

微纳尺度热能调控的声子学元器件研究进展

徐象繁 杨诺 李保文[†]

(同济大学声子学与热能科学中心 同济大学物理科学与工程学院 上海 200092)

2012-12-06收到

[†] Email: phononics@tongji.edu.cn

DOI:10.7693/wl20130303

The development of basic phononic components for thermal energy management/control in nano/micro structures

XU Xiang-Fan YANG Nuo LI Bao-Wen

(Center for Phononics and Thermal Energy Science, School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

摘要 声子是半导体材料中热能的主要载体。通过对声子调控的深入研究,人们可以为微纳电子器件散热和热能转换提供有效的解决方案。文章介绍了热能调控声子学元器件的研究进展,重点阐述了理论上如何利用微纳结构材料构建声子学基本单元——热二极管/热整流器。此外,文章还介绍了该领域的关键测量技术和实验进展,包括热整流器和热存储器设计与实现。最后对声子学研究的发展趋势进行了展望,并提出了存在的困难和挑战。

关键词 声子学, 元器件, 微纳米材料, 热二极管, 固态热整流器, 固态热存储器

Abstract Manipulating phonons in nano/micro structures will shed new light on heat energy control and conversion. Here, we briefly review the recent progress in the development of basic components of functional thermal devices. Special attention will be given to theoretical modeling of thermal diodes in nano/micro structures. The experimental realization of thermal rectifiers and thermal memories will also be discussed. Finally, a brief discussion on the challenges and future prospects will be given.

Keywords phononics, functional thermal devices, nano/micro structures, thermal diode, solid-state thermal rectifier, solid-state thermal memory

1 引言

在过去的半个多世纪里,现代电子学和光电子学技术的发展和应用在各个方面影响和改变着我们的生活。小到智能手机、掌上电脑和汽车,大到飞机和航天科技,微电子芯片都是其大脑和核心。这一切都要归功于建立在量子物理学原理基础上的微电子学的发展,使得科学家能在半导体中精确地控制电流的大小和方向。

通常来说,电子只能在金属和半导体中流动;而声子,即晶格振动,却能在任何材料中“流动”。同时,声子还是半导体和绝缘材料中热能的主要载体。因此,如果能像调控电子一样对声子进行有效的调控,那么我们不仅仅可以扩展目前基于微电子和光子技术的信息产业,而且还可以很好地操控和利用热能,为即将来临的第三次工业浪潮——能源革命做出贡献。

但是,不同于电子和光子,声子并不是一种真实粒子,而是一些没有质量、不带电荷的由晶格振动形成的能量团。声子不受电场和磁场直接影响,因此控制声子要比控制电子难很多。那么,精确地控制声子传输和制造实用功能的“声子学”器件是否只是科学家的一个梦想呢?

近年来,微米、纳米领域研究的快速发展,特别是以碳纳米材料为代表的大量研究成果,对这个问题做出了积极回答。

要研究固体中的声子并实现对其有效调控,必须先提到声子的两个微纳米尺度的特征长度:波长和平均自由程。当一个材料的尺寸接近声子特征长度时,其声子数量会显著降低,从而使得科学家们可以更加容易地实现对声子的调控。因此,为了控制热流,一个最直接有效的方法便是设计出尺寸与声子特征长度相当的器件。这就决定了微纳米结构材料(如纳米管、纳米线和石墨烯等)在声子学研究领域中的重要地位。

在过去的二十年时间内,科学家们提出了声子学的各种元器件,如热二极管^[1-4]、热三极管^[5]、热逻辑门^[6]和热存储器^[7,8]等。随着这些元器件理论模型的提出和实验上的实现,声子控制领域吸引了全世界众多科学家的关注,并已成为一个新兴的研究领域。值得一提的是,2012年7月美国物理学会《现代物理评论》(*Review of Modern Physics*)发表了第一篇关于声子调控的综述文章^[9],预示着“声子学”雏形正在逐步形成。

本文简单介绍基于真实纳米材料声子学元器件的模拟计算和实验结果,提出如

何在微纳米材料中实现热整流器和热存储器等元器件。第二部分简要阐述声子学元器件的理论模拟结果，主要集中在对碳纳米材料的模拟计算方面。第三部分介绍几个重要实验，如固态热整流器和热存储器的设计与实现。第四和第五部分分析声子学领域存在的挑战，并对该领域研究前景给予肯定。

关于热二极管和热三极管的工作原理，读者可以参考王雷和李保文发表在 *Phys. World*^[10] 和《物理》^[11] 上的评述文章；关于声子学领域系统的介绍可参考李念北等人在 *Review of Modern physics*^[9] 上的综述文章；关于声子在微纳米尺度中的反常传输行为，可参考刘莎等人的综述文章^[12]。

2 声子学基本元器件的理论模拟

由于尺寸效应，体块材料和纳米材料的声子谱是不一样的。常见体块材料中的声子，其频率是连续变化的。而在纳米材料中，由于其尺寸远小于体块材料并接近于声子波长，从而导致声子模式数量显著减少，并且由连续变成离散^[13]。因此，在纳米材料中比较容易实现对离散声子的控制。

研究发现，在纳米结构材料中比较容易实现热整流/热二极管。目前对热二极管的研究工作主要集中在具有非对称性的纳米结构方面^[14-24]，例如碳纳米锥(图1(a))^[14,15]，梯形石墨烯纳米带(图1(b))^[17]，非对称矩形石墨烯纳米带(图1(c))^[17,18,24]，非对称三端石墨烯纳米带(图1(d))^[16,18]，莫比乌斯(Möbius)石墨烯纳米带(图1(e))^[19]，Y型石墨烯纳米带(图1(f))^[23]，以及界面结构^[25]等。

下面以碳纳米锥为例，利用原子尺度的分子动力学模拟来解释纳米结构中的热阻不对称性，即热整流物理现象。所谓热阻不对称性，就是当系统温度梯度方向改

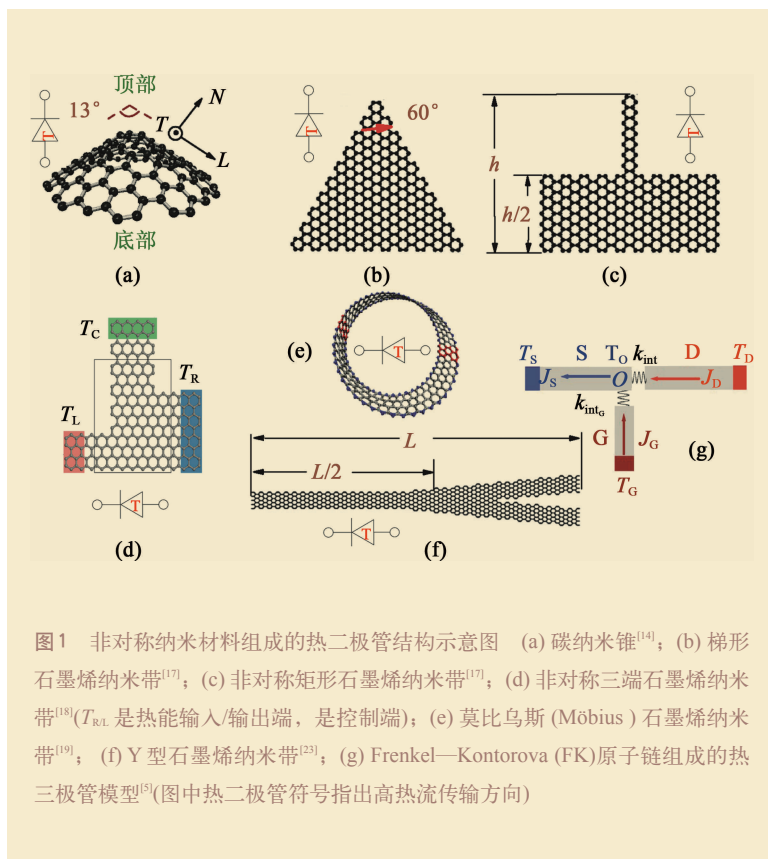


图1 非对称纳米材料组成的热二极管结构示意图 (a) 碳纳米锥^[14]；(b) 梯形石墨烯纳米带^[17]；(c) 非对称矩形石墨烯纳米带^[17]；(d) 非对称三端石墨烯纳米带^[18]($T_{R,L}$ 是热能输入/输出端，是控制端)；(e) 莫比乌斯(Möbius)石墨烯纳米带^[19]；(f) Y型石墨烯纳米带^[23]；(g) Frenkel—Kontorova (FK)原子链组成的热三极管模型^[5](图中热二极管符号指出高热流传输方向)

变时，其热流的方向和大小同时发生改变。在模拟计算中，首先设定碳纳米锥顶部和底部的温度分别为 $T_t = T_0(1-\Delta)$ 和 $T_b = T_0(1+\Delta)$ 。其中，二者的平均值为 T_0 ，并用 Δ 表示归一化的温差。这样就可以在纳米结构中建立温度梯度并产生定向热流。为了定量描述热流值的不对称程度，我们定义了热整流率 $R \equiv 100\% \times (J_+ - J_-) / J_-$ 。其中 J_+ 是正向热流，即底部加高温、顶部加低温时的系统热流(方向是从下向上)；而 J_- 为反向热流，即上下端对调温度后的热流(方向是从上向下)。

图2为对碳纳米锥施加正、负温度梯度得到的热整流结果。类比于电子二极管中的 $I-V$ 曲线，图2(a)展示了热流随温差的变化。在碳纳米锥两端加正的温度差时($\Delta > 0$)，热流从底端流向顶端，此时热流值随着温差的变大显著上升。当碳纳米

锥中加负的温度梯度时，热流从顶端流向底端，此时热流值偏小并且随着温差的变化不大。换言之，在正的温差下，碳纳米锥表现为热的良导体，而在负温差时，热导会显著降低(近似于热绝缘体)。类似电子二极管具有的特点，热二极管的整流率也同样随着偏差程度 $|\Delta|$ 的增加而增大(图 2(b))。

此外，我们还研究了增大热整流率的方法。具体的模型是在具有几何梯度的纳米锥模型上添加质量梯度，即位于最顶端的圆环的原子为质量最小的原子(C12)，随着圆环半径的增大，原子的质量逐渐增大到质量 4 倍于 C12 的原子。模拟计算得到，当 $|\Delta|=0.05$ 的时候，在纳米锥中所得的热整流率 R 为 2%；而加入质量梯度的纳米锥可以得到更高的热整流率(12%) (图 2 (b))。该理论模型可类比实验中利用碳纳米管实现的热整流器，即用 5 倍重于碳原子的粒子逐渐沉积在碳纳米管上(图 4)，从而产生质量的梯度^[4]。对碳纳米锥的模拟计算结果表明，几何梯度在纳米体系中会产生热整流效果。如果加入质量梯度，可以得到更高的热整流效率。

如上所述，目前对纳米材料的研究结果证明，声子器件不只是纯粹理论猜想，其最高的热整流率可以达到数百。当然，

这个数值不仅离实际应用要求有很大的距离，而且远远低于利用一维模型模拟的结果。我们通过研究两段一维原子链模型(一段是 Fermi—Pasta—Ulam (FPU) 原子链，一段是 Frenkel—Kontorova (FK) 原子链)，证实理论上可以得到更高的整流率，最高可以达到数万^[26]。因此，为了实现声子学器件在实际中的应用，仍然需要继续探索新的物理机制并寻找更适合的纳米材料。

比简单的热整流更进一步的热流控制就是热流的开关、调节和放大。类似于电子三极管，这些工作由热三极管(图 1(g))来完成。关于热三极管的原理，这里不做详细介绍，有兴趣的读者可以参考相关文献 [5, 6]。

3 声子学基本元器件的实验进展

3.1 微纳米材料热导测量方法

虽然微纳米材料热学性质的理论和模拟计算都取得了比较大的进展，但是实验工作却鲜有报道。主要是因为微纳米材料热导测量存在很大困难。要实现声子学基本元器件，需要在微纳米尺度上实现对热

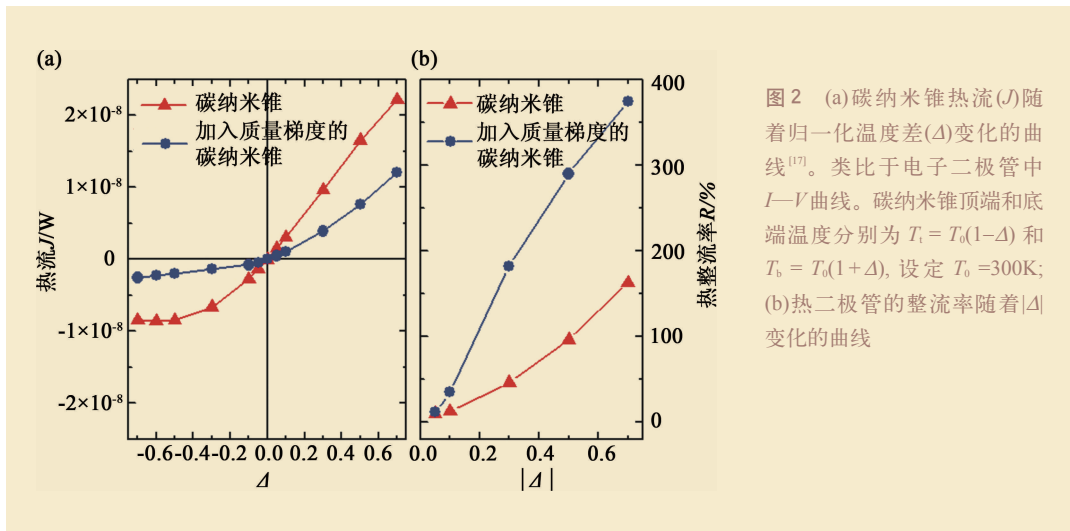


图 2 (a)碳纳米锥热流(J)随着归一化温差(Δ)变化的曲线^[17]。类电子二极管中 $I-V$ 曲线。碳纳米锥顶端和底端温度分别为 $T_t = T_0(1-\Delta)$ 和 $T_b = T_0(1+\Delta)$, 设定 $T_0 = 300\text{K}$; (b)热二极管的整流率随着 $|\Delta|$ 变化的曲线

流大小的精确测量和热流流向的控制。然而通常采用的 3ω 方法(用频率为 ω 的交流电为样品加热,同时测量与热导相关的频率为 3ω 的电压信号)虽然可以准确测量半导体纳米管和纳米线的热导^[27, 28],但是无法控制其热流方向;而传统体材料测量所采用的加热器和温度计因为尺寸过大也无法实现对微纳米结构热导的测量。

为解决纳米材料热导测量问题,美国加州大学伯克利分校的Kim^[29]等人结合了电子束曝光和纳米机械手等实验手段,制备出第一个可测量纳米管和纳米线热学性能的微机电器件(MEMS)。受此启发,我们在6英寸硅片上集成了几千片该类型MEMS(图3(a), (b)),成功地测量了纳米线^[30]和悬空石墨烯的热导率^[31, 32]。基于这项测量技术,我们在实验上实现了热存储器^[8](图6和图7),为测量纳米尺度声子学器件提供了实验平台。

简单来说,该器件由两个悬空SiN_x平台组成,每个平台上用热蒸发或电子束蒸发沉积一个铂电阻丝。这些铂电阻丝即为加热器R_h和传感器R_s,用来作为样品的热源及温度计(图3(c))。每个平台由6根悬空的Pt/SiN_x束支撑。所测量的纳米管或纳米线则由纳米机械手转移到两个平台之间(图3(f))。为测量样品热导,首先需要在R_h上加一个直流/交流的混合电流,并将其产生的焦耳热作为热源。该热量有一部分会通过Pt/SiN_x束扩散到环境中,剩下的则通过样品传到R_s上,并使其温度升高。当系统处于热稳态时,Pt/SiN_x热导(σ_{SN})和样品热导(σ_G)可以通过如下公式计算得到:

$$\sigma_{SN} = \frac{Q_h + Q_{SN}}{\Delta T_h + \Delta T_s}, \sigma_G = \frac{\sigma_{SN} \Delta T_s}{\Delta T_h - \Delta T_s}$$

其中 Q_h 和 Q_{SN} 分别为加在R_h和Pt/SiN_x束上的焦耳热量, ΔT_h 和 ΔT_s 为R_h和R_s的温度变化量(可直接由R_h和R_s的电阻变化量转

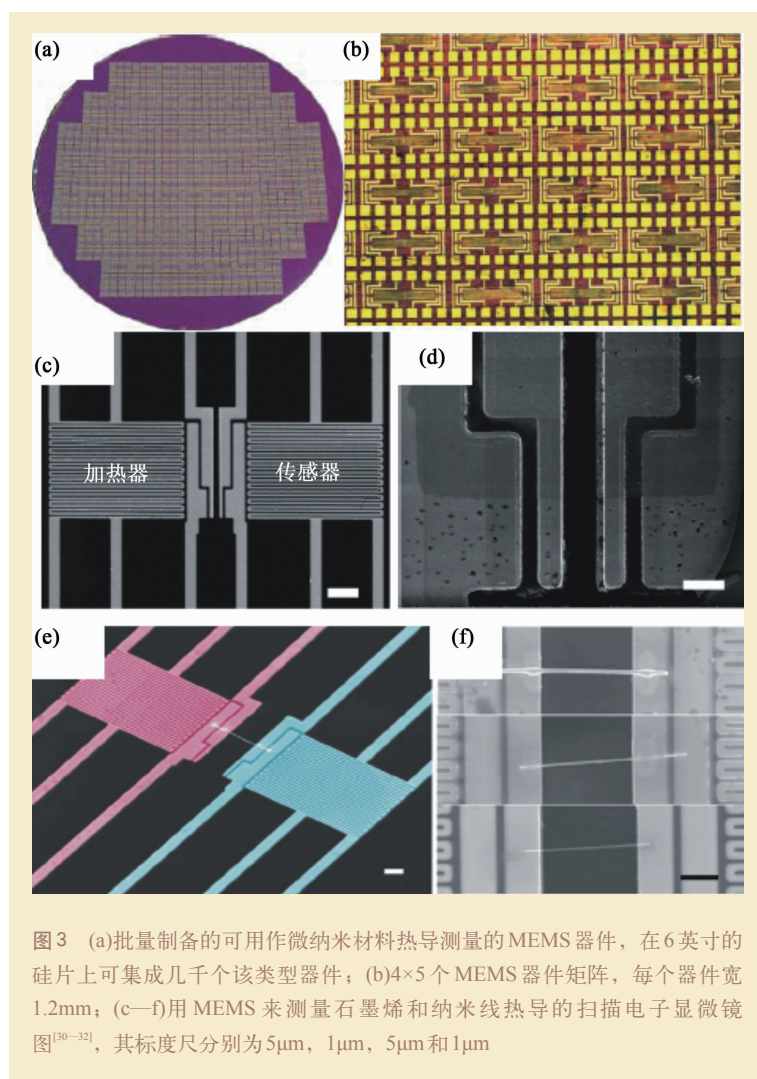


图3 (a)批量制备的可用作微纳米材料热导测量的MEMS器件,在6英寸的硅片上可集成几千个该类型器件;(b)4×5个MEMS器件矩阵,每个器件宽1.2mm;(c—f)用MEMS来测量石墨烯和纳米线热导的扫描电子显微镜图^[30—32],其标度尺分别为5μm, 1μm, 5μm和1μm

换得到)。样品热导率 κ 可由 $\kappa = \frac{\sigma_c l}{A}$ 得到,其中 l 为样品长度, A 为样品截面积。值得一提的是,该器件不仅可以测量微纳米样品热导,还能同时测量样品热电势(S)和电阻率(ρ),因此也可以通过测量热电材料的品质因子(即 $ZT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa}$)来研究材料热电转换效率。

基于如上所述测量技术,研究人员测量了各种低维纳米材料的热导率,如硅纳米线^[33, 34]、碳纳米管(CNT)、氮化硼纳米管(BNNT)^[4, 35]、氧化钒纳米带^[8]、核壳结构(core-shell)硅锗纳米线^[36]、石墨烯^[31, 32, 37]、氧化锌纳米线^[30]等。同时,该测量技术为

研究低维材料的基本热导定律(如尺度效应^[30, 34, 38, 39])提供了可能。

3.2 热整流器

与微电子学类似,实现热整流器对声子学发展起着至关重要的作用。所谓热整流器就是这样一个器件:当热能沿着一个方向流动时,它是热良导体,而沿着相反方向流动时就是热绝缘体。

3.2.1 一维固态热整流器

在提出热二极管模型两年之后,加州大学伯克利分校的研究人员便在实验室里实现了微纳米尺度热整流器^[4]。高热导率及非线性热扩散等特殊性质^[38]使得碳纳米管(CNT)和氮化硼纳米管(BNNT)等一维材料成为实现热整流器的良好材料。通常来说,形状及密度分布均匀的一维材料没有热整流效应。因此,张之威博士等人^[4]对

CNT和BNNT做了一些表面修饰,从而实现了在纳米管纵向上的形状和质量分布的不均匀性,如图4(a)插图所示。

图4(a)为张之威博士等人制备的热整流器件的扫描电镜照片,其测量方法与上节介绍的相同。他们首先用纳米机械手将CNT或BNNT转移到悬空MEMS器件上,如图4(b)所示。随后, $C_9H_{16}Pt$ 被原位沉积在纳米管一端,从而形成一个非对称形状,如图4(c)所示。该实验在CNT样品上测到的热整流效率为2%,在3个BNNT样品上测到的热整流效率分别为3%,4%和7%。如前所述,观测到的热整流效应可以由不对称的样品形状来解释:不对称样品造成了不对称的声子一边界散射,使得声子在热流的一个方向上受到的散射要远大于另外一个方向。

虽然实验测量所得的热整流效应很低,离实际应用还有很大一段距离,但是这个实验结果验证了理论所预言的热二极管,使得声子学应用和声子计算机有了实现的可能。同时,除了作为信息传播的载体外,热整流器也可以发展设计为一种新的隔热材料,在特定情况下可以良好地导热,而在某些情况下则具有好的阻热特性。

3.2.2 氧化石墨烯热整流器

二维材料石墨烯因具有优越的热学、电学、光学及力学性能而成为最近几年研究的热点^[40]。它室温的热导率高达 $4000\text{--}5150\text{W/m}\cdot\text{K}$,可以和金刚石相媲美^[41]。同时,形状柔软、可塑性强使得它成为实现声子学元器件的重要原材料(图1)。然而,石墨烯是由单层碳原子组成的厚度只有 0.34nm 的薄膜,因此要在实验上实现基于单层石墨烯的热学元器件非常困难。庆幸的是,研究人员在还原的氧化石墨烯纸片(*reduced graphene oxide*,简称rGO)中也观察到了宏观尺度热整流效应^[42]。

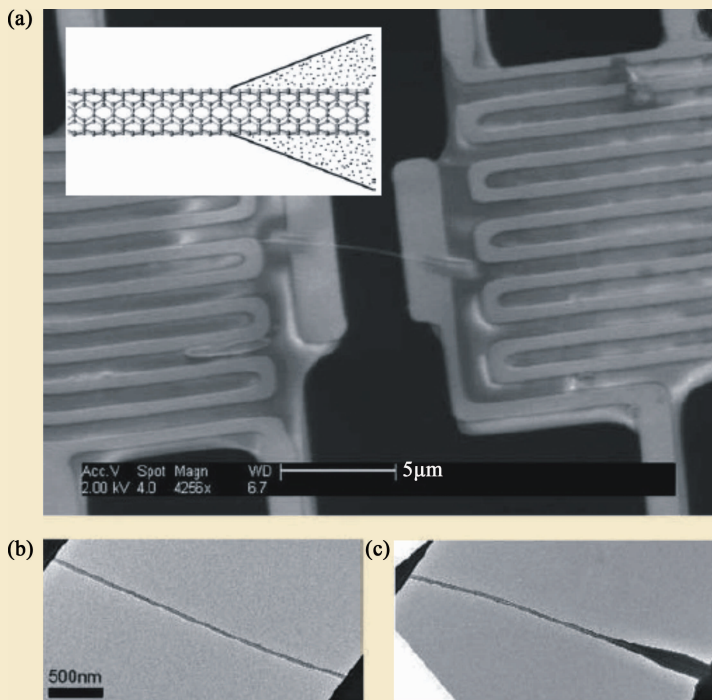


图4 第一个固态热整流器^[44] (a)器件的扫描电镜照片,中间的细线为多壁碳纳米管。插图为非对称的纳米管示意图,右边的黑点为无定型的 $C_9H_{16}Pt$; (b)和(c)分别为沉积 $C_9H_{16}Pt$ 前、后的低倍透射电镜照片

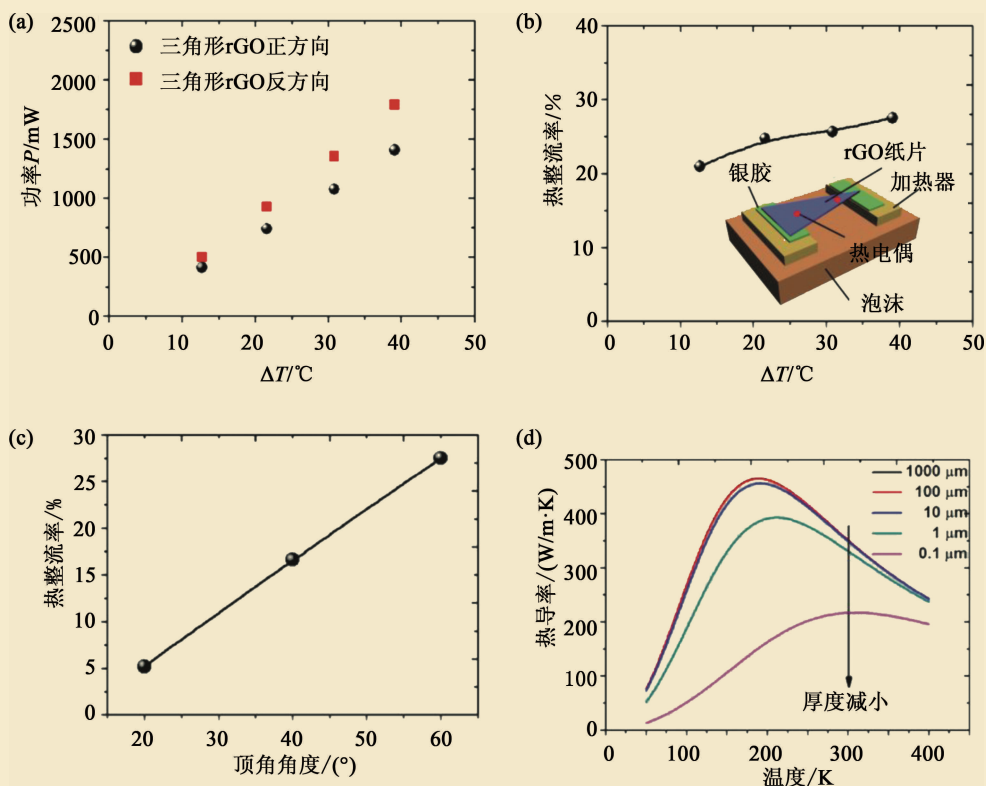


图5 基于还原氧化石墨烯纸片rGO的热整流器^[42] (a)顶角为60°的三角形rGO热整流器在不同热流方向上的热量和温度关系图；(b)热整流效率与温差的关系图，插图为所测量样品的示意图；(c)热整流效率与顶角角度的关系图；(d)不同厚度的rGO的热导率与温度关系图

图5(b)中插图为该热整流器的实验示意图。采用的样品是三角形rGO，样品长度为19mm，厚度为几十微米。rGO样品两端分别放置一个加热器，用来产生热量并控制热流方向；样品上的温差则由两个热电偶来测量。从图5(a)可以看出，当样品两端温差控制在一定量值时，从一个方向流过的热流比另一个方向要大，表示在这一体系中存在热整流效应。同时，当样品两端温差升高时，热整流效应也相应增加(图5(b))。研究人员还发现，该器件的热整流效应与样品形状及不对称性有关。当将三角形rGO的顶角从20°增加到60°时，热整流效率从5%增加到了26%(图5(c))。

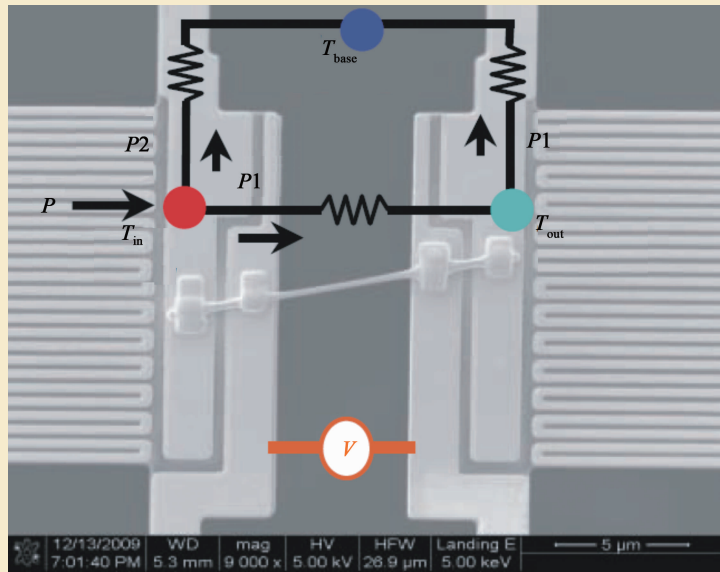
对于该实验测量到的宏观体块材料热整流效应，可以由如下的模型解释。理论模拟显示，对于不同厚度的rGO，其热

导率随温度变化的曲线不一样(图5(d))。当热流在一个方向流动时，样品整体处在“高热导”状态；相反，当热流往相反方向流动时，样品整体处在“低热导”状态，从而导致了热整流效应。基于相同的机制，Sawaki^[43]等人在LaCoO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}CoO₃体材料中也发现类似现象，观察到的热整流效率可高达35%。体块材料中的热整流效率由于受到其机制的限制，因而不能达到声子器件的应用要求。

3.3 固态热存储元器件

在热存储器件模型^[7]提出仅两年之后，研究人员通过控制氧化钒(VO₂)纳米带的热导率，在实验上实现了固态热存储器件^[8]。采用的热存储器由3个部分组成：输入端(T_{in})，输出端(T_{out})，以及连接输入

图6 利用氧化钒(VO_2)纳米带实现固态热存储器^[8]。热存储器由3个部分组成:输入端(T_{in}),输出端(T_{out}),以及连接 T_{in} 和 T_{out} 的导热通道(中间的细线为 VO_2 纳米带),纳米带上所加的偏压可以调控热存储器的性能



端和输出端的导热通道,如图6所示。输入和输出端为悬空Pt/SiN_x加热平台,其具体结构已在前面做过阐述。这两个平台由一条氧化钒纳米带连接,同时该氧化钒两端可以加电偏压,用以改变热存储器的性能。

当 T_{in} 做一个升温及降温循环时, $T_{in}-T_{out}$ 温度曲线存在着回滞,如图7(a)所示。该回滞表明,对于同一温度的 T_{in} ,存在着两个不同温度的 T_{out} ,即“高温/HIGH”及“低温/LOW”两个状态。例如在0.047V偏压下,当 $T_{in}=368\text{K}$ 时, T_{out} 的两个状态有20K的温差,这是热存储器件最基本的性质。同时,当氧化钒两端的电偏压增加时,回滞也会随之增加,这也是典型的热存储器件特征。该回滞应该是和氧化钒的金属—绝缘相变有关。氧化钒在 $T=340\text{K}$ 时存在第一类相变,使得电阻率和热导率在该温区存在回滞,从而导致了非线性 $T_{in}-T_{out}$ 曲线。

为了测试该热存储器的稳定性和可重复性,研究人员对器件进行了一系列的“读”和“写”测试。如图7(b)所示,对器件进行了150次“读”和“写”,发现器件的“高温/HIGH”及“低温/LOW”两

个状态均非常稳定且有很高的重复性。

4 挑战与展望

虽然近些年声子学获得很大发展^[9],但是该领域的研究仅处于起步阶段。为了制造一系列声子学元器件,并将声子应用于热能调控,我们仍然面临很多理论和实验上的挑战。

在理论方面,最重要的困难是界面热阻处理,因为热整流效应和热二极管都是建立在不对称界面热阻的基础上。例如,梯度纳米材料就含有多个不对称界面的结构。目前普遍采用的界面热阻理论,如声学失配模型(acoustic mismatch model)和扩散失配模型(diffusive mismatch model),都是简单地假设声子以弹道传输或扩散传输的形式通过界面。而最新理论显示,在低维系统中,声子不是以简单的弹道或扩散形式传输,而是以超扩散的形式传输^[12]。在这种反常热传输理论框架下,声子受到的散射比弹道传输要大,但是比扩散传输要小。因此需要建立这样一种新理论模型,在该模型下考虑界面热阻时,需要引

入超扩散传输概念。另一个挑战则与非线性热传输相关：热整流效应来自于非线性热传输，因此在实际操作中需要同时在量子热传输和经典热传输中引入非线性。

在实验方面，最大的挑战同样来自于样品界面热阻。要实现热二极管等声子学元器件，则需要尽可能地降低界面热阻，或者至少能准确地对其进行测量。可惜目前并无统一且有效的测量手段。值得一提的是，最近发展的非接触式电子束加热方法^[31]，可以测量特定材料(如非悬空多层石墨烯或特定的纳米线)的界面热阻，为解决界面热流问题提供了可能。另一个挑战则是如何将声子器件加工得更小，小到与声子特征长度相当，即几十甚至几个纳米。在这样小的尺度下精确地测量热导率还面临很多挑战，不过目前的实验技术已经可以在这样的尺度下进行器件的加工制备。

5 结束语

电脑 CPU 过热，要用风扇给它降温；汽车发动机运行温度太高，则需要对它进行额外冷却处理。但在不久的将来，由于热能的有效利用，这些就会被视为是一种浪费。与几年前相比较，我们对声子有了更加深入的了解。这一切要得益于各国研究人员对该领域前景的肯定和大量的研究投入。值得高兴的是，我国和华裔科学家对声子学研究起着重要的推动作用。在该领域的各个方面，特别是理论模型提出和实验实现方面都能看到他们的身影。

但是为了能让中国科学家继续在微纳米材料设计和性能控制方面不断取得原创性的突破性进展，为关系到国计民生的信息科学技术和新型能源材料等领域提供新思路，我们还有很多工作要做。在人才培养方

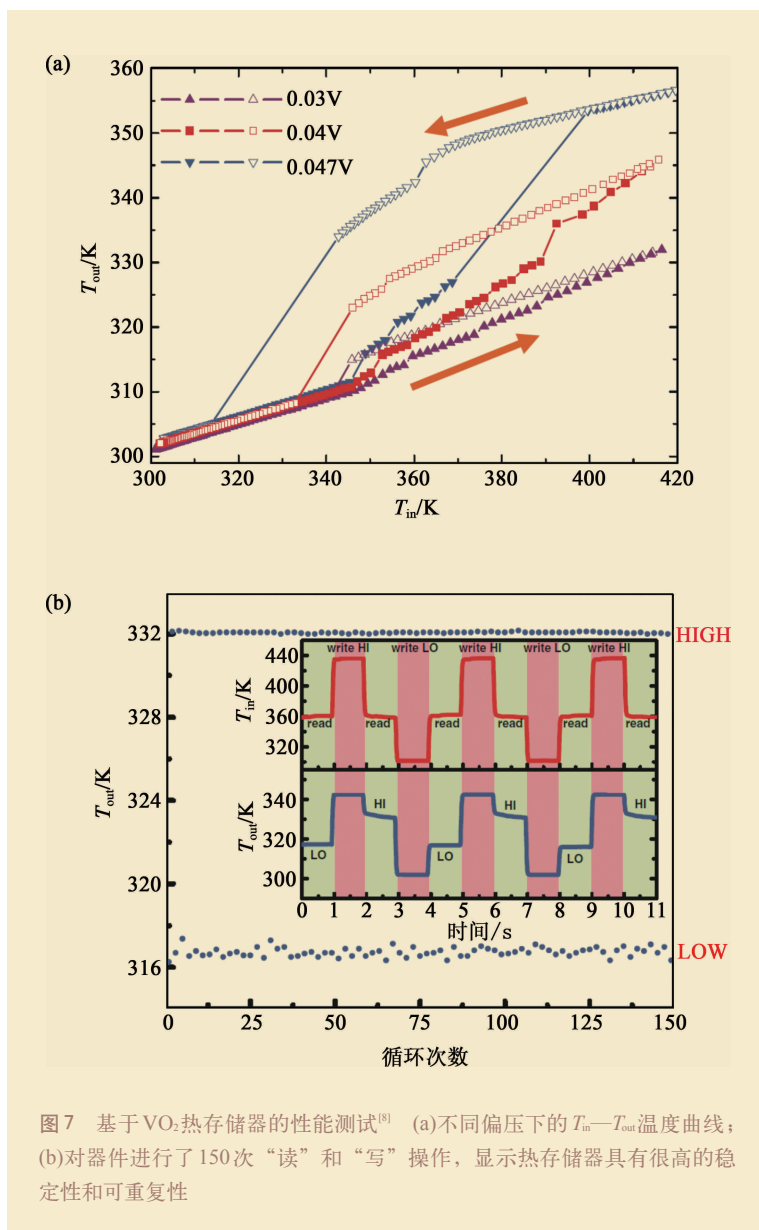


图7 基于VO₂热存储器性能测试^[8] (a)不同偏压下的 T_{in} - T_{out} 温度曲线；(b)对器件进行了150次“读”和“写”操作，显示热存储器具有很高的稳定性和可重复性

面，我们鼓励更多的青年人进入这一领域从事原创性工作，而不必去跟风国外的一些热门领域。声子学是一个跨学科的新兴学科，我们希望它能得到国家相关部门的支持并持续健康地发展，而不愿看到它是现在的非主流学科而渐渐走向没落。

让人高兴的是，同济大学高瞻远瞩，成立了世界第一个“声子学与热能科学研究中心”，专门从事声子学相关基础和应用研究。希望这个中心能为国内外科学家和工程技术人员提供一个研究、交流的平台，共同为声子学和热能科学技术的发展做出贡献。

参考文献

- [1] Terraneo M, Peyrard M, Casati G. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88: 094302
- [2] Li B, Wang L, Casati G. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 184301
- [3] Yang N, Li N, Wang L *et al.* *Phys. Rev. B*, 2007, 76: 020301
- [4] Chang C W, Okawa D, Majumdar A *et al.* *Science*, 2006, 320: 1121
- [5] Li B, Wang L, Casati G. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 143501
- [6] Wang L, Li B. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99: 177208
- [7] Wang L, Li B. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101: 267203
- [8] Xie R, Bui C, Varghese B *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2011, 21: 1602
- [9] Li N, Ren J, Wang L *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2012, 84: 1045
- [10] Li B, Wang L. *Phys. World*, 2008, 21: 27
- [11] 王雷, 李保文. *物理*, 2009, 38: 219
- [12] Liu S, Xu X, Xie R *et al.* *Eur. Phys. J. B*, 2012, 85: 337
- [13] Yang N, Zhang G, Li B. *Nano Today*, 2010, 5: 85
- [14] Yang N, Zhang G, Li B. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93: 243111
- [15] Wu G, Li B. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2008, 20: 175211
- [16] Hu J, Ruan X, Chen Y P. *Nano Lett.*, 2009, 9: 2730
- [17] Yang N, Zhang G, Li B. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95: 033107
- [18] Ouyang T, Chen Y, Xie Y *et al.* *Phys. Rev. B*, 2010, 82: 245403
- [19] Jiang J W, Wang J S, Li B. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108: 064307/1
- [20] Wang S C, Liang X G. *Int. J. Therm. Sci.*, 2011, 50: 680
- [21] Zhong W R, Huang W H, Deng X R *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99: 193104
- [22] Wu G, Li B. *Phys. Rev. B*, 2007, 76: 085424
- [23] Zhang G, Zhang H. *Nanoscale*, 2011, 3: 4604
- [24] Wang Y, Chen S, Ruan X. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100: 163101
- [25] Hu M, Keblinshi P, Li B. *Appl. Phys. Lett.*, 2008: 211908
- [26] Li B, Lan J H, Wang L. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 104302
- [27] Lu L, Yi W, Zhang D L. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, 72: 2296
- [28] Hone J, Whitney M, Piskoti C *et al.* *Phys. Rev. B*, 1999, 59: R2514
- [29] Kim P, Shi L, Majumdar A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87: 215502
- [30] Bui C, Xie R, Zheng M *et al.* *Small*, 2012, 8: 738
- [31] Wang Z, Xie R, Bui C *et al.* *Nano Lett.*, 2011, 11: 113
- [32] Xu X, Wang Y, Zhang K *et al.* *arXiv:cond-mat/1012.2937(2010)*
- [33] Hochbaum A I, Chen R, Delgado R D *et al.* *Nature*, 2008, 451: 163
- [34] Chen R, Hochbaum A I, Murphy P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101: 105501
- [35] Shi L, Li D, Yu C *et al.* *J. Heat Transfer*, 2003, 125: 881
- [36] Wingert M, Chen Z, Dechaumphai E *et al.* *Nano Lett.*, 2011, 11: 5507
- [37] Pettes M, Jo I, Yao Z *et al.* *Nano Lett.*, 2011, 11: 1195
- [38] Chang C W, Okawa D, Garcia H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101: 075903
- [39] Hippalgaonkar K, Huang B, Chen R *et al.* *Nano Lett.*, 2010, 10: 4341
- [40] Geim A K, Novoselov K S. *Nature Materials*, 2007, 6: 183
- [41] Balandin A A, Ghosh S, Bao W Z *et al.* *Nano Lett.*, 2008, 8: 902
- [42] Tian H, Xie D, Yang Y *et al.* *Sci. Rep.*, 2012, 2: 523
- [43] Sawaki D, Kobayashi W, Moritomo Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98: 081915
- [44] Chang C W, Okawa D, Majumdar A *et al.* *Science*, 2006, 314: 1121