

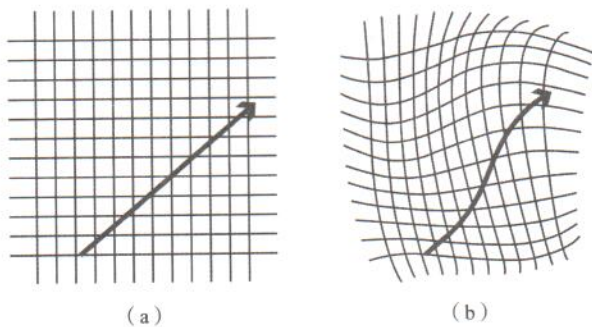
# 热学超构材料

◎黄吉平

热学超构材料是超构材料家族的新成员,本文对热学超构材料的最新进展进行了简要介绍,着眼于与其相关的基本理论以及热学超构材料的新奇性质,如热学隐身衣,热学二极管,热幻像等。

超构材料 (metamaterial) 是一类特殊的材料,其新奇的物理性质由材料的几何结构而非材料本身的物理性质决定,人们把这种材料称作超构材料以彰显几何结构在其中的关键作用。1990年代起,超构材料在电磁学、光学领域得到广泛研究;在光学超构材料,如光学隐身衣 (optical cloak) 蓬勃发展的同时,超构材料被拓展到声学领域,并同样迅速成为研究焦点。光学和声学都遵循波动方程,利用某种基于坐标变换的方法人们可以研究和操控波动方程,进而设计出具有隐身功能的光学和声学超构材料。然而热传导满足的是扩散方程,扩散方程和波动方程的物理机制迥异,因此以扩散方程为主导的热学超构材料的研究进展缓慢。

2008年,笔者课题组首次利用变换热学 (transformation thermotics) 理论提出了热学隐身衣的设计原理<sup>[1]</sup>。假想一个简单的场景:有一束热流在均匀铜片 (或其他任何均匀材料) 中流动,按照日常经验,铜片内的热流会沿直线传播。这时,假设热流和铜片都突然被“冻结”,然后,扭曲或挤压铜片 (假设铜片允许任意扭曲、挤压),热流在铜片里也会相应地被扭曲或挤压,不再沿直线传播。此时,热流的非直线传播现象并不影响继续使用描述宏观传热的热传导方程,只是此时铜片不再均匀,其材料性质 (例如用于描述热传导的热导率) 发生了变化。更进一步,如果下次直接让同样的一束热流以同样的角度流进这个被扭曲或挤压之后的铜片,这束热流的路径必然与先前的非直线路径一致。这个现象看起来有点显然,然而其中却蕴含一个科学原理,而这原理正是变换热学理论的核心,它就是“热传导方程的形式不变性”,即:热传导方程既适用于扭曲



**变换热学** (a) 热流 (用带箭头的直线表示) 在均匀铜片中沿直线传播; (b) 该铜片被扭曲或挤压后热流在其中的传播路径。宏观热传导方程对 (a)、(b) 皆适用: 对于 (a), 方程涉及的热导率不仅均匀而且各向同性; 对于 (b), 热导率可以非均匀且各向异性。

或挤压之前的均匀空间,也适用于扭曲或挤压之后的非均匀空间。对于前者,方程中涉及的热导率不仅均匀而且各向同性;对于后者,热导率可以非均匀且各向异性。但是,这两种热导率之间存在确定的定量关系,可以由关联这两个不同空间几何结构的雅可比矩阵直接给定。这里的非均匀且各向异性的热导率的本质源于空间几何结构。人们把这种通过空间几何结构变换确定材料热学性质 (如热导率分布) 的新的理论方法叫作变换热学。

变换热学给物理学家的一个启发是:人们可以基于这种方法,设计材料的几何结构,使得热流能够绕过某个特定的区域继续传播而不改变原先的传播方向,从而使得该特定区域内的物体不影响区域外的热流分布,也就是说,这个物体实现了热隐身<sup>[1,2]</sup>。

热隐身是个全新的物理概念,它于2008年被理论预言<sup>[1]</sup>;自2012年起,很多实验验证了这一预言。例如:研究人员实验上制备了一种多层结构,用于实现热隐身<sup>[3]</sup>;后来,有学者进一步简化,用双层结构实现

黄吉平:教授,复旦大学物理系,上海 200433。jphuang@fudan.edu.cn

Huang Jiping: Professor, Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433.

了热隐身效果<sup>[4]</sup>。

之前的这些热隐身实验能够去除器件内部物体对外部温度场的干扰,从而达到热隐身效果,但是,这些隐身衣并不具有开关功能,从实用性角度看,还有进一步发展的空间。事实上,之前所有的变换热学研究(包括理论研究和实验验证)中,人们都没有考虑温度对热导率本身的影响。我们把热导率不随温度变化的变换热学叫作线性变换热学。

最近,笔者课题组提出非线性变换热学理论<sup>[5]</sup>,该理论可以用于处理热导率随温度变化的情形。研究人员继而发现,该理论可以用于设计能够自动开启或关闭的热隐身衣:当环境温度上升到某个阈值之后,A型隐身衣将关闭隐身功能,而B型隐身衣则会开启隐身功能。并且,此过程完全是材料自发完成的,不需要额外的能量。利用A、B型隐身衣还可以实现宏观热流二极管——与电子二极管对电流的单向整流作用类似,这种热流二极管只允许热流单方向通过,实验上也成功实现了这样的整流效果<sup>[5]</sup>。热流二极管有望成为热计算的基础元件,例如,通过与传统计算机的杂化,人们未来也许能够使用计算产生的废热进行二次计算从而提高能源的利用率,并提高运算效率。

除了热隐身、热学二极管,热学超构材料还可以实

现许多其他新奇热性质,例如高效聚集热流,即让热流聚集到某个特定区域;热流反转,即热流表观上从低温流向高温;热流的任意旋转;热幻像等。这里提及的“热幻像”是指通过设计材料的几何结构,使得物体1(例如一个士兵)周围的温度斑图呈现出与物体2(例如一棵树)一样的分布。这样,通过红外探测温度斑图进行识别时,人们会把物体1(士兵)误以为是物体2(树)。

- [1] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 251907.
- [2] Li J Y, Gao Y, Huang J P. A bifunctional cloak using transformation media. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 074504.
- [3] Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials. *Physical review letters*, 2012, 108(21): 214303.
- [4] Han T, Bai X, Gao D, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak. *Physical review letters*, 2014, 112(5): 054302.
- [5] Li Y, Shen X Y, Wu Z H, Huang J Y, Chen Y X, Ni Y S, Huang J P. Temperature-dependent transformation thermotics: from switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes. *Physical Review Letters*, 2015, 115(19): 195503.

关键词: 变换热学 热学超构材料 宏观热学二极管 热隐身

## 跟踪·扫描

### 铋化物纳米线研究 取得重要进展

[本刊讯]中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室杨涛课题组,在三元合金钢铋碲(InAsSb)纳米线制备及机理研究方面取得了系列重要进展,为未来制备高度集成的III-V族纳米器件开拓了新的技术路线。相关研究成果发表在*Nano Letters*, 2016, 16(2), 877-882上。

III-V族半导体纳米线因其独特的准一维结构和物理特性可应用于纳米晶体管、纳米传感器和纳米光电探测器等方面,是当前国际研究的热点。其中,InAsSb纳米线不仅具有超高的载流子迁移率和极小的有效质量,还具有可调的带隙,是红外探测器的理想材料。目前,国际上广泛

采用外来金(Au)催化的气-液-固(VLS)机制制备纳米线,但金催化剂在半导体材料中会形成深能级复合中心,这将大大降低器件的性能。因此,发展无金催化制备纳米线的技术显得十分迫切和重要。

课题组的杜文娜等首次在硅(Si)衬底上制备出高质量的垂直InAsSb纳米线,并详细研究了铋(Sb)组分对纳米线生长的影响。研究人员发现在砷化钢(InAs)纳米线生长过程中引入少量Sb,可以大为改善InAs纳米线的均匀性和晶体质量。同时,他们还发现InAsSb纳米线的生长机制随生长参数变化而变化,在低V/Ⅲ比和高Sb流量比下,纳米线以VLS机制生长;而在高V/Ⅲ比和低Sb流量比下,纳米线则以气-固(VS)机制生长。这一发现为利用生长参数调控InAsSb纳米线生长机制奠定了基础。此外,两种机制生长的纳米线在形貌、生长

方向和晶体质量方面显著不同。VS机制生长的纳米线方向统一、组分均匀,有利于制备低成本集成器件;而VLS机制生长的纳米线晶体质量高,更有利于制备单根高性能纳米线器件。

课题组首次发现在不同取向的Si衬底上可以生长出不同形貌分布的平面InAsSb纳米线。在(100)衬底上,纳米线沿四个相互垂直的方向生长;在(110)衬底上,纳米线沿六个夹角为54.7°或70°的方向生长;而在(111)衬底上,纳米线沿六个等价的60°方向角生长。研究人员将(111)晶向族分别在上述三个平面内投影后发现,投影的数目和夹角与上述平面纳米线在三种衬底上的分布完全相同。因此,利用不同取向的Si衬底可实现对平面纳米线生长方向的调控。此外,高分辨透射电镜图像显示这些平面纳米线具有纯立方相结构。(乐毅)