



变换热学与热能调控

徐象繁^{1,2*}, 李保文^{1,2}

¹ 同济大学物理科学与工程学院声子学与热能科学中心, 上海 200092;

² 同济大学物理科学与工程学院中欧纳米声子学联合实验室, 上海 200092

摘要: 如果热流大小和热流流向能像固体中的电流一样被调控, 则将使热能调控拥有更广阔的应用前景。宏观热能调控最重要的手段是构建热功能材料, 通过对宏观热扩散方程的空间变换, 实现空间热导系统的非均匀分布, 从而有效调控热流流向。这类基于变换热学的新型热功能材料可以实现热隐身与热伪装。

关键词: 热能调控; 变换热学; 热隐身; 热伪装

中图分类号: TB33; O551

文献标志码: A

Transformation thermotics and the manipulation of thermal energy

Xiangfan Xu^{1,2*} and Baowen Li^{1,2}

¹ Center for Phononics and Thermal Energy, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; ² China-EU Joint Lab for Nanophononics, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Thermal energy has been proposed to have ever greater potential for human beings if the heat carriers, i.e. phonons can be controlled in micron scale as easy as its counterpart, electrons in solid. Alternatively, in macroscopical scale, functional thermal materials are used to control thermal energy. The transformation of macroscopical thermal diffusion equation is proposed to obtain the asymmetrical thermal conductivity in real space. This new type of thermal functional materials helps to control heat flow and to realize thermal cloak and thermal camouflage.

Keywords: manipulation of thermal energy; transformation-thermotics; thermal cloak; thermal camouflage

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.01.005

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(1): 64–68

1 引言

热是生命的能量源泉, 也是现代人类社会主要的能源基础。现代科技的发展使得人们对热流控制的渴求日益增长。特别在军事领域, 热隐身技术和热伪装技术可广泛用于隐藏本方军事设施和军事人员, 或者用于迷惑和妨碍敌方的侦查与攻击, 是现代军事发展的一项重要课题。近年来发展的功能材料满足了新科

新技术对新型材料的特殊要求。这种以普通自然材料为基本结构单元, 通过一系列特殊的方式组合而成的人工材料具有自然材料所不具有的、可设计的超常物理特性。研究发现, 功能材料可以调控的物理性质/物理量非常广泛, 包括电磁波、光波、声波和弹性波、声子、热等。

近些年发展的隐身和伪装技术主要集中在对电磁波和光的研究。现代高科技隐身武器在实现了电磁波屏蔽之后, 其自身主动散发的热量却很难屏蔽。这就决定了热功能材料, 如热伪装和热隐身材料, 在该领

收稿日期: 2016–10–11; 收到修改稿日期: 2016–12–13

*E-mail: xuxiangfan@tongji.edu.cn

域的重要地位。可以想象一下,如果通过热隐身/热斗篷,将坦克发动机产生的热量单向传导至坦克底部,则会使敌方热成像仪无法检测;或者通过热伪装,将一辆坦克的发热体伪装成一辆卡车,则将对敌方的侦查产生严重干扰。

在原理上,热传导满足的是扩散方程,与光学的波动方程在物理上有着本质的区别,这也使得将光学隐身衣推广到热隐身衣和热伪装时不得不对来自原理上的挑战。幸运的是,热功能材料的基本结构单元都是已知材料,从而避免了复杂微纳加工带来的技术难题^[1-2]。如果将该基本结构单元比作热功能材料的原子或原胞,则这些基本结构单元排列组合方式及其相互之间的作用决定了热功能材料的宏观物理性质。

通过对宏观热扩散方程的空间变换,可实现空间热导系统的非均匀分布,达到有效调控热流流向的目的。将热功能材料用于热能的传输和转换虽然起步较晚但发展很快,是材料功能化研究的重要部分。以下将分四部分来讨论,包括热学隐身衣设计原理,热学隐身衣实验验证,热伪装,以及热调控的发展与展望。

2 热学隐身衣设计原理

Leonhardt^[3]和 Pendry^[4]等人因于2006年先后独立提出光学隐身衣概念而引起科学界的广泛关注。相比于 Leonhardt 高深的复变理论和数学推导, Pendry 巧妙地将均匀空间进行扭曲(见图 1(a1)和 1(a2)),重新建立一套新坐标系调控介电常数和磁导率,从而获得了光学隐身衣(见图 1(c1)和 1(c2))。套用空间扭曲的概念,科学家构建了热隐身衣。图 1(b1)和 1(b2)为 Schittny

及其合作者设计的热隐身衣原理图^[5]。将图 1(b1)中均匀热介质材料通过空间变换,实现了空间热导率系数的非均匀分布(图 1(b2)),从而达到有效调控热流流向的目的。图 1(b2)中 $r < R_1$ 区域为需要被隐身的空间, $R_1 < r < R_2$ 区域为隐身材料层。通过空间变换, $R_1 < r < R_2$ 区域内热导率满足以下方程即可实现热隐身:

$$\kappa_{\theta} = \kappa_0 \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right)^2 \geq \kappa_0, \quad (1)$$

$$\kappa_r = \kappa_0 \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right)^2 \left(\frac{r - R_1}{r} \right)^2 \leq \kappa_0, \quad (2)$$

其中 κ_0 为背景热导率。通过选择不同 κ_{θ} 和 κ_r , 以及调控 R_1 和 R_2 的值,即可实现热学隐身。热导率是材料本质物理量,其特征长度在几个纳米至几百纳米之间,因此只有通过纳米尺度的加工才能实现热导率的调控。为规避这一困难,在设计和演示热隐身衣时,通常采用多种材料混合改变总热导(而非热导率)的方式来构建热隐身衣。

3 热学隐身衣实验验证

哈佛大学 S. Narayana 及其合作者在有效媒介理论的框架下,利用 COMSOL 软件模拟两种不同材料耦合在一起的热流分布^[6]。他们将热导率差别很大的两种材料组成洋葱状或螺旋状多层结构,在实验室里构造出了热隐身衣原型。通过测量其在温度场中的温度分布,验证了其实验表现与理论预期完全吻合,从此开启了实验探索热隐身衣的大门。

遗憾的是, S. Narayana 等人构造的热隐身由多种材料组成,总体来说比较笨重,对将来的实际应用产

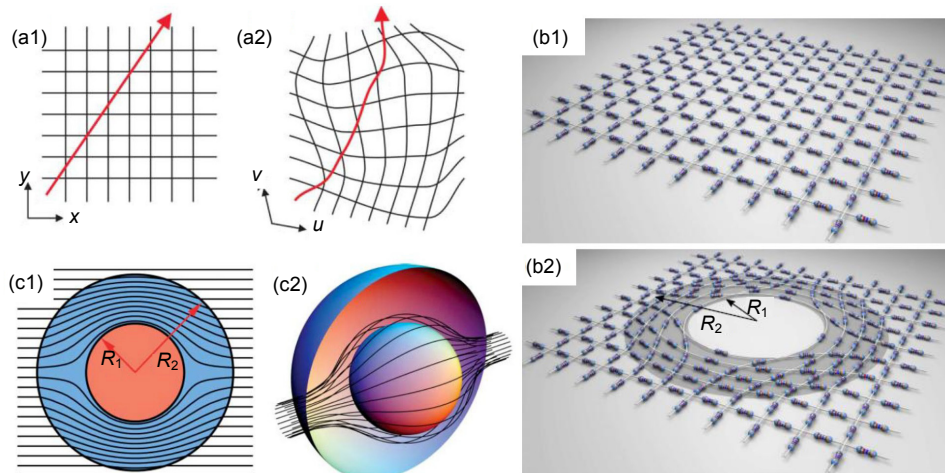


图 1 (a1) 均匀介质中光线沿着直线传播^[4]。(a2) 扭曲空间中光线沿曲线传播^[4]。(b2) Schittny 及其合作者将(b1)中的空间扭曲,使得热流从 $R_1 < r < R_2$ 内流过且不影响背景环境的等温线,实现了热隐身衣^[5]。(c1)和(c2)为球形光学隐身衣示意图,该图同样适用于热学隐身衣^[4]。

生一定的制约。为此, R. Schittny 等人利用单一的铜材料构造了一款新型热隐身衣(见图 2(a)~2(c))^[5]。通过在铜片上加工不同尺寸的热通道(每个通道由于不同尺寸导致不同的热导), 将 $r < R_2$ 内的热流压缩至 $R_1 < r < R_2$ 的圆环内(图 1(b2))。图 2(d)和 2(e)分别为 60 s 和 120 s 时间后器件的等温线分别图。当 $t=120$ s 时, 可以很明显看到左右两边的等温线几乎没有发生变化, 表明热隐身衣可以为其中物体(图 1(b)中 $r < R_1$ 区域)屏蔽外界的热流。换言之, 此时通过热成像仪几乎无法探测到隐身衣中心区域的物体。

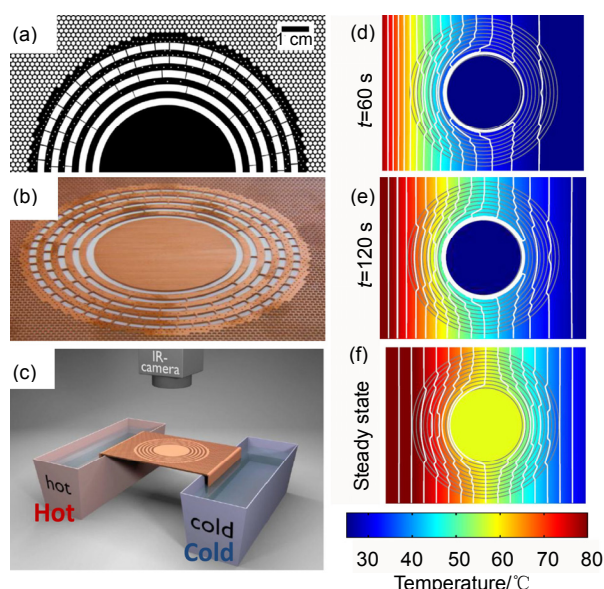


图 2 (a)~(c)分别为 S. Narayana 等人设计的热隐身衣结构图、原理图和测量方法。(d)~(f)分别为 60 s、120 s 以及热稳态(即无限长时间)时热隐身衣的等温线^[5]。

同济大学李保文小组和新加坡国立大学仇成伟小组^[7], 新加坡南洋理工大学张伯乐小组^[8]于 2014 年 2 月份在美国《Physical Review Letters》同一期同时发表两个独立完成的热隐身文章, 把这一领域推向了高潮。美国物理学会的《Physics》专门以“热隐身很热”为题撰文, 对这两个工作进行了详细的报道和评论^[9]。与 S. Narayana^[6]和 R. Schittny^[5]等人设计不同的是, 这两个工作抛弃了 S. Narayana 等人笨重的设计方案以及 R. Schittny 等人复杂的加工工艺, 利用两层材料叠加的方式(见图 3(a)和 3(b))或单层超薄材料(见图 3(c))实现了热隐身效果, 为热隐身衣从实验演示到具体应用提供了简单的解决方案。

4 热伪装

在热隐身衣的设计基础上, 同济大学李保文小组和新加坡国立大学仇成伟小组又合作设计了另外一款有着广阔应用前景的热功能材料, 即热伪装^[10]。图 4 展示了从热隐身衣到热伪装的设计原理和实验流程。在正常热传导状态下, 如图 4(a1)和图 4(a2)所示, 一个暴露在热流中的蓝色小人(实验中用图 4(a2)铜圈代替)将很容易被冷端的热成像仪探测。图 4(b1)~4(b3)为双层热隐身衣的设计示意图和实验表现, 很明显可以看到蓝色小人已经在热成像仪中消失。图 4(c)为在图 4(b)的基础上加了两个用以伪装的红色小人(实验中用两个半圆环代替)。在图 4(c3)的热成像仪中观察到了两个红色小人与图 4(d)一致, 即成功将蓝色小人伪装成两个红色小人, 实现了热伪装。

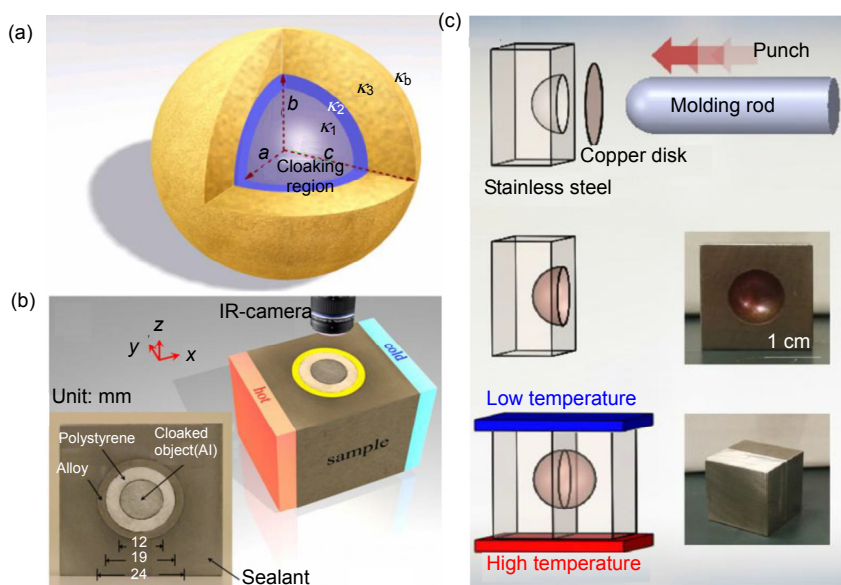


图 3 (a)和(b)为双层热隐身衣设计图和实物图^[7]。(c)为超薄型热隐身衣加工原理图^[8]。

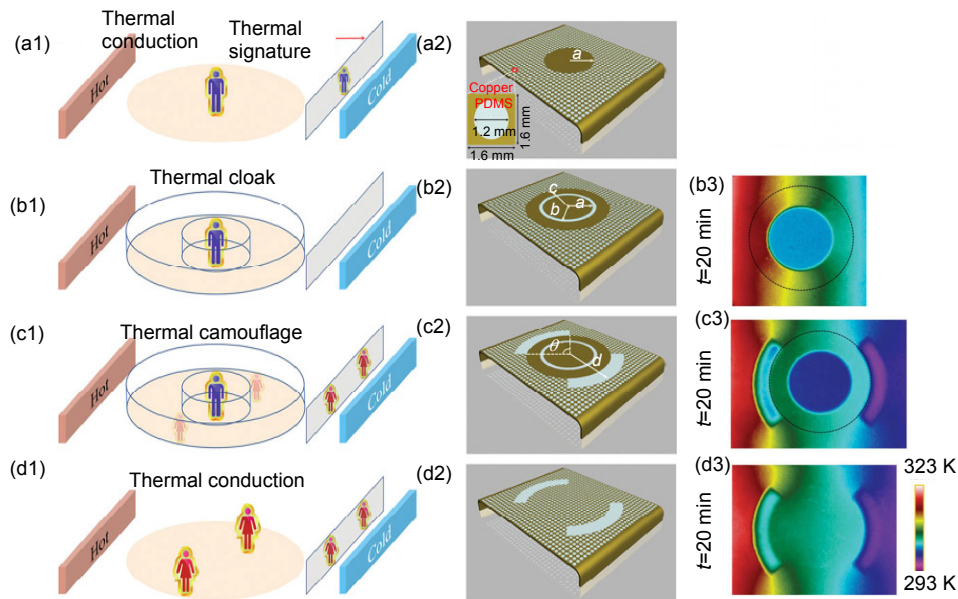


图4 (a1)和(a2)为正常热传导示意图:当热量从左边热端流向右边冷端时,图中蓝色小人将很容易被热成像仪探测。(b1)~(b3)为热隐身衣示意图、设计图和实验表现。(c1)~(c3)为热伪装示意图、设计图和实验表现,其成功将图中蓝色小人伪装为(d1)~(d3)中的两个红色小人^[10]。

以上的热伪装可由两个步骤来完成。第一步先设计热隐身衣。图4(b2)中的热隐身衣由两个热导率不同的屏蔽层组成,即 $a < r < b$ 层和 $b < r < c$ 层,其热导率分别为 κ_2 和 κ_3 ,背景环境热导率为 κ_b 。当设定内层($a < r < b$)有一个很低热导率($\kappa_2 \sim 0$),外层($b < r < c$)热导率较高且满足 $\kappa_3 = \kappa_b (c^2 + b^2) / (c^2 - b^2)$ 时,即可实现隐身功能。在实验中,内层采用PDMS,其热导率 $\kappa_2 = 0.15 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;外层采用铜,其热导率 $\kappa_3 = 394 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;背景热导率 κ_b 则可以通过在铜片上打孔获得。第二步,在设计热隐身衣背景(即打孔的铜片)上加两个圆环(图4(c2))从而伪装成图4(d2)。实验表明,该热伪装的效果至少可以保持在20 min以上。

5 热调控的发展与展望

热是一种宏观现象,其必然离不开微观的声子输运机制。同时,热隐身衣和热伪装的基本结构单元都是已知材料,其排列组合方式决定了功能材料的宏观热物性。因此,要构造全新的热隐身衣和热伪装,则需要仔细研究微观下声子的动力学行为与宏观热现象的关系。关于声子的微观输运性质,近年来已经很多有趣的研究工作。如通过选用一种或者多种特定材料异质结制备声子热二极管^[11-13],可以实现热流在一个方向上通过,而在另外的方向不能通过。在过去的二十多年时间内,科学家相继提出这类声子学元器件,如热二极管^[11-13]、热三极管^[14]和热存储器^[15]的原型。

2012年,同济大学李保文小组在美国物理学会《Review of Modern Physics》上发表第一篇关于微纳尺度下声子调控综述文章,预示着“声子学”的雏形正在逐步形成^[16]。声子热器件/材料聚焦于材料的微观热输运性质,探讨非线性效应对声子输运的影响。与此不同的是,热隐身衣等致力于探讨宏观非均匀热输运介质的空间分布对热流方向的调控作用。两者有机结合可实现热流在微观和宏观尺度的同步调控。借助于目前已经成熟的微纳尺度声子热调控,基于对宏观热扩散方程的空间变换,可实现对热流多尺度和多维度的“空间压缩”,构造全新的热功能材料与器件,实现对热流流向的精确控制,使得热流可以绕过目标物体或者聚焦于目标物体,产生全新热隐身^[17]、热反转^[6]、热汇聚^[6, 18]以及热伪装材料^[19]。

由于热传导满足的是扩散方程,与波动方程在物理上有着本质的区别,这也使得将光学隐身衣推广到热隐身衣和热伪装不得不面对来自原理上的挑战。因此,我们必须从原理上重新考虑热隐身衣和热伪装。目前面临的挑战主要有:

1) 热隐身衣器件本身也有一定的热导率,使得器件在长期工作后会逐渐发热而丧失隐身功能。如图2(f),在热稳态的情况下中心隐身/屏蔽区域的温度逐渐上升,表明在该情况下已经丧失隐身/屏蔽功能^[5]。因此需要在理论和实验上设计更加新颖的热功能材料和器件。

2) 在实际应用中,通常需要设计到光、热、磁等混合隐身。虽然 M. Moccia 和 Y. Ma 等人分别独立实现了热学和电学的混合隐身^[20-21],但是光、热、磁混合隐身的实现还面临着来自原理上的挑战。

3) 本文所述的热隐身和热伪装都是假定其热导率不随温度变化。众所周知,材料的热导率会随着温度的变化而发生变化。在实际应用中,由于外界温度条件不可控的特性会导致热隐身及热伪装失效。虽然黄吉平等人在 2015 年设计了非线性热隐身衣(即热导随温度变化)^[22],从原理上解决了外界温度条件变化对热隐身和热伪装的影响,但是尚未看到关于该类型热隐身的实验报道。

4) 热输运主要有三种方式,即热传导、热对流和热辐射。现有的热隐身衣和热伪装都是针对固体热传导设计的,而尚未有对另外两种热传输模式的研究。我们知道,远距离热探测主要靠的是红外波段热辐射。因此,对于红外波段的隐身、伪装和定向辐射是未来热隐身和热伪装发展的重要方向。

综上所述,科学家们已经成功开展了热伪装和热隐身的演示实验,其实验结果能很好符合理论预期。然而目前所有演示的热伪装器件和热隐身衣都非常笨重和简陋,所用原材料也只是 PDMS、橡胶和铜等传统材料,离实际应用还存在一定的技术壁垒。未来可能的发展方向有:

1) 采用新型复合材料(如碳复合材料)用于轻型化应用。同时,超薄型、柔性化以及可穿戴化是热伪装和热隐身今后发展的重要方向。

2) 热功能材料的基本结构单元都是已知材料,可比作热功能材料的原子或原胞。将这些基本结构单元与其它功能材料(如光子晶体、纳米声子晶体)有机结合可以同时调控光能和热能。在结构上采用多尺度多维度结构,如基本结构单元表面的微纳精加工,可同时调控热传导和热辐射。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(11334007)。

参考文献

- Shen Xiangying, Huang Jiping. Research progress in thermal metamaterials[J]. *Physics*, 2013, **42**(3): 170–180.
沈翔瀛, 黄吉平. 热超构材料的研究进展[J]. *物理*, 2013, **42**(3): 170–180.
- Xu Xiangfan, Zhou Jun, Yang Nuo, et al. Artificial microstructure materials and heat flux manipulation[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2015, **45**(7): 705–713.
徐象繁, 周俊, 杨诺, 等. 人工微结构材料与热的调控[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, **45**(7): 705–713.
- Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1777–1780.
- Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780–1782.
- Schittny R, Kadic M, Guenneau S, et al. Experiments on transformation thermodynamics: molding the flow of heat[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(19): 195901.
- Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(21): 214303.
- Han Tiangcheng, Bai Xue, Gao Dongliang, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(5): 054302.
- Xu Hongyi, Shi Xihang, Gao Fei, et al. Ultrathin three-dimensional thermal cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(5): 054301.
- Alù A. Thermal cloaks get hot[J]. *Physics*, 2014, **7**: 12.
- Han Tiancheng, Bai Xue, Thong J T L, et al. Full control and manipulation of heat signatures: cloaking, camouflage and thermal metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(11): 1731–1734.
- Li Baowen, Lan Jinghua, Wang Lei. Interface thermal resistance between dissimilar anharmonic lattices[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(10): 104302.
- Li Baowen, Wang Lei, Casati G. Thermal diode: rectification of heat flux[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(18): 184301.
- Terraneo M, Peyrard M, Casati G. Controlling the energy flow in nonlinear lattices: a model for a thermal rectifier[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **88**(9): 094302.
- Wang Lei, Li Baowen. Thermal logic gates: computation with phonons[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(17): 177208.
- Wang Lei, Li Baowen. Thermal memory: a storage of phononic information[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(26): 267203.
- Li Nianbei, Ren Jie, Wang Lei, et al. Colloquium: phononics: manipulating heat flow with electronic analogs and beyond[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, **84**(3): 1045–1066.
- Han Tiancheng, Yuan Tao, Li Baowen, et al. Homogeneous thermal cloak with constant conductivity and tunable heat localization[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1593.
- Han Tiancheng, Zhao Jiajun, Yuan Tao, et al. Theoretical realization of an ultra-efficient thermal-energy harvesting cell made of natural materials[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, **6**(12): 3537–3541.
- Kadic M, Bückmann T, Schittny R, et al. Metamaterials beyond electromagnetism[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, **76**(12): 126501.
- Moccia M, Castaldi G, Savo S, et al. Independent manipulation of heat and electrical current via bifunctional metamaterials[J]. *Physical Review X*, 2014, **4**(2): 021025.
- Ma Yungui, Liu Yichao, Raza M, et al. Experimental demonstration of a multiphysics cloak: manipulating heat flux and electric current simultaneously[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(20): 205501.
- Li Ying, Shen Xiangying, Wu Zuhui, et al. Temperature-dependent transformation thermotics: from switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**(19): 195503.