	177	0.23(无定形)	0.35(晶体)	1.52
NiTi	固-固(马氏体→奥氏体)	70	8.6(马氏体)	18(奥氏体)	2.09
VO ₂	固-固(单斜相→立方相)	68	3.6(单斜相)	6(立方相)	1.67
癸酸(C ₁₀ H ₂₀ O ₂)	固→液	31.6	0.372(固态)	0.141(液态)	2.64
十八烷(C ₁₈ H ₃₈)	固→液	28	0.35(固态)	0.149(液态)	2.35
石蜡	固→液	37	0.25(固态)	0.15(液态)	1.7
Ga	固→液	29.8	41(固态)	33(液态)	1.24

能发生变化^[24]，例如，二氧化钒(VO₂)是一种典型的固-固相变材料，其在约 340K 时发生可逆的金属-绝缘体相变。相变前后，其电导率可增加 4 个数量级，且材料热导率也会发生相应的突变；并且 VO₂ 相变也同时伴随着折射率和发射率的大幅变化，使其在辐射热整流器件中表现突出^[25]。此外，某些合金相变材料(如 Ni_{1-x}Fe_xS 系列)在相变时热导率也有急剧的跃变。Zhang 等^[26]制备的 Ni_{0.85}Fe_{0.15}S/Al₂O₃ 热二极管中，当 Ni_{0.85}Fe_{0.15}S 经历一级相变时，其热导率出现突变，因此获得了较高的热整流比。类似地，记忆合金 NiTi、相变存储材料 Ge₂Sb₂Te₅ (GST)等也是典型的固-固相变材料，它们在晶态和非晶态或不同晶相间的转换能造成热导率和电阻的明显差异，因此也是构建热二极管或热开关^[27]的优异性能材料。固-固相变材料的优点在于体积变化小、循环稳定、不易泄漏，但其相变潜热通常较低，且相变速度相对较慢。避免了因液体流动导致的泄漏与封装难题，具有更高的结构稳定性和循环寿命，但其相变前后的热学性能差异相较于固-液相变材料较小，这也导致其热整流性能有待进一步提升^[28-29]。

而固-液相变材料(如石蜡、水合盐、聚乙二醇等)相变时在固相和液相两种相态之间转变，具有显著的相变潜热。常见的固-液相变材料包括石蜡^[30]、聚乙二醇(PEG)^[31]等有机材料，以及水合盐。这些材料在相变温度附近会产生热量的急剧释放或吸收，与此同时也伴随着热导率的突变。例如，十八烷的热导率在熔融前后可从约 0.4 W/(m·K)下降到约 0.17 W/(m·K)；PEG 材料同样在熔融后热导率明显下降。相变水合盐则具有更大的相变潜热且热导率一般高于有机物，虽具有较高的相变潜热，但在实际应用中通常需通过多孔基体吸附、微胶囊

封装或与支撑骨架复合等方式来实现材料定型，以解决液相泄漏问题，这在一定程度上增加了热整流器件构建的不确定性和复杂性^[32]。同时为了提高导热，常将高导热填料(如石墨、金属纤维等)复合到相变材料中^[33]。相变材料的特性使其在热整流器中兼具储热调控和整流作用：选择不同熔点的相变材料，可以根据温度偏置实现可调的热整流比。例如，将两端分别选用熔点不同的石蜡和 PEG 填充于导热网络中，可以得到双稳态的热导变化，以此来实现热二极管功能。综合来看，固-固和固-液相变材料各有优劣，因此在热整流器的设计中，往往根据具体应用场景选择合适的相变机制。

2 热整流实验研究

2.1 相变热整流器设计

如今相变材料热整流器的研究重点主要是对于材料的筛选、结构的设计与性能的优化等几个方面的研究。一方面，通过构建异质结^[34]、非对称界面^[35]或复合材料体系^[36]，利用不同材料相变前后所产生的热导率的巨大差异以及界面散射效应来提高热器件中的热整流比；另一方面，通过探索如光场^[37]、温度^[38]、电场^[39]等外部环境因素对材料相变过程的影响，以实现热流的动态调控。此外，将石墨烯、六方氮化硼、沸石等多孔高导热填料与相变基质相复合，也成为了提升整体导热性能和器件响应速度的有效策略^[40-41]。目前已在理论和实验中验证的热整流器件主要包括导热二极管、热开关以及辐射热二极管等。

在热传导类热二极管设计中，常见方法是将两种具有相反热导率与温度依赖关系的材料进行组合设计。例如，Zhang 等^[26]制备的固态热二极管由铁掺杂硫化镍(Ni_{0.85}Fe_{0.15}S)和 Al₂O₃ 两端构成，如图 2

(a)所示。当冷端温度为 250 K、温差为 97 K 时,该器件的热整流比高达 1.51,远超传统形状记忆合金器件在室温下的表现。此外,还有研究利用双相变材料方案:两端分别填充具有不同相变温度的 PCM,通过两种材料的前后相变来产生正反方向

不同的热流通路。例如, Kasali 等^[42]采用 VO_2 和 PE 作为导热二极管的两端材料,能够实现 1.6 的最大热整流比,如图 2(b)所示。热开关的概念类似,当系统温度跨越某一阈值时,开关就会闭合或者断开热流通路,能够人为地对热流进行合理调控。

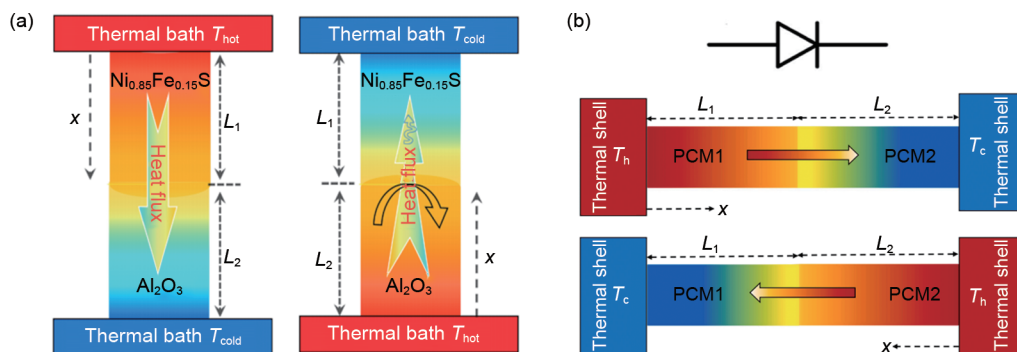


图2 导热二极管示意图^[29, 42]

Fig. 2 Schematic diagram of a thermal diode^[29, 42]

辐射热整流器的工作原理主要是利用材料热辐射特性随温度的变化来进行热交换。典型的例子是基于 VO_2 等相变前后发射率与反射率会发生突变的相变材料来构建辐射热二极管。例如,当 VO_2 由绝缘相变为金属相时,其光学吸收/发射谱发生剧变,从而使得热辐射通量正向和反向产生不对称。Liu 等^[27]提出了一种基于 GST 和 VO_2 材料的近场多级辐射热整流器,研究表明将 GST 和 VO_2 进行结合可以实现多级热整流,并且通过优化两种材料的结构配置,能够显著提高热整流比。该设计为高效热整流器的实现提供了新的思路。Kasali 等^[43]同样研究了基于 GST 和 VO_2 的辐射热二极管的整流优化,通过调节材料的发射率和界面温度,进一步优化了热流的单向传输,将最大整流比提升至 1.9。Hu 等^[44]研究了基于外尔半金属(WSM)的高效近场辐射热二极管。通过强耦合局域等离子体模式和非互易表面等离子体极化,研究实现了高达 2673 的热整流比,比之前的研究高出 10 倍以上。此外,基于相变材料的远场辐射热二极管也被提出,由于远场传热不需要微纳尺度精密间隙的组合与对准,所以其热量的传递依赖于较大距离下的辐射特性和传播波,因此利用这一机制可以通过简易结构设计就能够实现热整流。Ng 等^[45]通过在熔融石英板上涂覆 100 纳米厚的铝膜,创造了不对称的表面发射率分布。实验结果表明,热整流比在室温下可达到 1.5,当热偏差为 140 K 时,效率得到明显提升。总之,

辐射热整流器的核心在于通过定制材料和多层结构的发射/吸收谱,实现了在不同温度下的热辐射控制。另外,还有许多其他研究利用如 Bi_2Se_3 等^[46]特殊材料也可构建具有辐射热整流的热整流器件。

2.2 非对称纳米结构与界面调控热整流

非对称纳米结构的设计与构建是实现热整流的重要途径之一。其核心在于通过材料组合、界面形状修饰或构建梯度结构等方法形成具有方向依赖性的界面,使热流在正、反方向上呈现不同的传输效率,从而产生整流效应。研究表明,双相变材料能够在热流的正反方向上产生显著的非对称。Meng 等^[47]构建了一种由石蜡与六水氯化钙组成的固液相变热二极管,如图 3(a)、(b)所示,通过理论建模与实验验证相结合的方法,探究其热整流性能。结果显示,在加热端温度 40℃、冷却端温度 14℃、终端 A 长度 4.8 mm、终端 B 长度 40 mm 的条件下,该热二极管实现了 3.0 的热整流比,且实验与理论结果吻合良好。该研究揭示了不同相变材料组合对增强热整流效应的积极作用。除了利用相变材料进行组合以外,纳米层面的界面研究也是优化热整流性能的重要途径;Li 等^[48]提出通过固液界面上的温泽尔-卡西润湿态转变来实现热整流。研究表明,在温差为 60 K 时,其热整流比可达到 1.7,并且随着温差的增加热整流效果显著增强。另外,界面形状也对其热整流效应有显著影响,Wang 等^[49]通过在双段热整流器中引入锯齿形界面,如图 3(c)所

示, 采用有限元方法模拟了热流通过系统的情况。研究发现, 锯齿形界面的引入使热整流比提升了 36%, 具体来说, 热整流比从 1.42 增加至 1.93, 热边界电阻的变化是影响热整流性能的关键因素之一^[50]。从微观层面看, 声子在界面的扩散效应也会对热流的传输产生影响, Hua 等^[51]研究了在一维 Kapitza 界面上, 由于亚扩散和超扩散的声子输运, 热整流效应显著增强。通过分子动力学模拟

研究表明, 热整流比可以达到 8.9, 具体在温差为 140 K 时, 反向热流几乎被完全阻断, 表现出显著的热整流效应。另外, 在宏观角度, Vozel 等^[52]对多种界面形貌和接触电阻进行了大量的数值模拟。研究表明, 界面形貌的优化能够显著扩大热整流的温度范围, 热整流比从 1.3 提升至 1.8, 尤其是在接触电阻较低的情况下, 热整流比最大可达到 2.1。

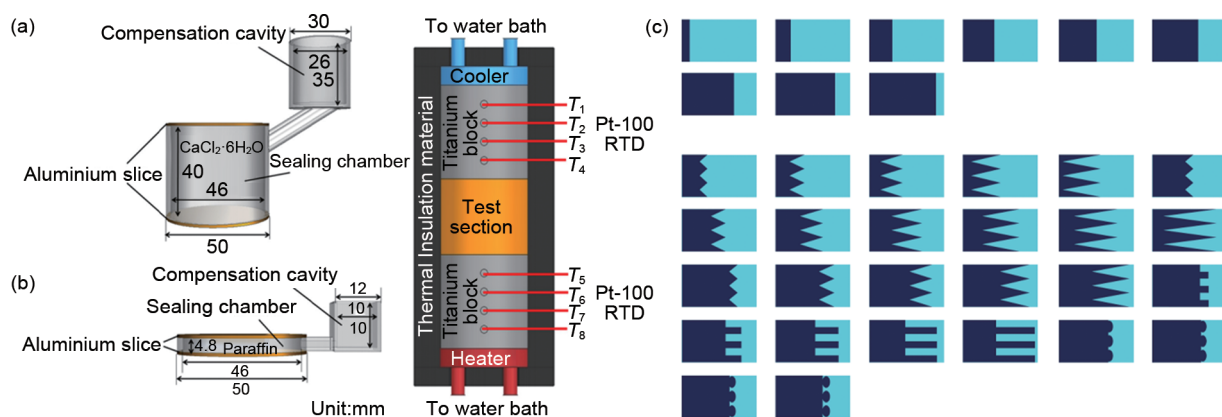
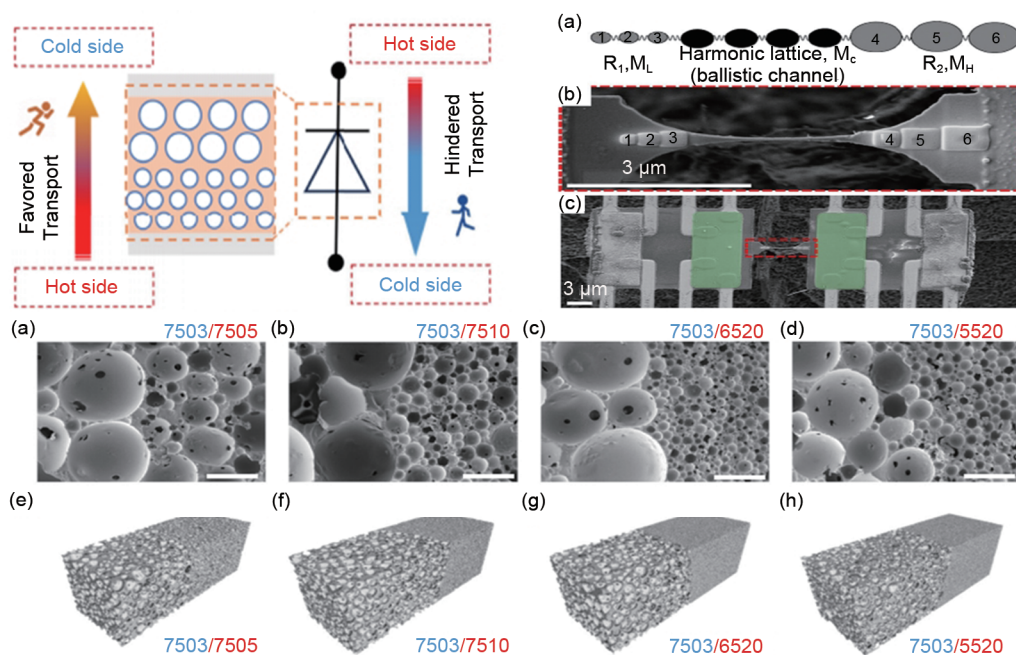


图 3 固液相变热电二极管的制备过程: (a) 端子 A 和 (b) 端子 B 的尺寸, 用于研究固液相变热电二极管热传递的定制实验装置^[47]; (c) 界面形貌修饰结构分类图^[52]

Fig. 3 Fabrication process of the solid-liquid phase change thermoelectric diode, showing the dimensions of (a) terminal A and (b) terminal B, Customized experimental setup used to study the heat transfer of the solid-liquid phase change thermoelectric diode^[47]; (c) Classification diagram of interface morphology modification structures^[52]

在新型纳米材料领域, 由于石墨烯^[53-54]和碳纳米管^[55]等新型纳米材料的高导热性能, 对其非对称性纳米结构的修饰和调控相关研究受到了广泛关注。例如, Yousefi 等^[56]通过分子动力学模拟研究了非对称结构在石墨烯界面上的热传导。结果表明, 石墨烯中的非对称结构能够实现超高热整流, 其热整流比最大可达 42。另外, 材料的质量梯度和力学性能也会对热整流有很大影响。Tavakoli 等^[57]研究了具有非对称质量梯度纳米通道的热整流效应。实验表明, 随着质量梯度的增加, 热整流比明显提高, 在冷热两端温差为 50 K 时, 热整流比最大达到了 5.6。同时由于热流在通道中主要沿质量较高的区域进行传递, 所以这也有有效抑制了反向热流的传输; 而 Lee 等^[58]研究了非对称弹性模量的双层膜结构在固态热整流中的应用。结果表明, 当两层材料的弹性模量存在明显差异时, 热整流效应随之得到了显著增强, 热整流比最大可达到 3.2。另外, 在微观层面上的非对称晶格、梯度结构和多孔复合

材料结构也会使热流的传输具有不一致性从而增强热整流效应。Romero-Bastida 等^[59]通过对具有非对称次近邻相互作用的 Frenkel-Kontorova 晶格中的热传导进行模拟结果显示, 非对称次近邻相互作用能够显著提高晶格中的热整流效应, 在较小的冷热端温差下, 热整流比可达到 6.1, 且随着温差的增加, 热整流比逐渐增大。而 Jiang 等^[60]基于 Janus 粒子制备出结构显著不对称的多孔复合材料, 实现了两层不同的孔隙结构, 其中一层平均孔径为 160 μm 、孔隙率为 76%, 另一层为 62 μm 、孔隙率为 60%, 其最高热整流比达到了 1.38。Lahkar 等^[61]研究了梯度晶粒尺寸分布调控的半随机多晶石墨烯热整流行为。Hahn 等^[62]采用分子动力学模拟系统探究了纳米多孔硅膜中孔隙分布对热输运的影响。这些研究都进一步说明了非对称结构对热整流效应具有显著的增强效果, 如图 4 所示。此外非对称多孔梯度材料所产生的热整流效应也在许多领域中得到了很好的应用, 例如太阳能热调节冷却^[63],

图4 多种非对称纳米结构示意图^[57,60]Fig. 4 Schematic diagrams of various asymmetric nanostructures^[57,60]

辐射冷却^[64]等领域；此外，在宏观层面也有许多关于非对称结构的设计实验可以进一步验证如何高效地对热流的传输进行调控^[65-66]。

2.3 纳米异质结构热整流

纳米异质结是热整流研究的另一重要方向，其通过复合不同材料或诱导特殊结构的方法可产生显著的整流效应^[67-68]。Zhang等^[69]采用常压化学气相沉积(AP-CVD)方法，合成了原子级厚度的单层MoSe₂-WSe₂面内异质结，如图5所示。这种结构上的非对称性，加上MoSe₂和WSe₂本身声子特性的差异，使得热量从MoSe₂向WSe₂方向传输时声子更易通过，反向则受阻，从而实现了高达1.96的热整流比。而Wang等^[70]同样通过精确控制MoSe₂/WSe₂范德华异质结的层间扭转角，实现了对热整流和电整流的反向协同调控。异质结不仅可以由不同材料复合而成，也可以通过引入特殊空位结构来实现，例如Kuo^[71]通过构建不对称长度的异质结并引入空位实现了对拓扑态耦合强度与声子热流的分别调控。结果表明，在拓扑态能级偏移和较强的拓扑态间电子库仑相互作用($U_1 = 38$ meV)的条件下，系统在低温下能产生显著的电子热整流效应，热整流比可达2.43。另外一些研究表明，基于纳米线^[72]、纳米孔^[73]和纳米颗粒^[74]所构建的异质结同样也具有优异的热整流效应，Wang等^[75]将石墨烯覆

盖的In-Sb平板与石墨烯覆盖的3C-SiC纳米线阵列相对放置。在优化参数下，石墨烯化学势 $\mu=0.125$ eV，高温端 $T_H=940$ K，间隙 $d=10$ nm，填充比 $f=0.1$ ，该器件能实现高达1.93的热整流比，且在宽泛的参数范围内效率可维持在80%以上。

3 热整流效应应用

3.1 电子器件与芯片热管理

随着现代电子设备不断向小型化、高集成度发展，其功率密度急剧上升，局部热积累已成为制约性能与可靠性的关键瓶颈。传统的相变材料热管理主要通过潜热吸收被动缓冲温升，而相变热整流技术为此领域引入了主动、定向调控热流的新模式，从而实现了对热流的智能管理，如图6所示。Li等^[76-77]研究发现利用电磁局部态密度(LDOS)模型，可以实现超过109的热整流比，效果与电二极管相当。研究为控制热流传输提供了新的理论框架，在电子器件和芯片热管理领域具有极大的应用潜力。Zhu等^[78]研究了利用具有温度依赖的铁磁性材料构建高性能热二极管。实验结果显示，在空气中，热二极管的整流比达到23，在真空环境下为16，该研究为热管理领域提供了新的思路。Zhang等^[79]则开创性地提出了一种利用正负电子协同机制实现的热p-n结，将热学领域与二极管概念进一步结合，

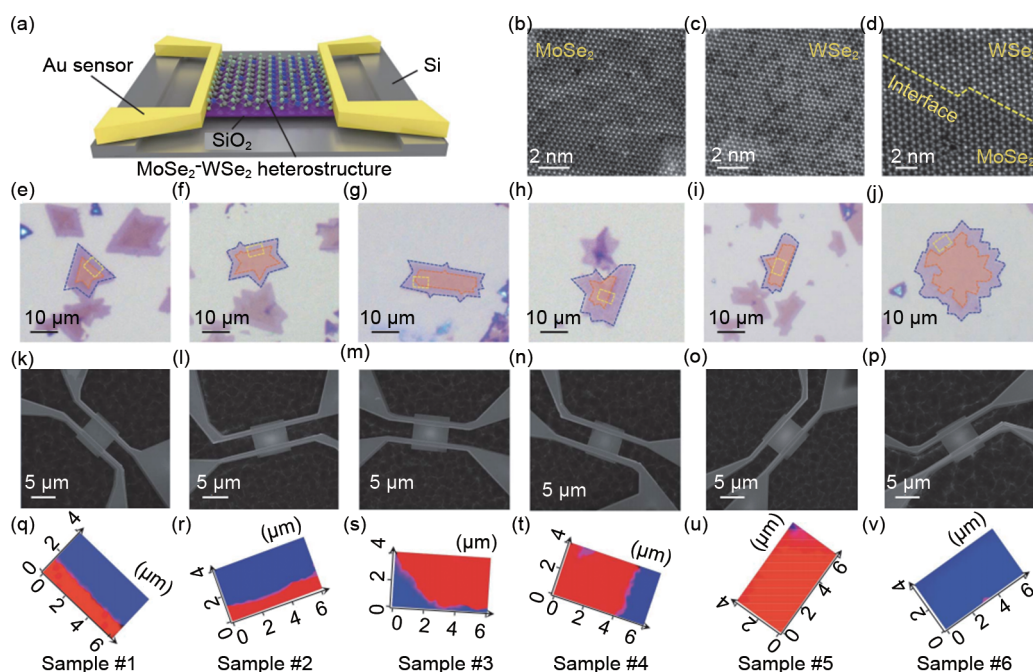


图5 合成的 $\text{MoSe}_2\text{-WSe}_2$ 横向异质结构及制备的H型传感器件的表征^[69]

Fig. 5 Characterization of the synthesized $\text{MoSe}_2\text{-WSe}_2$ lateral heterostructure and the fabricated H-type sensor device^[69]

实验结果表明,该热二极管在303~393 K的温度范围内,热整流比可达到1。这种热p-n结设计与电子器件中的热管理密切相关,特别有助于开发高效的热管理和热能存储设备。另外,有关于构建热学逻辑器件的研究逐渐受到广泛关注,Castelli等^[80]研究了一种三端磁热晶体管的设计与实验。该晶体管利用温度依赖的磁性来控制源极和漏极之间的热流。在高真空环境下实现源漏热流的开关比(ON/OFF)达到 109 ± 44 ,并且具有较小的热滞回性。此外,这项研究还展示了该晶体管在热电发电和热存储电路中的应用,其能够有效形成热流回路,可组合成布尔型热逻辑门。这些研究进一步推动了先进热控制和热管理领域的研究发展,为构建微型智能热管理系统奠定了器件基础。

3.2 能源系统与建筑节能热管理

相变材料不仅有优异的热储存功能,同时由于其相变时的热稳定性、高潜热等独特优势,也在工业能源系统与建筑节能热管理领域受到广泛关注和研究^[81-82],借助其相变时前后热导率的变化,能够有效调节热流的方向,从而进一步优化热管理,减少能源浪费,提升能源利用率。在建筑节能热管理领域中,Castelli等^[83]构建了一种磁热二极管用来实现多季节的被动可变绝缘。实验结果显示,被动

式可变隔热(PVI)模型能够通过对热能的合理调节将室内温度维持在4℃左右,其热整流比为6:1。另外,当前许多研究者设计的热二极管装置已经应用于热能收集和温度控制系统等领域。例如,Xiang等^[84]提出了一种基于改进式止回阀和改进式芯丝结构的新型热电二极管。实验结果表明,该二极管在不同工作条件下,热整流比可达到3.5,该设计能够有效提高热电转换效率,适用于热能收集和温度控制系统。值得注意的是,热二极管的热整流效应同样受环境因素影响^[85],Chen等^[86]和Zhang等^[87]研究了热二极管与环境温度之间的关系,通过将温度振荡理论与热整流技术相结合,实现了高达5.2的热整流比,并且能够在不同频率下优化热流控制。这对理解相变材料热整流与环境因素之间的相互作用机制具有重要意义。

3.3 超材料和其他应用

除了在电子器件与芯片以及建筑节能等热管理领域的应用之外,相变材料热整流技术在超材料方面也展现了巨大的应用前景,如图7所示。在超材料领域通过精确设计材料的微观结构,热整流技术能够使这些材料具有常规材料所不具备的特殊性质,如负热导率、热隐身、热导向、热伪装等一系列新颖功能,也使其成为一种高新材料应用于多种

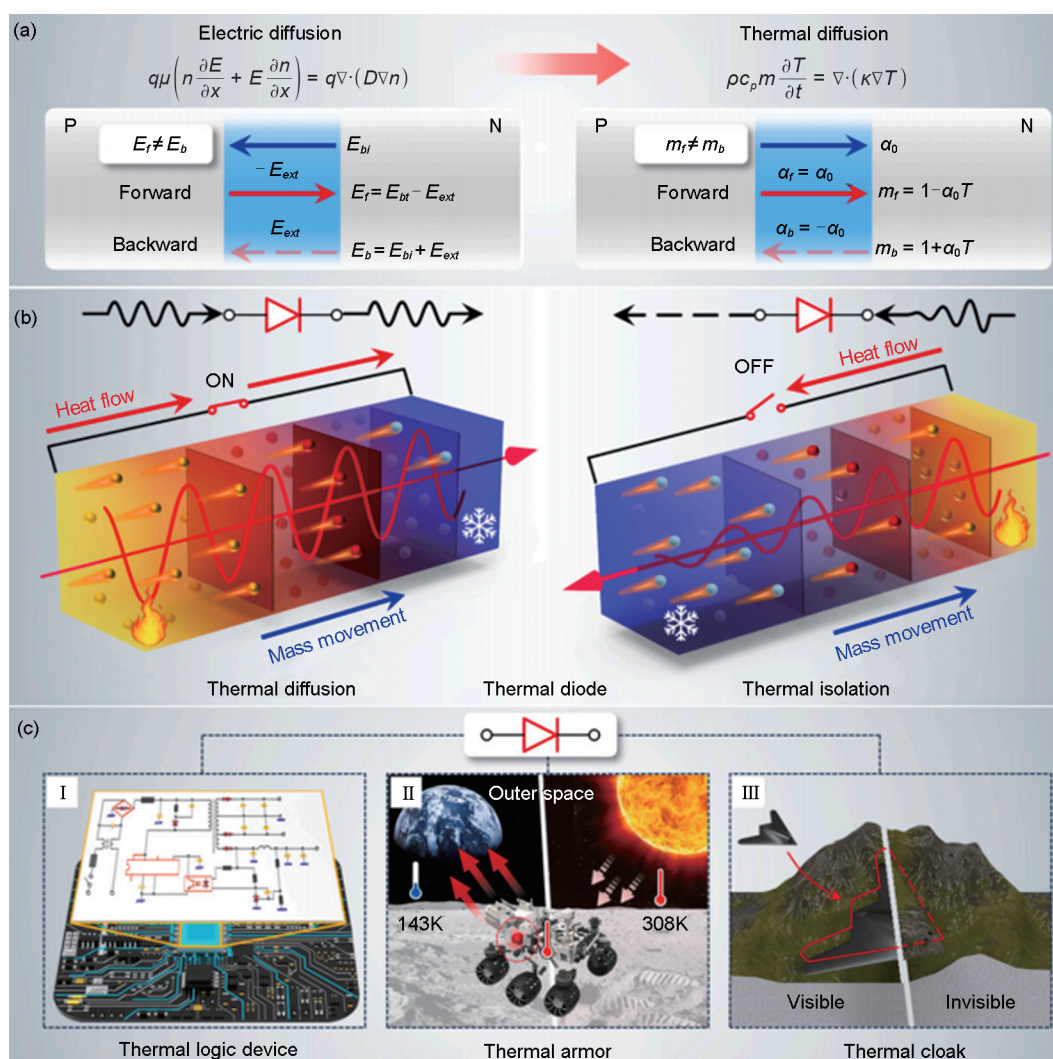


图 6 (a) 电二极管 (左) 与热二极管 (右) 中非互热传递与热传递的对应关系; (b) 通过定向质量运动实现的非对称传热示意图; (c) 热二极管的多种潜在应用: 热逻辑器件、热装甲及热隐身^[79]

Fig. 6 (a) The correspondence between non-reciprocal heat transfer and heat transfer in an electrical diode (left) and a thermal diode (right); (b) Schematic diagram of asymmetric heat transfer achieved through directional mass motion; (c) Multiple potential applications of thermal diodes: Thermal logic devices, thermal armor, and thermal cloaking^[79]

前沿技术与军事领域中^[88]。Xue 等^[89]研究了一种基于不对称温度依赖性热导率的热电二极管, 该器件具备可任意切换的“隐身”属性, 该二极管最高的热整流比可以达到 14.5。而 Du 等^[90]研究了一种由 T_3 - $\text{Sn}_4\text{In}_6\text{Se}_2\text{O}$ 团簇组装而成的非对称性热整流器, 结果显示这种四面体形状的团簇组装体具有约 1.4 的热整流比, 其热整流主要来自横向不对称约束和声子行为对热流传输的影响。He 等^[91]和 Ding 等^[92]则分别对新型的模块化设计体超材料和热机械超材料进行了研究, 结合了温度响应驱动的形状记忆合金(SMA)弹簧与铜条的预弯曲结构, 能够产生梯度

响应来实现非对称的热流传输, 且将其热整流比提升至超过 900, 在热管理领域中表现出色。Shimokusu 等^[93]研究了将特氟龙 AF 涂层应用于跳跃式液滴热二极管中, 并且实现了正向和反向模式下的热整流, 最大热整流比约为 7。同时, 所采用的特殊超材料特氟龙 AF 涂层也显著提高了热二极管表面的耐久性, 能够稳定地运行超过 20 个周期。

4 总结与展望

综上所述, 相变材料在热整流领域的应用展现

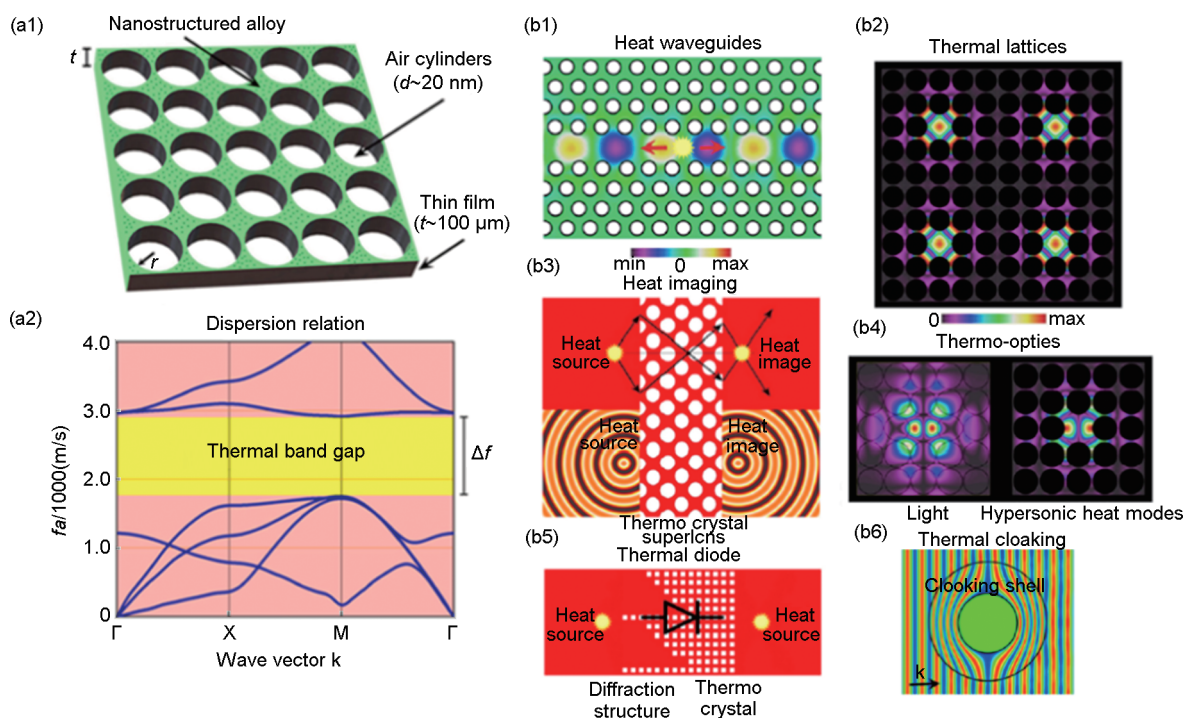


图7 超材料的相关研究和应用: (a1) 热晶体的结构, 其中空气柱以周期性方式排列在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金薄膜上; (a2) 热晶体的声子带隙; 热晶体的潜在应用包括: (b1) 热波导、(b2) 热晶格、(b3) 热成像、(b4) 热光学、(b5) 热二极管以及 (b6) 热隐身^[88]

Fig. 7 Related research and applications of metamaterials: (a1) Structure of a thermal crystal, where air columns are arranged periodically on a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ alloy thin film; (a2) Phonon band gap of the thermal crystal; Potential applications of thermal crystals, including: (b1) thermal waveguide, (b2) thermal lattice, (b3) thermal imaging, (b4) thermal optics, (b5) thermal diode, and (b6) thermal cloaking^[88]

了巨大的潜力, 尤其是在电子器件热管理、能源系统建筑节能和超材料应用等方面。结合现有研究成果, 通过掺杂调控、界面优化与微纳封装以及多层/复合非对称梯度结构设计等综合策略, 既可灵活调节相变行为, 又能显著提升热整流性能和循环寿命, 为热整流器件的实际应用奠定了材料与设计基础。然而, 尽管相变材料在热整流技术中已经取得一定的进展, 但仍然面临一些挑战和困难:

(1) 大部分相变材料例如有机相变材料以及无机水合盐相变材料的热导率普遍较低, 这也进一步限制了由相变材料组成的热整流器的性能。目前通过与石墨烯等具有高热导率的导热填料进行复合或者金属掺杂等方法可以显著提升热导率, 但复合后的材料可能会改变其原来的一些相变特性。因此, 未来的研究需要探索如何在复合相变材料保持高热导率的情况下不影响材料原有的相变特性来保证热整流性能的提升。

(2) 尽管固液相变材料的相变潜热并不直接影响其热整流性能, 但其通过影响相变温区宽度与相

变界面移动, 从根本上制约了对热流方向的精准调控, 是影响热整流性能的重要因素之一。然而, 现有的一些多孔基底吸附等定型方法往往会导致相变材料原有的相变潜热下降, 从而对热整流效应的稳定性造成显著影响。因此, 未来的研究应在定型的同时如何尽量保持其相变潜热不变, 以确保其热整流性能的最优化这一方向进行更深入的探索。

(3) 热整流性能在复杂实际工况下往往出现显著衰减的现象, 因此如何进一步提高热整流比来实现更高效的热流单向调控仍然是一个有待继续研究的方向, 特别是在多温差、高功率密度的复杂环境下, 如何保证能够对热流进行有效的调控, 并尽可能抑制反向热流, 将是热整流技术未来的重要研究方向。

(4) 目前许多基于相变材料的热整流技术研究仍处于实验室阶段, 由于现有热整流相关技术实现的成本较高, 更加限制了其在工业领域和日常生活中的推广。因此, 未来的研究需要兼顾性能优化与成本控制, 例如采用溶液法、化学气相沉积等低成

本、高效率的生产方法以推动其在建筑节能、电子器件芯片热管理等领域的广泛应用。

参考文献

- [1] BHATTACHARYA R, MAITI S K. Phononic thermal rectifier: A new proposition[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(7): 075303. DOI:10.1088/1361-6463/acb21b.
- [2] 刘春轩, 张东尧, 李传常, 等. 相变材料在热储能技术中的应用[J]. *材料科学*, 2022(7): 749-760.
- LIU C X, ZHANG D Y, LI C C, et al. Application of phase change materials in thermal energy storage technology[J]. *Material Sciences*, 2022(7): 749-760.
- [3] VENKATESHWAR K, TASNIM S H, GADSDEN S A, et al. Influence of shrinkage on phase change material-based thermal rectifiers[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 29: 101200. DOI:10.1016/j.tsep.2022.101200.
- [4] YANG C, XU Y, WANG X G, et al. Analysis and optimization of dynamic and static thermal rectification in shell-and-tube phase change thermal rectifiers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 236: 126315. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126315.
- [5] ZHAO W X, ZHU Z, FAN Y W, et al. Temporally-adjustable radiative thermal diode based on metal-insulator phase change [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185: 122443. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122443.
- [6] 杨旭, 李静, 毛宇, 等. 基于六水氯化钙的单相变材料热二极管的实验研究[J]. *物理学报*, 2024, 73(5): 311-320. DOI: 10.7498/aps.73.20231686.
- YANG X, LI J, MAO Y, et al. Experimental study of single-phase change material thermal diode based on calcium chloride hexahydrate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(5): 311-320. DOI: 10.7498/aps.73.20231686.
- [7] YANG C, WANG X G, WANG S B, et al. Theoretical derivation and parameter optimization of the shell-and-tube thermal rectifiers with dual solid-liquid phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 137: 118586. DOI:10.1016/j.est.2025.118586.
- [8] ZOU Z W, BAI R X, LI X B, et al. Thermal rectification induced by phonon hydrodynamics in asymmetric 2D microstructures[J]. *Materials Today Physics*, 2024, 40: 101319. DOI: 10.1016/j.mtphys.2023.101319.
- [9] HUANG M J, LIAO H Y. An investigation into the thermal rectification in one-dimensional asymmetric systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122856. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122856.
- [10] 赵建宁, 刘冬欢, 魏东, 等. 考虑界面接触热阻的一维复合结构的热整流机理[J]. *物理学报*, 2020, 69(5): 164-173.
- ZHAO J N, LIU D H, WEI D, et al. Thermal rectification mechanism of one-dimensional composite structure with interface thermal contact resistance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(5): 164-173.
- [11] LIU Y, WU W H, YANG S X, et al. Interfacial thermal conductance of graphene/MoS₂ heterointerface[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 28: 101640. DOI:10.1016/j.surf.2021.101640.
- [12] ZHAO J N, WEI D, WANG Y X, et al. Transient thermal regulation mechanisms of composite structures with interface thermal resistance[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 61: 104846. DOI:10.1016/j.csite.2024.104846.
- [13] ZHAO S Y, ZHOU Y H, WANG H D. Review of thermal rectification experiments and theoretical calculations in 2D materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 195: 123218. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123218.
- [14] ZHAO H B, YANG X, WANG C Y, et al. Progress in thermal rectification due to heat conduction in micro/nano solids[J]. *Materials Today Physics*, 2023, 30: 100941. DOI: 10.1016/j.mtphys.2022.100941.
- [15] LIU H X, WANG H D, ZHANG X. A brief review on the recent experimental advances in thermal rectification at the nanoscale [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): DOI:10.3390/app9020344.
- [16] WANG W C, ZHENG J C, WANG H Q. Generalized thermal rectifier model with optimal thermal rectification ratio and its application to Ga₂O₃-based semiconductors[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2025, 37(39): 395901. DOI:10.1088/1361-648x/ae05e0.
- [17] 罗天麟, 丁亚飞, 韦宝杰, 等. 低维微纳尺度体系声子热传导和热调控: 来自芯片散热的非平衡统计物理问题[J]. *物理学报*, 2023, 72(23): 87-123. DOI:10.7498/aps.72.20231546.
- LUO T L, DING Y F, WEI B J, et al. Phononic thermal conduction and thermal regulation in low-dimensional micro-nano scale systems: Nonequilibrium statistical physics problems from chip heat dissipation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(23): 87-123. DOI:10.7498/aps.72.20231546.
- [18] 徐象繁, 杨诺, 李保文. 微纳尺度热能调控的声子学元器件研究进展[J]. *物理*, 2013, 42(3): 181-190.
- XU X F, YANG N, LI B W. The development of basic phononic components for thermal energy management/control in nano/micro structures[J]. *Physics*, 2013, 42(3): 181-190.
- [19] SHIMOKUSU T J. Measurements and modeling of passive nonlinear thermal devices: diodes and regulators[D]. Houston: Rice University, 2024.
- [20] 赵建宁, 魏东, 吕国正, 等. 一维异质结构的瞬态热整流效应[J]. *物理学报*, 2023, 72(4): 127-137. DOI:10.7498/aps.72.20222085.
- ZHAO J N, WEI D, LYU G Z, et al. Transient thermal rectification effect of one-dimensional heterostructure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(4): 127-137. DOI:10.7498/aps.72.20222085.
- [21] ZHANG Y, QIAN K, YANG L. Designing thermal rectifier using compositionally graded alloys[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 239: 126571. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126571.
- [22] NG R C, CASTRO-ALVAREZ A, SOTOMAYOR-TORRES C M, et al. Thermal rectification and thermal logic gates in graded alloy semiconductors[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 126571. DOI:10.3390/en15134685.
- [23] ALVAREZ-QUINTANA J. Solid state thermal rectification by

- chemical pressure tuning of magnetic properties in perovskites[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 46: 102169. DOI:10.1016/j.tsep.2023.102169.
- [24] MALIK F K, FOBELETS K. A review of thermal rectification in solid-state devices[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(10): 103101. DOI:10.1088/1674-4926/43/10/103101.
- [25] HARATOKA C, JOULAIN K, EZZAHRI Y. Conductive thermal diode based on vanadium dioxide under dynamical boundary conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 255: 127702. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127702.
- [26] ZHANG X K, TONG P, LIN J C, et al. Large thermal rectification in a solid-state thermal diode constructed of iron-doped nickel sulfide and alumina[J]. Physical Review Applied, 2021, 16: 014031. DOI:10.1103/physrevapplied.16.014031.
- [27] LIU Y, CARATENUTO A, ZHENG Y. GST-VO₂-based near-field multistage radiative thermal rectifier[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(6): 2135. DOI:10.1364/ome.455868.
- [28] ROBERTS N A, WALKER D G. A review of thermal rectification observations and models in solid materials[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(5): 648-662. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2010.12.004.
- [29] RURALI R. A one-way street for phonon transport: Past, present and future of solid-state thermal rectification[J]. Nano Express, 2024, 5(1): 011001. DOI:10.1088/2632-959x/ad2a17.
- [30] 王铮铮. 高炉渣-石墨烯-石蜡低温储能相变分子动力学研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- WANG Z Z. Molecular dynamics study of phase transition of high furnace slag/graphene/paraffin storage[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.
- [31] HO T H, HIEN T D, WILHELMSEN Ø, et al. Thermophysical properties of polyethylene glycol oligomers *via* molecular dynamics simulations[J]. RSC Advances, 2024, 14(38): 28125-28137.
- [32] WANG J, LI H Y, XIA G D, et al. Enhanced effect of solid-liquid interface thermal rectification by surfactant: A molecular dynamics study[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 161: 108517. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108517.
- [33] 齐孝圣, 陆威, 吴志根, 等. 正二十四烷烃石蜡/膨胀石墨复合相变材料分子动力学模拟[J]. 原子与分子物理学报, 2023, 40(2): 77-85.
- QI X S, LU W, WU Z G, et al. Molecular dynamics simulation of n-tetracosane paraffin/expanded graphite composite phase change materials[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2023, 40(2): 77-85.
- [34] XING, LIU, LIU, et al. Efficient thermal rectification in nitrogen-doped carbon nanotube heterostructures[J]. Chinese Physics B, 2025, 34(11): 116101. DOI:10.1088/1674-1056/adfdc4.
- [35] DU F Y, ZHANG W, WANG H Q, et al. Enhancement of thermal rectification by asymmetry engineering of thermal conductivity and geometric structure for multi-segment thermal rectifier[J]. Chinese Physics B, 2023, 32(6): 064402. DOI: 10.1088/1674-1056/acc78c.
- [36] DING H B, LI X S, LI T H, et al. Controllable thermal rectification design for buildings based on phase change composites[J]. Journal of Semiconductors, 2024, 45(2): 022301. DOI: 10.1088/1674-4926/45/2/022301.
- [37] REBOLLO SANDOVAL H, HERNÁNDEZ RAMÍREZ L M, LÓPEZ-SOSA L B. Proposal for a thermal diode with low-environmental-impact materials for thermosolar applications[J]. International Journal of Thermophysics, 2025, 46(4): 49. DOI:10.1007/s10765-025-03513-9.
- [38] ZHAO L, YANG Y, ZHOU Y, et al. Negative thermal transport and giant thermal rectification unveiled in a periodic-oscillating temperature system[J]. Chinese Physics Letters, 2025, 42(8): 080702. DOI:10.1088/0256-307X/42/8/080702.
- [39] ZHANG J Y, HAO Y, XIONG B W, et al. Giant thermal rectification beyond structural asymmetry *via* current-induced nonreciprocity effects[J]. Chinese Physics B, 2025, 34(9): 094402. DOI:10.1088/1674-1056/add906.
- [40] WU N, LIU Y G, WANG S, et al. Thermal rectification in graphene-boron nitride nanotube hybrid structures: An independent control mechanism for forward and backward heat flux[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(32): 42660-42673.
- [41] SUN H B, JIANG Y L, HUA R J, et al. Graphene and 2D hexagonal boron nitride heterostructure for thermal management in actively tunable manner[J]. Nanomaterials, 2022, 12(22): DOI: 10.3390/nano12224057.
- [42] KASALI S O, ORDONEZ-MIRANDA J, JOULAIN K. Conductive thermal diode based on two phase-change materials[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 153: 106393. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106393.
- [43] KASALI S O, ORDONEZ-MIRANDA J, JOULAIN K. Optimization of the rectification factor of radiative thermal diodes based on two phase-change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119739. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119739.
- [44] HU Y, LIU H T, YANG B, et al. High-rectification near-field radiative thermal diode using Weyl semimetals[J]. Physical Review Materials, 2023, 7(3): 035201. DOI: 10.1103/physrevmaterials.7.035201.
- [45] NG R C, EL SACHAT A, JARAMILLO-FERNANDEZ J, et al. Far-field radiative thermal rectification based on asymmetric emissivity[J]. ACS Applied Optical Materials, 2024, 2(6): 973-979.
- [46] ODEBOWALE A A, AS'HAM K, BERHE A M, et al. Near-field radiative thermal rectification assisted by Bi₂Se₃ sheet[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107707. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107707.
- [47] MENG Z N, GULFAM R, ZHANG P, et al. Numerical and experimental study of the thermal rectification of a solid-liquid phase change thermal diode[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118915. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118915.
- [48] LI H Y, WANG J, XIA G D. Thermal rectification induced by Wenzel-Cassie wetting state transition on nano-structured solid-

- liquid interfaces[J]. Chinese Physics B, 2023, 32(5): 054401. DOI: 10.1088/1674-1056/aca9c1.
- [49] WANG J, SHAO C R, LI H Y, et al. Enhancement of thermal rectification effect based on zigzag interfaces in bi-segment thermal rectifier using bulk materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122627. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122627.
- [50] KAUR Y, TACHIKAWA S, SWINKELS M Y, et al. Thermal rectification in telescopic nanowires: Impact of thermal boundary resistance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(1): 1883-1891.
- [51] HUA R J, JIANG Y L, ZHAO Z G, et al. Subdiffusive and superdiffusive phonon transport induced significant thermal rectification across a one-dimensional Kapitza interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 234: 126113. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126113.
- [52] VOZEL K, KITANOVSKI A. Numerical study of macroscopic thermal diodes: Influence of interface topography and contact resistance[J]. iScience, 2025, 28(11): 113724. DOI: 10.1016/j.isci.2025.113724.
- [53] YANG B, YANG Y Q, LI L, et al. Study on thermal properties of triangular graphene with different boundary types[J]. Micro and Nanostructures, 2022, 166: 207213. DOI: 10.1016/j.micrna.2022.207213.
- [54] POULOS M, TERMENTZIDIS K. Thermal rectification and phonon properties in partially perforated graphene[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 255: 127630. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127630.
- [55] CHEN W J, FENG B, SHAO C, et al. Asymmetrical carbon nanotubes exhibit opposing thermal rectification behaviors under different heat baths[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 184: 122341. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122341.
- [56] YOUSEFI F, FARZADIAN O, SHAFIEE M. Spontaneous heat current and ultra-high thermal rectification in asymmetric graphene: A molecular dynamics simulation[J]. Nanotechnology, 2025, 36(13): 135401. DOI:10.1088/1361-6528/ada9a5.
- [57] TAVAKOLI A, MAIRE J, BRISUDA B, et al. Experimental evaluation of thermal rectification in a ballistic nanobeam with asymmetric mass gradient[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 7788. DOI:10.1038/s41598-022-11878-2.
- [58] LEE J, CHA S, LEE B H, et al. Solid-state thermal rectification of bilayers by asymmetric elastic modulus[J]. Materials Horizons, 2023, 10(4): 1431-1439.
- [59] ROMERO-BASTIDA M, POCEROS VARELA A. Thermal rectification in segmented Frenkel-Kontorova lattices with asymmetric next-nearest-neighbor interactions[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2024(8): 083202. DOI:10.1088/1742-5468/ad5c5a.
- [60] JIANG C, YANG X, HE X M, et al. Janus particles stabilized asymmetric porous composites for thermal rectification[J]. Nature Communications, 2025, 16: 5650. DOI: 10.1038/s41467-025-60792-4.
- [61] LAHKAR S, RANGANATHAN R. Competing mechanisms govern the thermal rectification behavior in semi-stochastic polycrystalline graphene with graded grain-size distribution[J]. Carbon, 2024, 218: 118638. DOI:10.1016/j.carbon.2023.118638.
- [62] HAHN K R, MELIS C, COLOMBO L. Thermal conduction and rectification phenomena in nanoporous silicon membranes[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2022, 24(22): 13625-13632.
- [63] WANG Y F, ZHANG X B, LIU S, et al. Thermal-rectified gradient porous polymeric film for solar-thermal regulatory cooling[J]. Advanced Materials, 2024, 36(26): 2400102. DOI: 10.1002/adma.202400102.
- [64] WANG Y F, LIU S, ZHANG X B, et al. Thermal-rectified gradient porous nanocomposite film enabling multiscenario adaptive radiative cooling[J]. ACS Nano, 2025, 19(20): 19328-19339.
- [65] XIANG J H, LI Y W, CHEN Z P, et al. Design and experimental analysis of a novel thermal diode with asymmetric heat transfer inspired by feather[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208: 109434. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2024.109434.
- [66] KUMAR K, SAHOO B K. Asymmetric heat conduction in InGaN/GaN interface: Exploring the mechanisms of thermal rectification [J]. Materials Letters, 2025, 382: 137916. DOI:10.1016/j.matlet.2024.137916.
- [67] SHIMOKUSU T J, ZHU Q, RIVERA N, et al. Time-periodic thermal rectification in heterojunction thermal diodes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 182: 122035. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122035.
- [68] KANG H, YANG F, URBAN J J. Thermal rectification via heterojunctions of solid-state phase-change materials[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(2): 024034. DOI: 10.1103/physrevapplied.10.024034.
- [69] ZHANG Y F, LV Q, WANG H D, et al. Simultaneous electrical and thermal rectification in a monolayer lateral heterojunction[J]. Science, 2022, 378(6616): 169-175. DOI:10.1126/science.abq0883.
- [70] WANG H D, ZHOU Y H, XIE S Q, et al. Moiré-engineering-induced counteractive control of thermal and electrical transport in MoSe₂/WSe₂ heterostructure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(41): 57403-57413.
- [71] KUO D M T. Thermal rectification through the topological states of asymmetrical length armchair graphene nanoribbons heterostructures with vacancies[J]. Nanotechnology, 2023, 34(50): 505401. DOI:10.1088/1361-6528/acf93a.
- [72] BURENKOV A, PICHLER P. Radial thermal transport from heated silicon nanowires: Molecular dynamics simulations and compact engineering models[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 69: 106056. DOI:10.1016/j.csite.2025.106056.
- [73] VERDIER M, LACROIX D, TERMENTZIDIS K. Effect of the amorphization around spherical nano-pores on the thermal conductivity of nano-porous Silicon[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 785: 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/785/1/012009.

- [74] 刘蕊. 二氧化钒纳米粉体制备及相变特性调控研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- LIU R. Preparation of vanadium dioxide nanopowders and regulation of phase transition characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [75] WANG C H, BIAN H, PAN C C, et al. Near-field thermal rectification via an InSb/graphene/3C-SiC-nanowire heterostructure [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 194: 108581. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108581.
- [76] LI Q Z, CHEN Q, SONG B. Giant radiative thermal rectification using an intrinsic semiconductor film[J]. Materials Today Physics, 2022, 23: 100632. DOI:10.1016/j.mtphys.2022.100632.
- [77] LI Q Z, CHEN Q, SONG B. Fundamental limit to the rectification of near-field heat flow: The potential of intrinsic semiconductor films[J]. Physical Review B, 2022, 106(7): 075408. DOI:10.1103/physrevb.106.075408.
- [78] ZHU Q, ZDROJEWSKI K, CASTELLI L, et al. Oscillating gadolinium thermal diode using temperature-dependent magnetic forces[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(44): 2206733. DOI:10.1002/adfm.202206733.
- [79] ZHANG Y, LI B T, SUN P F, et al. Thermal p-n junctions: A macroscopic thermal diode based on heterogeneous materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 522: 167537. DOI:10.1016/j.cej.2025.167537.
- [80] CASTELLI L, ZHU Q, SHIMOKUSU T J, et al. A three-terminal magnetic thermal transistor[J]. Nature Communications, 2023, 14: 393. DOI:10.1038/s41467-023-36056-4.
- [81] LIU J, LIU Y, YANG L, et al. Climatic and seasonal suitability of phase change materials coupled with night ventilation for office buildings in Western China[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 356-373. DOI:10.1016/j.renene.2019.08.069.
- [82] YANG H Y, WANG Y Z, YU Q Q, et al. Composite phase change materials with good reversible thermochromic ability in delignified wood substrate for thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 212: 455-464. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.12.006.
- [83] CASTELLI L, KUMAR M V, WEHMEYER G. Multi-season passive variable insulation for buildings using magnetic thermal diodes[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(11): 102283. DOI:10.1016/j.xcrp.2024.102283.
- [84] XIANG J H, LIU J G, YANG W Q, et al. Development of novel thermal diode based on improved check valve and modified wick structure[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 200: 108977. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2024.108977.
- [85] ISLAM M R, LIU Y Z, KAREEKUNNAN A, et al. Room temperature thermal rectification in suspended asymmetric graphene ribbon[J]. Nanotechnology, 2024, 35(36): 365401. DOI: 10.1088/1361-6528/ad555d.
- [86] CHEN R N, CRAVEN G T. The effect of temperature oscillations on energy storage rectification in harmonic systems[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2024, 36(40): 405201. DOI:10.1088/1361-648X/ad5d40.
- [87] ZHANG G, COTTRILL A L, KOMAN V B, et al. Persistent, single-polarity energy harvesting from ambient thermal fluctuations using a thermal resonance device with thermal diodes[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115881. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115881.
- [88] HUANG J P. Thermal metamaterial: Geometric structure, working mechanism, and novel function[J]. Progress in Physics, 2018, 38 (6): 219-238. DOI:10.13725/j.cnki.pip.2018.06.001.
- [89] XUE M Z, WANG J, XIA G D. Thermal diode with switchable cloaking effect enabled by asymmetric temperature-dependent thermal conductivity[J]. Chinese Physics B, 2025, 34(11): 114403. DOI:10.1088/1674-1056/ae118b.
- [90] DU P H, KAWAZOE Y, SUN Q. Unconventional thermal rectification in assemblies of supertetrahedral T3-type $\text{Sn}_4\text{In}_6\text{Se}_{20}$ clusters[J]. Nano Letters, 2024, 24(49): 15501-15508.
- [91] HE H Y, PENG W X, LE FERRAND H. Thermal rectification in modularly designed bulk metamaterials[J]. Advanced Materials, 2024, 36(8): 2307071. DOI:10.1002/adma.202307071.
- [92] DING Q Y, WANG Y H, XIONG G Q, et al. Snap-through thermomechanical metamaterials for high-performance thermal rectification[J]. Advanced Engineering Materials, 2026, 28(1): 2501280. DOI:10.1002/adem.202501280.
- [93] SHIMOKUSU T J, NATHANI A, LIU Z, et al. Teflon AF-coated nanotextured aluminum surfaces for jumping droplet thermal rectification[J]. Advanced Materials Interfaces, 2024, 11(13): 2300817. DOI:10.1002/admi.202300817.