

特约专稿

非线性热学:非线性光学在热学领域的延伸

黄吉平

(复旦大学物理学系,上海 200433)

摘要:作为物理学的子学科之一,非线性光学是建立在介电常数依赖于光波电场强度的事实之上发展而来的,依此类推,已有大量实验事实表明,热学中的热导率也是依赖于温度的,鉴于此,有没有可能把已经很成熟的非线性光学的研究方法或研究思路拓展到热学中来呢?于是,非线性热学这个方向的雏形也就形成了。本文综述了文献中已有的一些尝试,并比较了非线性光学与非线性热学之间的异同。

关键词:非线性光学;介电常数;热学;热导率;非线性热学
中图分类号: O551

DOI: 10.13757/j.cnki.cn34-1328/n.2019.01.001
文章编号: 1007-4260(2019)01-0001-03

Nonlinear Thermotics: Extending Nonlinear Optics into Thermotics

HUANG Jiping

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: As a sub-discipline of physics, nonlinear optics is based on the fact that dielectric constants depend on the electric field of optical waves. On the other hand, the existing abundant experiments have shown that thermal conductivities in thermotics also rely on temperature. So, can one extend the mature nonlinear optics to the field of thermotics? The answer to this question gives birth to a new direction, nonlinear thermotics. Here the initial attempts in the literature along this direction are reviewed, and the similarities and differences between nonlinear optics and nonlinear thermotics are compared.

Key words: nonlinear optics; dielectric constants; thermotics; thermal conductivities; nonlinear thermotics

热学,该是物理学家心中永远的“痛”,因为热学作为一门学科登上历史的舞台与物理学家基本没啥关系,只是卡诺等工程师们(并非物理学家!)努力的结果。今天,在物理学界,热学隶属于“一级学科”物理学中的“二级学科”理论物理中的统计物理,这是因为热学研究的是宏观热现象,而统计物理则从微观上给出这些宏观现象的统计解释。

如何调控热能,是当今热学(或传热学——工程领域的同行们喜欢用这个名字)领域关注的主要课题。

随着能源危机的到来,如何充分利用能源变得越来越重要。热能,作为所有高品质能源(如煤炭、石油、天然气,等等)的最终归属,对其高效的利用也因此显得格外重要。

在热能运输过程中,材料的热导率起关键作用,所以有效地调控材料的热导率对热能运输过程的控制至关重要。当前,热超构材料(thermal metamaterial)(一种人工结构材料)正成为一种有效控制热运输的新方法。基于热超构材料的设计,人们实现了梦寐以求的热隐身衣^[1-5]、热聚集器^[6-8]等一系列新奇的热现象或功能器件。

以上热超构材料的研究都是针对线性材料设计的,也就是说,材料的热导率本身没有热响应,它不随温度变化而变化。2015年,LI等在研究热超构材料时,引入了热导率对温度的依赖关系,从而发展了

收稿日期:2018-11-09

基金项目:国家杰出青年科学基金(11725521)

作者简介:黄吉平(1977—),男,江苏泰县(现泰州市姜堰区)人,博士,复旦大学物理系教授,博士生导师,研究方向为热调控与热超构材料。E-mail:jphuag@fudan.edu.cn

变换热学理论(热导率不依赖于温度),建立了非线性变换热学理论,继而推动了基于热超构材料的非线性热学研究^[9]。

所谓非线性热学,它关注的材料热导率已经不再是一个独立于温度的常数,而是对温度有特定响应的物理量。基于这种响应,研究者设计了能够对环境温度有智能响应的开关热隐身衣^[9],并制备了宏观热二极管^[9]。这项工作被《物理评论快报》(Physical Review Letters)选为封面文章,受到了广泛关注。

具有智能响应的开关热隐身衣如图1所示,其工作原理如下:当装置处于温度较高的情况下,隐身衣材料的热导率处于“隐身功能开启”的状态,所以隐身衣以外的温度分布不会受到任何影响;但是,当装置处于温度较低的情况下,隐身衣材料的热导率处于“隐身功能关闭”的状态,这样一来,由于隐身衣内部存在热导率与背景不一致的物体,背景中的温度分布毫无疑问地被扭曲了。

宏观热二极管器件的设计是受开关热隐身衣的启发,如图2所示:当整个装置左端为冷源、右端为热源时,图2(a)中的二极管处于关闭状态,此时热流不能从热源流向冷源;但是,当左端为热源、右端为冷源时,图2(b)中的二极管则处于导通状态,此时,整个体系中热流非常大。如此,就达到了宏观热二极管的效果。

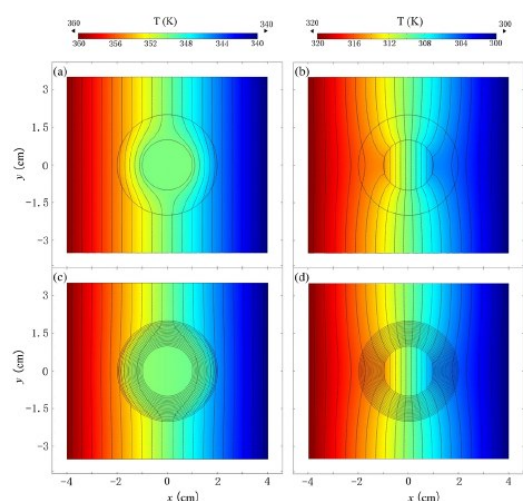


图1 具有智能响应的开关热隐身衣^[9]。(a,c)隐身功能开启,(b,d)隐身功能关闭,(a,b)基于解析理论的模拟结果,(c,d)基于有效媒质理论的模拟结果

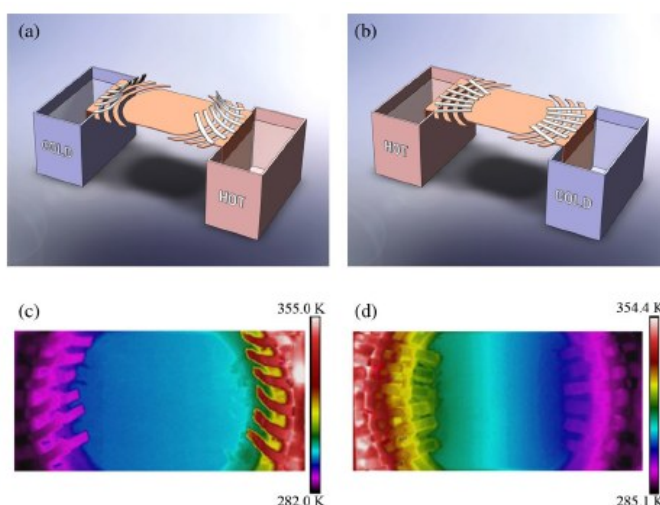


图2 宏观热二极管^[9]。

(a)关闭状态的实验样品示意图,(b)导通状态的实验样品示意图,(c)关闭状态实验测量结果,(d)导通状态实验测量结果

非线性热学给我们展示有趣的物理现象的同时,也给研究者们带来了一个很大的难题:如何在自然界中找到相应的热学非线性材料?虽然自然界中的热学非线性材料确实存在(例如,固体冰的热导率大约是液体水的热导率的4倍,尽管它们都是同一种材料H₂O),但它们对温度的响应往往不是太过微弱就是响应范围太极端(需要极低温或极高温),以至于很难实现理论预言的热现象。幸运的是,在上述工作中,研究者找到了两种形状记忆合金作为非线性材料。他们利用形状记忆合金随温度发生形变的特性:一种合金是低温变平高温变弯,另一种合金是高温变平低温变弯,从而通过形状随温度的变化间接地对热导率产生影响,成功构造了热导率随温度的变化符合理论要求的非线性热学材料。类似的设计亦很好地被应用于制备环境温度差中的零能耗保温器件^[10],该器件的零能耗保温效果的实现同样得益于人工设计的热导率对温度的特定依赖关系材料。

基于热超构材料的非线性热学的发展,期望能够为当代热学研究提供一些不同的思路,并期望能够设计出功能新颖的热超构材料,例如,最近发现热超构表面(即结构化热表面)也能够呈现非线性增强和谐波产生^[11]——这一切都源于实际世界中热导率本身对温度的依赖。

也许,人们应该像重视“非线性光学”那样重视“非线性热学”,因为非线性光学中一切理论的出发点都源于介质的介电常数(或极化率)对光波(或电磁波)的电场强度有依赖关系,其正可类比于非线性热学中的热导率与温度有依赖关系。然而,从数学上来看,非线性光学中的电场强度与非线性热学中的温

度梯度作用相同,而现在非线性热学中的热导率却是与温度而非温度梯度有依赖关系,这个类比预示着把非线性光学中已经成熟的研究思路拓展到非线性热学中来,不仅操作方便,而且成效可能显著——因为有新物理等待人们挖掘。

当然,为什么这里隐藏的新物理值得期待,还有一个重要的原因,它就是非线性光学中介电常数对电场强度的幂律依赖,其幂指数是整数,而非线性热学中热导率对温度的依赖,若也用幂律关系来拟合的话,人们会发现,这里的幂指数可以是整数,也可以是分数,甚至是负数。

此外,还值得点明的是,介电常数有虚部,其对应于耗散,这些耗散能通常都是热能!而热导率的已有研究中尚未引入虚部,因为目前来看,“引入虚部”尚缺乏明确的物理意义,至于未来可有转机,现在还不是下结论的时候。这里的评价有点模棱两可,这主要是因为文献中对热波(thermal wave)的研究正在如火如荼地进行之中,理论虽有进展,但尚有不少争议,而相对理论来说,实验进展更显不足。

最后值得一提的是,介电常数不仅可以取正值,而且可以取负值,例如光频波段下金属的介电常数的实部通常为负值。但是,对于热导率而言,任何时候,它都必须取正值,这是因为热量只会自发地从高温流向低温,否则,就违反热力学第二定律了。其实,从等效意义上来看,热导率也是可以取负值的^[12-14],只要热量能够在外界做功的情况下,从低温流向高温,此举并不违反热力学第二定律,例如冰箱就是这样的,在外界提供电能的情况下,冰箱内部的热量被“驱赶”到冰箱外,换言之,这时冰箱就可以被视为一种具有等效负热导率的人工设备。

非线性热学是一个值得关注的、值得大力发展的新领域!

致谢:本文在撰写过程中得到本组研究生须留钧同学的协助。

参考文献:

- [1] FAN C Z, GAO Y, HUANG J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92, 251907.
- [2] NARAYANA S, SATO Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials[J]. Physical Review Letters, 2012, 108, 214303.
- [3] XU H, SHI X H, GAO F, et al. Ultrathin three-dimensional thermal cloak[J]. Physical Review Letters, 2014, 112, 054301.
- [4] HAN T C, BAI X, GAO D L, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak[J]. Physical Review Letters, 2014, 112, 054302.
- [5] MA Y G, LIU Y C, RAZA M, et al. Experimental demonstration of a multiphysics cloak: Manipulating heat flux and electric current simultaneously[J]. Physical Review Letters, 2014, 113, 205501.
- [6] YU G X, LIN Y F, ZHANG G Q, et al. Design of square-shaped heat flux cloaks and concentrators using method of coordinate transformation[J]. Frontiers of Physics, 2011, 6(1): 70.
- [7] MOCCIA M, CASTALDI G, SAVO S, et al. Independent manipulation of heat and electrical current via bifunctional metamaterials[J]. Physical Review X, 2014, 4, 021025.
- [8] SHEN X Y, LI Y, JIANG C R, et al. Thermal cloak-concentrator[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109, 031907.
- [9] LI Y, SHEN X Y, WU Z H, et al. Temperature-dependent transformation thermotics: From switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes[J]. Physical Review Letters, 2015, 115, 195503.
- [10] SHEN X Y, LI Y, JIANG C R, et al. Temperature trapping: Energy-free maintenance of constant temperatures as ambient temperature gradients change[J]. Physical Review Letters, 2016, 117, 055501.
- [11] DAI G L, SHANG J, WANG R Z, et al. Nonlinear thermotics: Nonlinearity enhancement and harmonic generation in thermal metasurfaces[J]. The European Physical Journal B, 2018, 91, 59.
- [12] WEGENER M. Metamaterials beyond optics[J]. Science, 2013, 342, 939.
- [13] GAO Y, HUANG J P. Unconventional thermal cloak hiding an object outside the cloak[J]. Europhysics Letters, 2013, 104, 44001.
- [14] SHEN X Y, HUANG J P. Thermally hiding an object inside a cloak with feeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 1-6.