

TDTR 法测量高压高温下 ZnO 各向异性热导率

樊轩辉 张中印 周敬 苑昆鹏 祝捷 唐大伟

(大连理工大学能源与动力学院, 大连 116000)

摘要 采用飞秒激光时域热反射法结合金刚石对顶砧装置与高温热台装置, 实现了在 0~8 GPa 以及 300~873 K 下不同晶向 ZnO 的热性能表征。发现高压和高温下铅锌矿 ZnO 的热导率均存在各向异性, 且热导率的压力依赖性呈非单调变化, 热导率的温度依赖性呈单调变化。该研究有助于对高压和高温下宽带隙半导体的内部热输运机理的深入理解, 并为寻找高热电优值材料提供思路。

关键词 飞秒激光时域热反射法; 金刚石对顶砧; 热导率; 各向异性; 氧化锌

中图分类号: O52 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2023)10-2866-06

Anisotropic Thermal Conductivity of ZnO at High Pressure and High Temperature by TDTR Method

FAN Xuanhui ZHANG Zhongyin ZHOU Jing YUAN Kunpeng ZHU Jie TANG Dawei

(Dalian University of Technology School of energy and power, Dalian 11600, China)

Abstract The thermal properties of ZnO with different crystal orientations were characterized by the time-domain thermoreflectance method combined with a diamond anvil cell and a heating stage in 0~8 GPa and 300~873 K. It is found that the thermal conductivity of wurtzite ZnO is anisotropic under both high pressure and high temperature conditions. Meanwhile, the pressure dependence of the thermal conductivity is non-monotonic, while the temperature dependence of the thermal conductivity is monotonic. This research can provide useful insights into the internal heat transport mechanism of wide band-gap semiconductors under high pressure and high temperature, and give ideas for searching for materials with high thermoelectric figure of merit.

Key words time-domain thermoreflectance; diamond-anvil cell; thermal conductivity; anisotropy; ZnO

0 引言

氧化锌 (ZnO) 是一种负电型宽禁带半导体, 其光学透明性高、电学性质可调、无毒, 近年来已广泛应用于薄膜光电^[1]、传感^[2]、高温热电^[3]等材料领域以及高功率电子器件^[4]中, 成为半导体金属氧化物材料的“主力军”。同时, ZnO 良好的压电特性引起了人们对将其用于能量收集的微电源应用的极大兴趣, 如压电纳米发电机^[5]、微流体微泵装置的表面发生器^[6]等。ZnO 的这些优异性质使得其在未来能源动力领域具有潜在且广阔的应用前景。而在这些与能量相关的领域中, 人们对电学和光学性质给予了较大的关注, 但对这些高温、高频电子器件的散热起着关键作用的热输运性质的研究却较少, 而其自加热导致的热点问题及整体的散热情况,

是关系到器件的使用性能、效率和寿命一个重要因素。同时, ZnO 也是一种很有前途的高塞贝克系数的热电材料, 但其高导热性限制了其热电性能。因此, 准确研究其热输运性质对解决相关应用中的温度控制和热电耦合等问题尤为重要。其中, ZnO 晶体作为一种典型的各向异性材料, 除了在电导率、霍尔系数、Seebeck 系数和电子迁移率有显著差异外^[7], 其晶格热导率也存在明显的各向异性, 受到关注。Wu 等^[8]用第一性原理研究了室温下的纤锌矿氧化锌, 沿 (0001) 方向的导热系数比沿 (1000) 方向的导热系数高约 40%。这与 Jiang 等^[9]用变光斑法时域热反射法测得的结果相似, ZnO(0001) 面内和面向的热导率分别为 $44 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 和

收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2023-09-23

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作项目 (No.51720105007); 国家自然科学基金资助项目 (No.51976025); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.DUT22ZD216)

作者简介: 樊轩辉 (1995-), 女, 博士生, 主要从事材料高温高压热输运性能研究。通信作者: 祝捷, 副教授, zhuji@dlut.edu.cn。

$62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。但用扫描热显微镜获得的 ZnO 实验值高得多^[10]。除室温外, Liang 等^[7]发现, 从室温到 750 K, c 轴方向的晶格热导率比 ab 面大 20%, 且温度对晶格热导率的影响很小, 这是由于声子群速度和 umklapp 声子散射速率的各向异性所致。然而, 目前对其热物性的研究存在如下问题: 报道的氧化锌各向异性热导率测量结果存在不一致性; ZnO 在实际应用通常生长在硅片或其他含有天然氧化物的衬底上, 但对两种材料之间界面的热输运研究较少; 同时, 压力可以有效调控材料的物理结构, 尤其对于 ZnO 这种宽带隙半导体, 压力可以减小带隙, 从而改变其热学性质, 但缺乏这方面实验数据。

本文利用 TDTR 方法研究了常压下 (0001)、(10-10) 和 (11-20) 晶向 ZnO 晶体的热导率以及铝 (Al)/ZnO 界面热导率, 同时结合 DAC 技术和高温热台研究了 0~8 GPa 以及 300~873 K 下 (0001) 和 (10-10) 晶向 ZnO 的热学性质。该研究有助于推进高压高温物理等学科的发展, 以及深入理解高压和高温下宽带隙半导体的内部热输运机理。

1 实验系统

1.1 TDTR 系统

飞秒激光时域热反射法 (TDTR) 是基于瞬态热反射法的一种测试方法。实验中激光分为两束: 一束脉冲激光照射被测量样品的表面, 通过将光能转换为热能产生小的温升, 为抽运过程; 另一束激光经位移平台延迟后, 捕捉样品的温度偏移导致的光学性质的变化, 为探测过程。其中, 我们在样品 ZnO 表面利用磁控溅射的方法覆盖一层百纳米的 Al 膜作为加热源和传感层。在温升很小的情况下 (<10 K), 视金属表面反射率与温度呈线性关系, 因此, 通过探测到的样品表面的反射率变化可以间接获得温度随时间的变化, 该温度变化是包括样品结构和热物性的特征函数, 通过拟合传热模型可得出所需要的热导率、界面热导等热物性信息^[11-13]。

实验系统光路图如图 1 所示。系统使用中心波长 783 nm, 脉冲宽度和重复频率分别为 280 fs 和 80 MHz 的 Ti:Sapphire 脉冲激光器, 抽运和探测光的时间差通过 600 mm 的机械位移平台调节, 并通过长通与短通滤波片实现双波长 TDTR 系统, 有效滤除到达探测器的抽运激光束, 提高系统的信噪比。

1.2 高温高压系统

高温条件是通过将样品置于高温热台内实现的。热台配有气氛保护系统和水冷系统, 可满足室

温至 1000°C 的温度范围。通过铂铑热电偶进行温度的准确测量, 并提前通过熔点法进行温度校验。TDTR 系统的抽运光和探测光从石英窗口垂直入射到样品表面, 实现高温条件热物性测量过程。

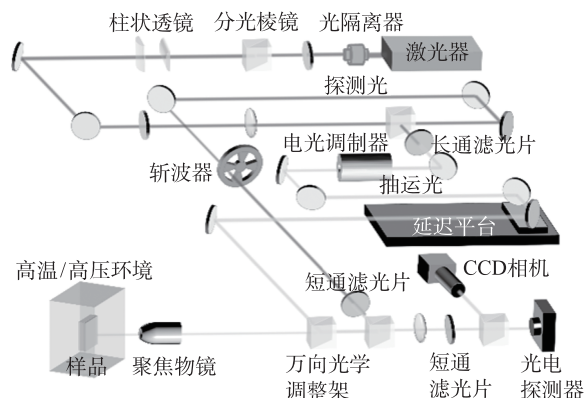


图 1 TDTR 实验系统光路图

Fig. 1 Beam path diagram of TDTR experimental system

实验采用金刚石对顶砧 (DAC) 装置实现高压条件。图 2 是加压过程中样品与红宝石在压力腔中的情况以及红宝石光谱的情况。在 DAC 装置中, 两个具有极小 (直径 300 μm) 砧面的金刚石压砧相对放置, 在其平行面之间放入带孔的金属垫片 (本工作中采用 T301 钢片), 孔壁与砧面共同组成了压力腔。垫片提前经过预压过程, 该过程实现了压力腔密封的同时, 也提高了垫片的屈服强度。ZnO 样品和用于压力测量的红宝石球被共同放置在压力腔中, 同时压力腔中还封有的传压介质, 在理想情况下为样品施加静水压力。从两侧机械挤压金刚石对顶砧, 从而改变压力腔的体积而实现高压条件。TDTR 系统的抽运光和探测光从金刚石压砧底部垂直入射到样品表面, 实现高压热物性测量。为了更准确地计算实验的误差, 我们提前通过在 DAC 装置中均匀封装多个红宝石球进行测压, 得到 DAC 样品腔中的压力分布均匀性, 在 10 GPa 以内压力不均匀性在 0.4 GPa 内。

2 敏感度分析和参数确定

在 TDTR 实验中, 被测量参数的敏感度是非常重要的参数^[13], 实验信号对被测量参数的敏感度越高, 说明信号受到该参数的影响越大, 测量结果的精度也就越大, 反之精度则越低。我们计算了高温高压下各参数灵敏度情况, 部分参数的绝对值如下图所示, 包括 Al 膜和 ZnO 的界面热导 $G_{\text{Al/ZnO}}$, Al 膜的厚度 h_{Al} 和 ZnO 的热导率 k_{ZnO} 。其中高温

下 $G_{\text{Al/ZnO}}$ 在 400 ps 以后、高压下 h_{Al} 在 2400 ps 以前的敏感度原始值为负数。需要注意的是,高温和高压两种工况下用于 TDTR 实验的样品结构不同,传热模型不同:高温条件下,抽运光和探测光直接照射在 Al 膜表面,热量穿过 Al 膜向样品层传递;高压条件下,由于传压介质硅油的存在,抽运光和探测光需透过硅油后照射在 Al 膜表面,热量向样品侧和硅油侧双向传递。

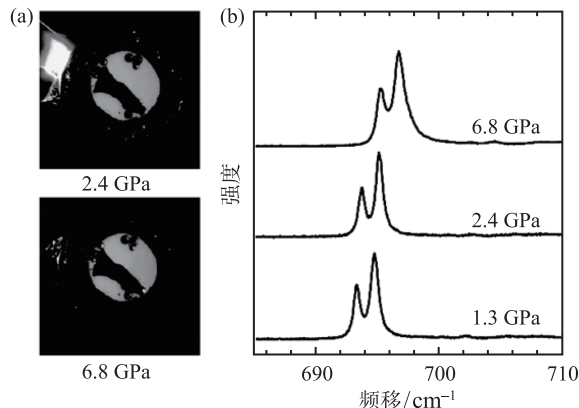


图 2 高压样品情况: (a) 样品显微镜照片; (b) 红宝石光谱
Fig. 2 Sample conditions at high pressure. (a) The sample microscope photographs; (b) ruby spectra at high pressures

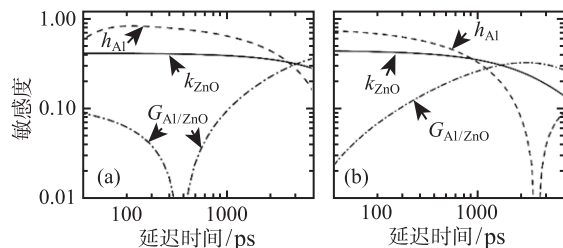


图 3 样品在 (a) 873 K 和 (b) 1.3 GPa 下的敏感度情况
Fig. 3 Sensitivity analysis at (a) 873 K and (b) 1.3 GPa

本工作需得到的参数包括 k_{ZnO} 和 $G_{\text{Al/ZnO}}$, 根据敏感度分析, 高温高压下两者均具有较高的敏感度, 可准确测得。同时, 除了要得出的样品的未知热性质外, 还有许多其他输入参数 (如传感器层的热导率、各层的厚度等) 会影响信号, 为了得到准确的拟合结果, 需要尽可能用多种手段精确地确定这些参数。

在 TDTR 的输入参数中, 必须要考虑与常温常压不同的情况。高温工况下, Al 膜和 ZnO 的热容, Al 膜的热导率会存在温度依赖性, 我们采用文献值^[14,15] 作为相应的输入参数。由敏感度分析得知, Al 膜的厚度是拟合过程中较为重要的一个参数, 该参数不随温度改变, 可以通过 TDTR 信号中 V_{in} 信号的回声情况较为准确地得到, 即皮秒回声法。

高压工况下, 我们采用的 Al 膜、硅油的热容值、硅油的热导率均采用文献值^{[15],[16]}。根据敏感度分析, 高压 Al 膜的热导率对实验结果的影响很小, 所以我们均采用常压下的热导率值。Al 膜的厚度对实验结果影响较大, 但高压下厚度的测量存在困难, 原因是加压过程中, TDTR 的回声信号不明显, 无法采用一般 TDTR 实验采用的常压下的皮秒回声法进行测量; 同时, 由于样品是封装进金刚石对顶砧装置中, 整个加压或者卸压过程中无法拆卸, 进而用其他测量手段进行测量。因此, 我们认为样品分别处于弹性变形和塑性变形阶段。在低压下的弹性变形阶段, 根据文献中铝膜的体积变化^[17] 和 ZnO 基底面内方向的晶格常数变化^[18], 计算得出 Al 膜的厚度; 塑性变形阶段, ZnO 晶体的面积变化只有通过显微镜测量得出, 采用同样方法得出 Al 膜的厚度^[19]。

3 样品表征

常压下 ZnO 为六方纤锌矿结构, 氧原子层和锌原子层呈六方紧密排列, 不对称的结构导致了其热物性上可能存在的各向异性。在本工作中, 分别选取 (0001)、(10-10) 和 (11-20) 三个晶向的 ZnO 样品进行 TDTR 实验, 得到不同晶向 ZnO 样品的径向热导率和 Al/ZnO 界面热导率; 同时我们还利用光束偏移-TDTR 法^[20] 量了 (0001) 晶向样品的面向热导率, 与上述直接测量得到的径向热导率进行对比验证, 实现各向异性热物性研究。

为了进一步准确表征实验样品的晶向, 我们研究了其拉曼光谱, 如图 4(b) 所示。在 ZnO 的振动模式中, 有三个声学模和九个光学模, 只有 A_1 、 E_1 和 E_2 是拉曼活跃的光学模式。其中, A_1 和 E_1 为极性模式, 由于 Zn-O 键的离子特性而表现出纵向 (LO) 和横向 (TO) 两种光学模^[21]; 低频 E_2 模与 Zn 晶格的振动有关; 高频 E_2 模式只涉及氧原子^[19]。在我们样品中可很好地观察到这几种 ZnO 的拉曼特征峰。此外, 在拉曼光谱结果中, 在 203 cm^{-1} , 332 cm^{-1} 和 539 cm^{-1} 处还存在额外的拉曼峰, 这可归因于共振条件下区界声子产生了二阶拉曼光谱, 与文献研究 (205 、 331 和 539 cm^{-1} 处) 保持一致^[22]。同时, 根据 ZnO 中的强键可将与杂质相关的局部振动模式的范围限制在更高频率、更轻的元素上^[19] 的结论, 我们将观察到的其他位置的拉曼峰, 如 519 cm^{-1} 处, 归因于样品中存在极少量杂质的影响。

此外, 我们还对样品的边缘取向方向进行拉曼补充测试, 得出一致的拉曼结果: (0001) 晶向的样品

只观察到非极性的高低频的 E_2 模, 同时低频 E_2 模具有极高的强度和极窄的峰宽, (10-10) 和 (11-20) 晶向的样品中三种光学模式同时存在, 且所有声子模式的频移位置与文献符合良好。结果表明, 实验所采用的 ZnO 样品的晶向较纯, 杂质较少, 适用于后续常压和高压的各向异性实验测量。

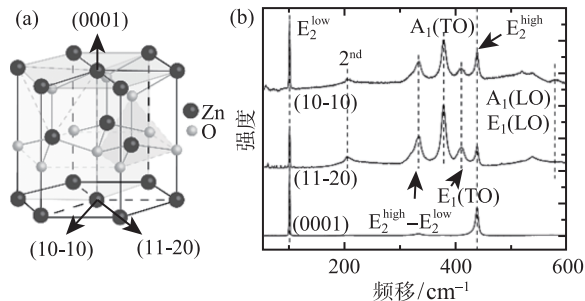


图 4 ZnO 结构表征: (a) 纤锌矿 ZnO 晶格结构; (b) 不同晶向 ZnO 样品拉曼光谱

Fig. 4 Characterization of ZnO structure: (a) Lattice structure of wurtzite ZnO and (b) raman spectra of ZnO with (0001), (10-10) and (11-20) crystal orientations

4 结果与分析

4.1 常温常压各向异性结果

利用 TDTR 方法分别测量了 1.84 MHz、6.22 MHz 和 9.8 MHz 三个频率下不同晶向 ZnO 的热反射信号, 根据理论模型, 对三个频率下信号进行分别拟合与同时拟合, 发现其热导率对频率的依赖性可忽略。TDTR 信号拟合情况如图 5(a)。得到的 ZnO 晶体 (0001) 晶向的热导率为 $61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, (10-10) 和 (11-20) 晶向热导率几乎没有差别, 均为 $51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 误差为 9%。这与 Yuan 等^[23]的第一性原理预测 (热导率在 a 轴和 c 轴分别为 $62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 和 Jiang 等^[9]的实验 ((0001) 晶向热导率为 $(55 \pm 5.6) \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 得到的结果接近。此外, 我们还采用光束偏移的方法, 在延迟时间为 -50 ps 处测量了 (0001) 样品的 V_{out} 信号-光束偏移距离曲线, 如图 5(b) 所示。得到两个垂直方向信号的半高全宽分别为 $9.943 \mu\text{m}$ 和 $10.157 \mu\text{m}$, 拟合得的热导率结果与通过分别测量不同晶向样品的结果保持一致。

根据 Boltzmann 输运方程, 分析 ZnO 中热导率表现出明显的各向异性的原因。声子作为热量的主要携带方式, 热导率可由求解各色散支路上无量纲波矢 \mathbf{q} 的积分函数^[24]得出:

$$k = \sum_{\lambda} \int C_P(\mathbf{q}, \lambda) (v(\mathbf{q}, \lambda) \cdot l)^2 \tau(\mathbf{q}, \lambda) d\mathbf{q}$$

而 ZnO 沿不同晶向声子群速度和散射率的不同, 导致热导率不同。其中 $C_P(\mathbf{q}, \lambda)$ 是声子体积比热容, v 是声子群速度, τ 是声子散射弛豫时间, l 为变换因子。

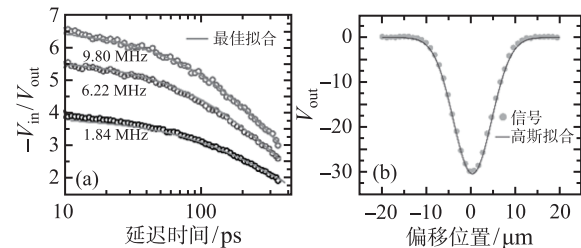


图 5 实验信号与拟合情况 (a) TDTR 三频率同时拟合结果和 (b) 光束偏移拟合情况

Fig. 5 Experimental signal and fitting (a) TDTR fitting results with three frequencies and (b) beam-offset fitting results

我们同时得出了常压下不同晶向的 ZnO 晶体与 Al 之间的界面热导率, 考虑到误差的存在, 我们发现界面热导几乎不受 ZnO 的晶向区别的影响, 均为 $75 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 左右。

4.2 高压各向异性结果

ZnO 晶体在高压下会发生相变, 不同结构中不同的输入参数, 如比热容, 严重影响着 TDTR 结果的准确性。为了准确表征样品在测试压力是否存在相变情况, 我们对不同压力下不同晶向的样品进行了拉曼测量, 如图 6(a)。根据上节所述, (10-10) 和 (11-20) 晶向的热物性没有差别, 所以我们只选取 (10-10) 晶向和 (0001) 晶向的样品进行研究。由图可知, 在 7 GPa 以内, 随着压力 p 的增加, 两个晶向的 ZnO 的拉曼峰情况基本一致, 即没有拉曼峰的增加或者减少, 只伴有峰值频率的移动。结果表明, 在我们测试的压力范围内, ZnO 样品均为铅锌相结构。

利用 TDTR+DAC 测得的实验结果如图 6(b) 所示, 其中, 黑色符号和蓝色符号分别代表 (0001) 和 (10-10) 晶向 ZnO 的 TDTR 实验结果, 实线代表第一性原理理论预测结果^[22]。其中, (10-10) 晶向的热导率误差略大于另一晶向, 是由于镀膜过程中, (10-10) 晶向样品的初始 Al 膜镀膜不均匀性更大一些, 更多地考虑了此部分的误差。实验得到的不同晶向 ZnO 的热导率结果均比理论预测的数值偏高, 但两者趋势符合较好, 都是有先增大后减小的非单调趋势。同时我们发现, 铅锌相 ZnO 的热导率在 7 GPa 以内一直保持各向异性。根据第一性原理解释, 这种非单调的压力依赖性原因在于, 较低压力下, 压力的增加导致了群速度的增加, 声子

寿命的轻微下降, 群速度的增加超过声子寿命的减少, 热导率增加; 压力继续升高, 声子寿命急剧下降, 导致了导热系数的降低 [23]。

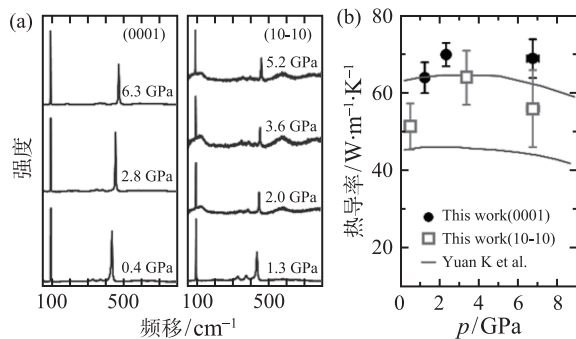


图 6 不同晶向 ZnO 晶体的高压实验结果: (a) 拉曼光谱; (b) 热导率结果

Fig. 6 Experimental result of ZnO with different crystal orientations at high pressure: (a) The Raman spectra results; (b) the thermal conductivity results

4.3 高温各向异性结果

ZnO 作为有前途的替代 GaN 的半导体材料, 其高温下的热物性具有重要意义。室温 ~ 873 K 的 ZnO 热导率情况如图 7 所示。黑色和蓝色符号分别代表 (0001) 和 (10-10) 晶向 ZnO 的热导率结果。可看出, 随着温度 T 的升高, 两晶向的热导率均呈单调下降趋势。热导率的各向异性在所有温度范围内均存在, 不过随着温度增加, (0001) 晶向的热导率下降较大, (10-10) 晶向的热导率下降相对较慢, 两者的区别在高温下减小。研究表明, ZnO 膜在高温下具有较强的 (11-20) 结构和更好的结晶性 [25]。我们的样品虽为块状材料, 但借鉴此结论, 可认为

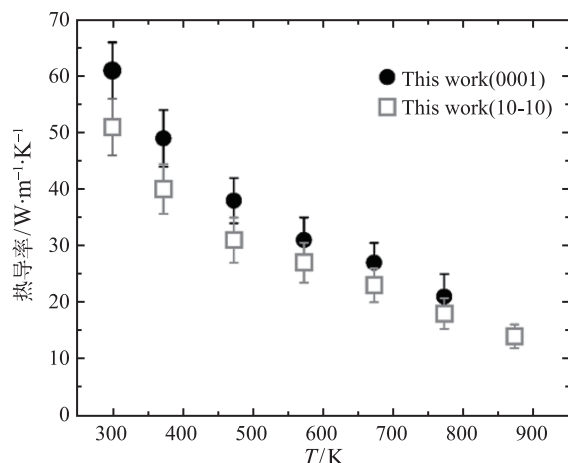


图 7 高温下不同晶向 ZnO 热导率

Fig. 7 The thermal conductivity of ZnO with different crystal orientations at high temperature

在高温下, 部分 (0001) 晶向的 ZnO 存在向 (10-10) 晶向改变的趋势, 导致高温下热导率的各向异性区别减小。

5 结 论

本研究利用 TDTR 结合 DAC 装置和热台装置, 实现了对不同晶向 ZnO 晶体的常温常压、高温、高压热物性测量。得出:

1) 在高压和高温条件下, 铅锌矿 ZnO 晶体的热导率均存在各向异性, ZnO/Al 的界面热导不存在各项异性。

2) 随着温度增加, ZnO 热导率的各向异性区别减弱; 高压下无此现象。(3) 铅锌矿 ZnO 的热导率具有非单调的压力依赖性, 具有单调的温度依赖性。

这项研究对地球物理和高压物理等学科的发展起重要作用, 同时有助于深入理解并揭示高压和高温条件下宽带隙半导体的内部热输运机理, 为寻找结构简单的高热电优值材料提供数据与思路。

参 考 文 献

- [1] Lai T H, Tsang S W, Manders J R, et al. Properties of Interlayer for Organic Photovoltaics [J]. Materials Today, 2013, 16(11): 424-432
- [2] Phan D T, Chung G S. Surface Acoustic Wave Hydrogen Sensors Based on ZnO Nanoparticles Incorporated with a Pt Catalyst [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 161(1): 341-348
- [3] Kim K, Park J, Hong S, et al. Anomalous Thermoelectricity of Pure ZnO from 3D Continuous Ultrathin Nanoshell Structures [J]. Nanoscale, 2018, 10(6): 3046-3052
- [4] Nomura K, Ohta H, Ueda K, et al. Thin-film Transistor Fabricated in Single-crystalline Transparent Oxide Semiconductor [J]. Science, 2003, 300(5623): 1269-1272
- [5] QIN Weiwei, LI Tao, LI Yutong, et al. A High Power ZnO Thin Film Piezoelectric Generator [J]. Applied Surface Science, 2016, 364: 670-675
- [6] DU Xiaoyue, FU Yongqing, Tan S C, et al. ZnO Film Based Surface Acoustic Wave Micro-pump [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2007, 76: 012047
- [7] LIANG Xin, WANG Changan. Electron and Phonon Transport Anisotropy of ZnO at and Above Room Temperature [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(4): 043903
- [8] WU Xuefei, Lee J, Varshney V, et al. Thermal Conductivity of Wurtzite Zinc-Oxide from First-Principles Lattice Dynamics - a Comparative Study with Gallium Nitride [J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 22504
- [9] JIANG Puqing, QIAN Xin, YANG Ronggui. Time-domain Thermoreflectance (TDTR) Measurements of Anisotropic Thermal Conductivity Using a Variable Spot Size Approach [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(7): 074901
- [10] Özgür Ü, Gu X, Chevtchenko S, et al. Thermal Conduc-

- tivity of Bulk ZnO After Different Thermal Treatments [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(4): 550–555
- [11] ZHU Jie, WU Xuewang, Lattery D M, et al. The Ultrafast Laser Pump-probe Technique for Thermal Characterization of Materials with Micro/nanostructures [J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2017, 21(3): 177–198
- [12] ZHU Jie, ZHU Yu, WU Xuewang, et al. Structure-thermal Property Correlation of Aligned Silicon Dioxide Nanorod Arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(23): 231903
- [13] ZHU Jie, TANG Dawei, WANG Wei, et al. Ultrafast Thermoreflectance Techniques for Measuring Thermal Conductivity and Interface Thermal Conductance of Thin Films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(9): 094315
- [14] SUN Xiaowei, LIU Zijiang., CHEN Qifeng. Heat Capacity of ZnO with Cubic Structure at High Temperatures [J]. *Solid State Communications*, 2006, 140(5): 219–224
- [15] Hsieh W-P. Thermal Conductivity of Methanol-ethanol Mixture and Silicone Oil at High Pressures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(23): 235901
- [16] Hohensee G T, Wilson R, Cahill D G. Thermal Conductance of Metal–diamond Interfaces at High Pressure [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1–9
- [17] Greene R G, Luo H, Ruoff A L. Al as a Simple Solid: High Pressure Study to 220 GPa (2.2 Mbar) [J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(15): 2075
- [18] Decremps F, Datchi F, Saitta A, et al. Local Structure of Condensed Zinc Oxide [J]. *Physical Review B*, 2003, 68(10): 104101
- [19] ZHANG Zhongyin, CHANG Zheng, FAN Xuanhui. Pressure Dependent Thermoreflectance Spectroscopy Induced by Interband Transitions in Metallic Nano-Film [J]. *Iscience*, 2021, 24(9): 102990
- [20] JIANG Puqing, QIAN Xin, YANG Ronggui. A New Elliptical-Beam Method Based on Time-Domain Thermoreflectance (TDTR) to Measure the In-Plane Anisotropic Thermal Conductivity and Its Comparison with the Beam-Offset Method [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(9): 094902
- [21] ZHAO Yu, YANG Yongke, Kumar A, et al. Thermal Conductivity of Self-assembled Nano-structured ZnO Bulk Ceramics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(3): 034313
- [22] Rajalakshmi M, Arora A K, Bendre B S, et al. Optical Phonon Confinement in Zinc Oxide Nanoparticles [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(5): 2445–2448
- [23] YUAN Kunpeng, ZHANG Xiaoliang, TANG Dawei, et al. Anomalous Pressure Effect on the Thermal Conductivity of ZnO, GaN, and AlN from First-principles Calculations [J]. *Physical Review B*, 2018, 98(14): 144303
- [24] Davis B L, Hussein M I. Thermal Characterization of Nanoscale Phononic Crystals Using Supercell Lattice Dynamics [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(4): 041701
- [25] LUO Jingting, QUAN Aojie, ZHENG Zhuanghao, et al. Study on the Growth of Al-doped ZnO Thin Films with (1120) and (0002) Preferential Orientations and Their Thermoelectric Characteristics [J]. *RSC advances*, 2018, 8(11): 6063–6068