同时实现热与电磁
多物理场零介质隐身

Yichao Liu、Xiaomin Ma、Kun Chao、Fei Sun*、Zihao Chen、Jinyuan Shan、Hanchuan Chen、Gang Zhao 和 Shaojie Chen教育部和山西省先进传感器与智能控制系统重点实验室，物理与光电学院，太原理工大学，中国太原，*030024** 通讯作者：sunfei@tyut.edu.cn

在日益复杂的集成系统、航空航天设备、生化生产等领域，同时操控多个物理场发挥着重要作用。对于集成度较高的片上系统（例如电子/光子芯片以及射频/微波电路），既要考虑电磁信息/能量的传输，也要考虑散热/热回收，因此，同时精确、高效地控制电磁波和热通量的传播尤为重要。本研究提出了一种基于热电磁零介质的图形化设计方法，可按照预先设计的路径同时控制电磁波的传播和热场。我们通过热电磁表面变换设计了一种热电磁斗篷，可同时对电磁波和热场产生隐身效应，并通过数值模拟和实验测量进行了验证。本研究提出的热电磁表面变换为同时控制电磁场和温度场提供了一种新方法，可用于实现一系列新型热电磁器件，例如热电磁移位器、分束器、弯曲器、多路复用器和模式转换器。所设计的热电磁斗篷开辟了构建隐蔽区域的新途径，在该区域内，任何物体都不会同时对外部电磁波和温度场产生扰动。这有望在改善热-电磁兼容问题、保护热-电磁敏感元件以及提高复杂片上系统的能量利用效率方面发挥重要作用。

在许多应用领域中，同时调控热场和电磁波对电子系统至关重要，例如对电子芯片中的温度敏感元件进行热流屏蔽[1]，、对有源相控阵雷达系统[2]或高功率激光板条进行冷却[3]，、以及回收电磁器件中的余热[4,5]，

并同时提升太阳能电池中的电磁能量收集和表面集热能力[6]。尤其对于电子/光子芯片系统[7-12]，不同模块高度集成在同一区域内，以实现更多功能、更快的处理速度、更低的成本和能耗，但这不可避免地会带来一些其他问题，例如不同模块之间的电磁兼容性，以及电阻元件或高速计算模块的散热。然而，目前仍缺乏在芯片上对热流和电磁波进行多物理场调控的有效方法，部分原因在于缺少能够按照预期同时作用于热场和电磁场的合适多物理场超材料，另一部分原因则在于缺乏指导如何同时调控热场和电磁场的严谨、系统的理论。因此，亟需一种能够同时调控片上系统中热场和电磁场的严谨有效方法，以同时解决芯片集成度提高所导致的电磁兼容性和散热问题。

变换光学/变换热力学[13-15] 是针对单一物理场（即电磁场或热场）的一套严谨理论和强大的设计方法[16-18]。一些新型片上光学器件，例如多模波导弯曲器和多模波导交叉，已通过变换光学[19]进行了理论研究[20-22]，并通过实验得到验证。然而，这些新型片上器件都局限于单一物理场，无法同时解决高集成度芯片上的散热和电磁兼容性问题。随着超材料[23] 和变换光学的发展，利用单一器件同时调控两种物理场已成为可能，其中大多数研究针对静电场和温度场的同时调控，例如热-静电隐身[24,25]、热-静电聚集器[26]、热-静电伪装[27,28],以及双功能热-静电器件[29,30]。近年来，多物理场调控研究正逐步从热-静电场拓展至其他物理场，例如可同时实现电磁波、声波和水波隐身的地毯斗篷[31], 、磁静态-声学隐身斗篷[32]，以及电磁-声学隐身涂层[33,34]。然而，目前针对其他物理场的多物理场器件，主要是针对具体功能逐一设计和优化超材料/超表面[31-34]，因此，仍缺乏一种通用理论（例如变换光学[24,29]，或在热-静电器件设计中求解拉普拉斯方程[25,27,30]），以实现对其他物理场的多物理场调控。近期，有研究提出了一种曲面变换方法，用于设计各种声学-电磁器件，这些器件可通过空气中的铜板阵列实现[35], ，或可为设计用于其他物理场的多物理场器件提供新的理论思路。然而，目前仍没有可用于同时调控电磁波和温度场的通用理论，也没有任何相关报道能够同时对电磁波和温度场产生隐身效应。

在本研究中，我们从理论上提出了一种热-电磁零介质（TENM），其可同时作为电磁波和热

场的完美“内窥镜”。随后，基于TENM的理想投影特性，提出了一种表面设计方法，即热电磁表面变换。通过图形化方式，可以设计出具有多种功能的热电磁器件（例如热/电磁分离、弯曲和扩展）。此后，提出了一种通过交错排列的铜板和发泡聚苯乙烯（EPS）板实现简化TENM的方法，该方法保留了与理想TENM相同的方向投影特性。作为示例，基于所提出的热电磁表面变换，设计了一种可同时作用于电磁波和热场的片上热-电磁斗篷，能够保护芯片上的热敏电气元件免受周围热流的影响，同时不影响辐射元件产生的电磁辐射方向图。最后，在覆盖有导热垫的薄泡沫片上，通过交错排列的铜和EPS制备了片上热-电磁斗篷，并分别使用红外摄像机和矢量网络分析仪（VNA）对其热学和电磁特性进行了实验测量，结果显示其对电磁波和热通量均表现出预期的隐身效应。

图1展示了本研究设计的热电磁斗篷在高集成度片上系统中的作用。如图1(a)所示，片上周围电阻元件产生的余热可能影响（甚至烧毁）处理单元，也可能干扰片上周围辐射元件发出的电磁辐射。将电阻元件和辐射元件移离处理单元可以解决这一问题，但会降低片上系统的集成度。图1(b)中的片上热-电磁斗篷无需降低集成度即可解决上述问题：电磁信号和余热可由所设计的斗篷同时绕过处理单元传导。因此，余热会被冷却/回收单元收集，辐射元件产生的辐射方向图也不会受到芯片上其他相邻元件的影响，从而有效解决片上系统集成度提高所带来的电磁兼容问题和散热/热回收问题。

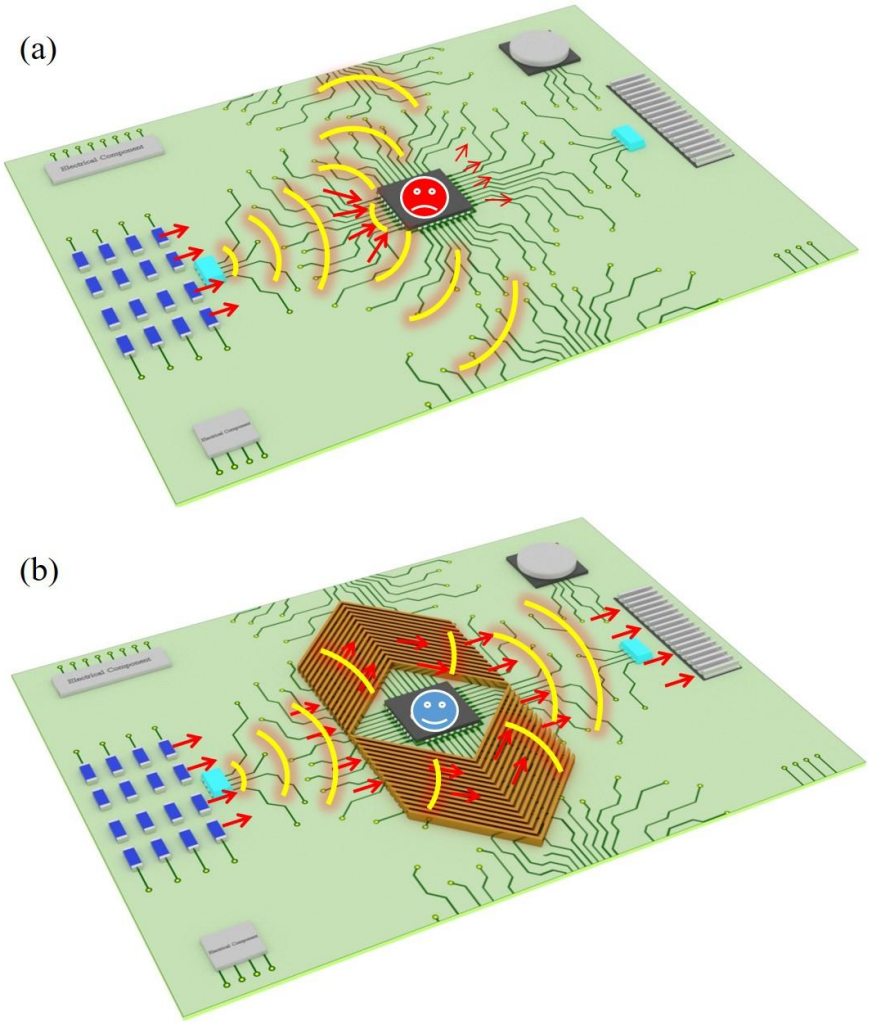

图1. 由多个功能模块组成的片上系统示意图，分别为（a）未配置斗篷和（b）配置所设计的热电磁斗篷。（a）中央处理器CPU（即中心区域的热敏电气元件）会受到来自芯片上周围电阻元件（蓝色块）的聚集余热（红色箭头所示）影响，这可能使处理单元周围的温度高于其额定温度，或因梯度温度场产生热应力/变形，进而影响其工作效率并加剧老化。同时，CPU会扰乱来自周围辐射元件（例如青色天线）的电磁信号（黄色曲线表示）。（b）在同一片上系统中，所设计的热电磁斗篷（橙色）设置在CPU周围。在这种情况下，电磁信号和废热可同时被引导绕过热敏CPU。因此，CPU不会受到废热（或来自周围电阻元件的梯度温度场）的影响，也不会影响来自周围辐射元件的电磁信号的辐射方向图。同时，废热可被后续的冷却/回收单元有效收集。

兼具电磁波与热场功能的多物理场零介质

单物理场零介质（也称虚无介质或变换不变材料），例如用于电磁波的光学零介质 [36-40]、用于声波的声学零介质 [41-43]、用于静磁场的磁场软管[44],以及用于热场的热场软管 [45,46]，凭借其完美定向投影的特性，为控制单一物理场提供了一种灵活而简单的方法。例如，光学零介质是一种高度各向异性的电磁介质，其介电常数和磁导率沿主轴方向无限大，而在其他方向上接近于零，因此能够引导电磁场沿主轴传播，并充当电磁场的完美“内窥镜” [36-40]。然而，目前关于多物理场零介质的理论与实验研究仍然不足，例如能够同时充当电磁波和热场完美“内窥镜”的热电磁零介质（TENM）。本研究将展示如何通过变换光学/变换热力学中的极限拉伸推导 TENM 所需的参数，并利用天然材料实现简化热电磁超材料。

利用变换光学和变换热力学，可以通过以下关系建立物理空间（不带撇号）和参考空间（带撇号）中的三个材料参数（即介电常数、磁导率和热导率） [13-15]:

$$\alpha = \frac{J\alpha' J^{T}}{\det(J)}, \tag{1}$$

其中，α（以及 α′）可以是相对介电常数 ε、相对磁导率 μ或热导率 κ；$J = \partial(x, y, z)/\partial(x', y', z')$ 是雅可比矩阵，表示两个空间之间的坐标变换。

TENM 可以具有灵活的形状（见图 2(a)），并可充当连接两个任意形状曲面 S_1 和 S_2的完美“内窥镜”。为推导 TENM 的材料参数，填充 TENM 的整个任意形状区域总可以通过以下方式划分为许多连续的小梯形（其中一些以图 2(a) 中随机标示的橙色小梯形为例）：确定任意形状 TENM 的两个端面 S_1和 S_2 后，可通过图 2(a) 中的蓝色曲线段对S_1 和S_2上的点进行几何投影，从而建立一一对应关系；相邻曲线段之间以亚波长距离H分隔。相邻蓝色曲线段围成的区域还可进一步分解为若干小梯形，其宽度D 远小于波长（见图 2(b)）。接下来，只需利用变换光学/变换热力学计算每个小梯形的材料参数。每个小梯形的上下边均平行于 TENM 的局部主轴，该主轴在图 2(b) 的局部坐标系中标记为 x轴。

首先，我们考虑一种坐标变换，它可以将参考空间中的薄板（见图2(c)）变换为物理空间中的小梯形（见图

2(b)），可写为：

$$\begin{cases} x = M(y)x' + X_0(y) \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}, \tag{2}$$

其中拉伸因子 M 定义为 $(\quad)=\quad+\quad(\quad\theta_2-\quad\theta_1)\cot\quad\cot D\quad yM\quad y$ ，

以及 $_0(\quad)=\quad\theta_1\cot Xy\,y$ 。D 和 Δ 分别是物理空间中梯形底边的长度和参考空间中薄层的长度，

如图2(b)所示，θ_1（θ_2）是物理空间中x轴与梯形左（右）侧边之间的夹角。式（2）中坐标变换的雅可比矩阵可写为：

$$J = \begin{pmatrix} M(y') & x'\dfrac{\partial M(y')}{\partial y'} + \dfrac{\partial X_0(y')}{\partial y'} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

通过式（3）中的坐标变换，结合式（1）中的变换光学/变换热力学，物理空间/参考空间中的材料参数（ε、 μ和 κ）之间的关系为：

$$\alpha = \alpha' \begin{pmatrix} \dfrac{D+y(\cot\theta_2-\cot\theta_1)}{\Delta} + \dfrac{\left[x'(\cot\theta_2-\cot\theta_1)+\Delta\cot\theta_1\right]^2}{\Delta\left[D+y(\cot\theta_2-\cot\theta_1)\right]} & \dfrac{x(\cot\theta_2-\cot\theta)+\Delta\cot\theta_1}{D+y(\cot\theta_2-\cot\theta_1)} & 0 \\ \dfrac{x'(\cot\theta_2-\cot\theta_1)+\Delta\cot\theta_1}{D+y(\cot\theta_2-\cot\theta_1)} & \dfrac{\Delta}{D+y(\cot\theta_2-\cot\theta)} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\Delta}{D+y(\cot\theta_2-\cot\theta_1)} \end{pmatrix}. \tag{4}$$

其次，我们考虑参考空间中的每个薄层都极薄的情况（即 $\Delta\to 0$）。在这种情况下，物理空间中的每个小梯形对应于参考空间中一个体积为零的曲面，因此，每个小梯形中的相应材料参数都退化为 TENM（即零介质）。由于实际空间中填充 TENM 的每个小梯形的两侧对应于参考空间中的同一个曲面，因此每个小梯形两侧的热场/电磁场应当相同，这意味着填充 TENM 的每个小梯形的功能是在理想情况下将热场/电磁场从其前侧投影到后侧。取公式（4）中的极限 $\Delta\to 0$ （注意 $0 \le x' \le \Delta$），即可得到理想 TENM 所需的材料参数：

$$\varepsilon = \mu = \kappa \sim \begin{pmatrix} \infty & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

如公式（5）所示，物理空间中每个小梯形内的理想 TENM 都是极强各向异性介质，其介电常数/磁导率/热导率沿其局部主轴（即图 2(a) 中蓝色曲线段的切向）均为无穷大，而在其他方向上几乎为零。对于图 2(a) 中填充 TENM 的任意形状区域，总可以将其分解为若干个局部连续的小梯形，这些小梯形的功能是在理想情况下将热场/电磁场从其前侧投影到后侧，并且每个小梯形中的材料参数可在其局部主坐标系中用公式（5）表示。这些小梯形连续分布在 TENM 内部，即前一个小梯形的末端与后一个小梯形的前端连续相接，这意味着每个局部 TENM 的主轴也连续相接。因此，一旦在两个任意形状曲面 S_1之间的区域内填充 TENM，且其主轴从 S_1连续连接到 S_2，任意形状曲面 S_1上的整体热场/电磁场就会被理想地投影到另一个任意形状曲面 S_2,上。

理想TENM理论上能够同时充当电磁波和热场的完美“内窥镜”，其性能也已通过图 2(d) 和 2(e)中的数值模拟得到验证。如图 2(d) 和 2(e)所示，当电磁波/热线源置于管状TENM的一个表面 S_1上时，电磁波和热流都能沿TENM的主轴从S_1 方向投影至S_2,，进而在另一表面S_2形成电磁波/热成像光斑。TENM可具有多种形状，以适用于不同应用，例如，用于同时分流电磁波和热流的分叉结构（见图 2(f) 和 2(g)中的分形树结构），或用于同时屏蔽电磁波和热流的多孔结构（见图 2(h) 和 2(i)中带孔的“太极”形结构）。需要注意的是，理想TENM所需的参数包含无穷大和零值，在实际中几乎难以实现。后文将介绍如何设计简化热电磁超材料，使其仍保留与理想TENM相同的方向投影性能，并可由天然材料制成。

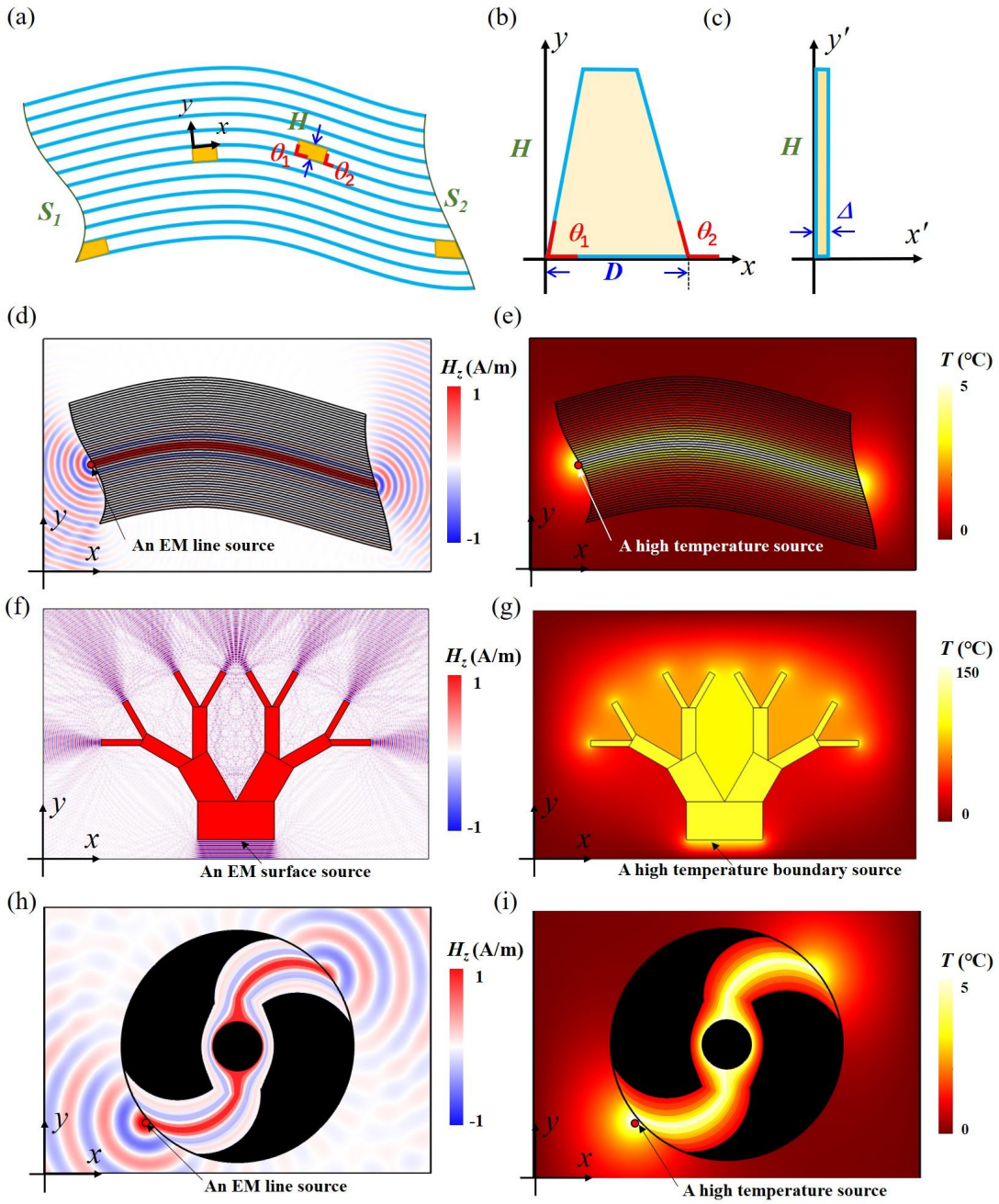

图2。（a）管状TENM的基本示意图，该结构连接两个任意形状的曲面S_1 和S_2，，并可沿其主轴（蓝色曲线）将热场和电磁场分布从S_1 同时投影到S_2 。（b）物理空间中零介质的任意梯形单元被变换为（c）参考空间中的压缩薄板。当线电流电磁源和高温源位于TENM的输入表面S_1上时，分别绘出了归一化磁场（d）和温度场（e）的模拟结果。对于主轴沿树干方向的分形树形TENM，分别给出了归一化磁场（f）和温度场（g）的模拟结果；该结构可将电磁场（f）和热流（g）从根部分流至顶部枝条。太极形TENM的归一化磁场（h）和温度场（i）的模拟结果分别如下，该结构可引导电磁场（h）和

中心隐蔽孔洞周围的热流（i）。(h) 和 (i) 中的黑色区域表示设有理想电导体边界和热绝缘边界的区域，电磁场和热流均不会接触这些区域。数值设置的详细信息见补充说明1。

基于 TENM 的热电磁表面变换

由于 TENM 能够沿其主轴同时投影电磁场和热场，我们可以进一步提出一种表面设计方法，即热-电磁表面变换，以图形化的方式实现对电磁场和热场的同步调控。借助基于 TENM 的热-电磁表面变换，热电磁器件的设计问题可以视为图 3(a) 所示的黑箱问题。一旦给定入射到黑箱并从黑箱中出射的热场 / 电磁场分布（例如，图 3(a) 中黑色和红色虚线所示的入射/出射电磁波前或等温面），热电磁器件的设计过程就转化为以图形化方式确定黑箱内部 TENM 的形状和主轴的问题。整个图形化设计过程可概括为两个步骤（见影片1）：第一步，根据入射/出射热电磁场确定 TENM 输入/输出边界的形状（即图 3(a) 中黑色和红色实线），其形状可以设计为与入射/出射电磁波前或等温面相同（例如，图 3(a) 中黑色/红色虚线与黑色/红色实线具有相同的形状）。第二步，确定黑箱内部 TENM 的主轴，这对应于几何上寻找一种适当的一一投影，将 TENM 输入边界上的点投影到 TENM 输出边界上的点（例如，图 3(a) 中的蓝色箭头线）。在这种情况下，几何投影的方向正是 TENM 的主轴。需要注意的是，TENM 输入/输出边界之间的几何投影并不唯一，通常可以选择简单的线性投影。

如图3(b)所示，以热电磁斗篷为例来说明这种图解法。考虑到热电磁斗篷的一项功能是使输入和输出的电磁波前或等温面保持相同，因此，如果输入的电磁波前或等温面是平面，黑箱的输出也应是一个平面。一旦将输入和输出的电磁波前（以及等温面）设计为平面（分别由图3(b)中的黑色虚线和红色虚线表示），便可相应地将黑箱的输入边界（黑色实线）和输出边界（红色实线）确定为两个平面。考虑到热电磁斗篷的另一项功能是形成一个隐蔽区域，使放置在其中的物体不会对电磁波和温度场产生任何“散射”，例如，可将隐蔽区域设计为最简单的正方形（由图3(b)中的绿色区域表示）。通过热电磁表面变换设计热电磁斗篷的下一步是“如何将

黑色实线段上的点逐一几何映射到红色实线段上，同时不触及绿色区域”。

最方便的几何投影方法是使用分段折线连接隐身斗篷的输入表面和输出表面，如图3(b)中的蓝色箭头线所示。需要注意的是，带箭头分段折线的方向与填充在隐身斗篷内的 TENM 的主轴方向相同。一旦在黑箱内通过几何方式确定了隐身斗篷的输入表面和输出表面，以及隐身斗篷内部 TENM 的主轴，便只需用主轴方向与蓝色带箭头分段折线方向相同的 TENM 填充该区域（黄色所示），即可得到热电磁斗篷；对于平面波入射，该斗篷能够同时实现对绿色区域内物体的热电磁隐身。被隐藏的绿色区域也可以设计成任何其他形状，只要确保从输入表面上的点出发的投影线段，在投影到输出表面时不会接触其他形状的隐蔽区域即可（即蓝色带箭头分段折线不会接触绿色区域；补充说明2中的图S5给出了相关示例）。

图3(e)和3(f)分别展示了在探测波前/等温线为平面的情况下，热电磁斗篷（通过图3(b)中的热电磁表面变换设计）对电磁波和热场的模拟隐身效应。鉴于TENM具有完美投影特性，无论何种形式的探测波前/等温线入射到所设计隐身斗篷的输入表面，它们都会沿TENM的主轴完美投影到隐身斗篷的输出表面。因此，所设计的隐身斗篷仍适用于其他任何形式的探测波前/等温线，例如图3(g)和3(h)中的线源。为了进一步比较隐身效应，补充说明2的图S5给出了图3(e)–(h)中未使用所设计热电磁斗篷时的对比模拟结果。

这种图解法也可高效用于设计其他热电磁器件，例如图3(c)中的热电磁移位器和图3(d)中的热电磁分束偏转器。图3(c)中的热电磁移位器可在预先设计的距离处同时移位入射热电磁场，而不改变其方向。假设入射波前/等温线为一个平面（图3(c)中的黑色虚线所示），出射波前/等温线为另一个平面（图3(c)中的红色虚线所示），该平面与入射平面平行，并沿y 方向固定偏移。根据表面变换方法，可分别用图3(c)中的黑色和红色实线确定热电磁移位器的输入表面和输出表面。随后，可将连接所设计移位器输入表面和输出表面的线段选作TENM的主轴（图3(c)中的蓝色箭头线所示）。图3(i)和图3(j)展示了图3(c)中热电磁移位器的模拟结果，该移位器可沿垂直于其传播/扩散方向的方向，将两种热电磁场同时移位预先设计的距离

。借助表面变换方法，图3(d)展示了一种能够对电磁场和热场进行分束和偏转的结构。图3(k)和图3(l)展示了图3(d)中热电磁分束偏转器的模拟结果，该分束偏转器可将电磁场和热场分成两部分，并使它们沿不同方向传播/扩散。

借助热电磁表面变换，可通过影片1中标准化的黑箱设计步骤，设计出一系列新颖的热电磁器件，例如热电磁分束器、弯曲器、多路复用器和模式转换器。其他热电磁器件的更详细设计、潜在应用及仿真结果见补充说明2。

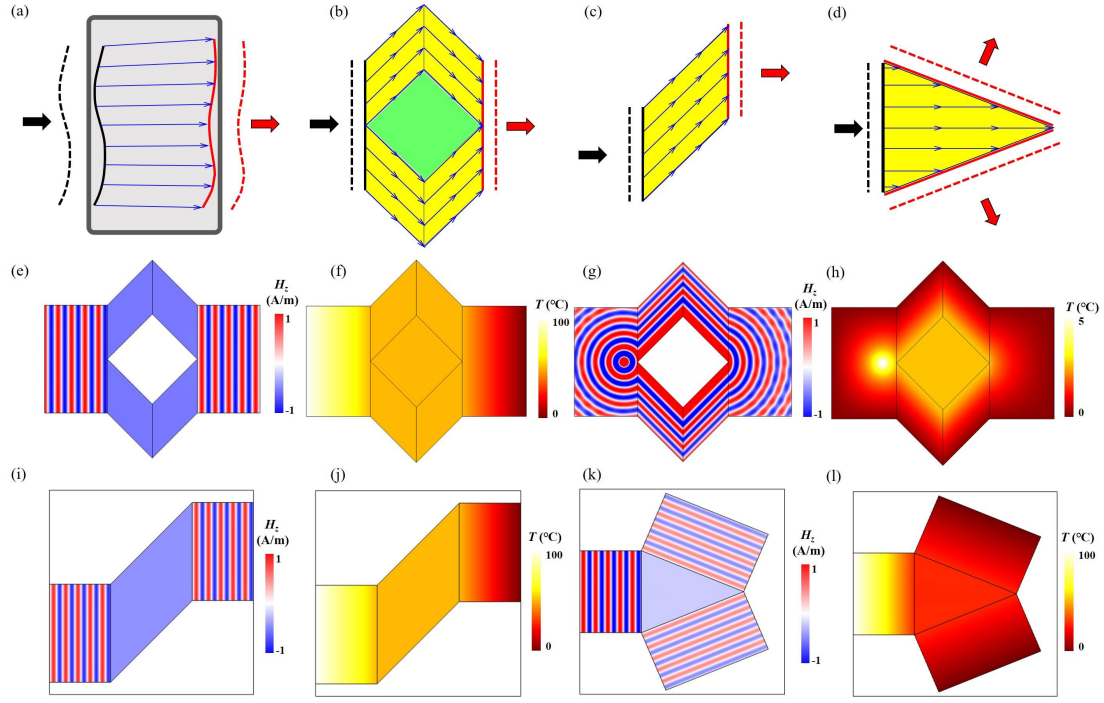

图 3. (a) 基于 TENM 定向投影特性的图解设计方法示意图。黑色和红色箭头分别表示输入场和输出场，相应的波前（或等温面）以黑色/红色虚线表示。方框内的黑色和红色实线是 TENM 的输入/输出边界。带蓝色箭头的曲线表示一种可能的投影。(b) 采用 (a) 中所述图解法设计的热电磁斗篷。输入/输出边界设计为直线（与直线型输入/输出电磁波前和等温面保角）。黄色区域为 TENM，其主轴沿蓝色箭头线排列。绿色区域为隐蔽区域。(c) 热电磁移位器和 (d) 热电磁分束偏转器采用 (a) 中所述的相同图解法设计。模拟得到的磁场分布 (e, g) 和温度

平面探测波/等温线入射情况下热电磁斗篷的分布（f、h），以及柱面探测波/等温线入射情况下的分布（g、h）。平面波/等温线入射情况下，热电磁移位器（i、j）和分束偏转器（k、l）的仿真磁场分布（i、k）和温度分布（j、l）。

通过交错排列铜和EPS板实现简化二维热电磁超材料

要实现公式（5）中的理想TENM参数，一种有效方法是采用由两种具有亚波长间隔的各向同性介质组成的交错结构。基于有效介质理论，两种交错各向同性介质的有效电磁/热参数可表示为（见补充说明3）：

$$\begin{cases} \dfrac{1}{\alpha_{\perp}} = \dfrac{f_1}{\alpha_1} + \dfrac{f_2}{\alpha_2} \\ \alpha_{//} = f_1\alpha_1 + f_2\alpha_2 \end{cases}, \tag{6}$$

其中，α可以是相对介电常数 ε、相对磁导率 μ或热导率κ，而$f_i(i=1,2)$是第i种各向同性介质的填充因子。// $\perp$ 分别表示平行于和垂直于两种介质界面的方向。然而，要通过公式（6）中的交错各向同性介质实现公式（5）中的理想TENM，需要一种参数为零的介质（例如 $\varepsilon_1 = \mu_1 = \kappa_1 = 0$）和另一种参数为无穷大的介质（例如 $\varepsilon_2 = \mu_2 = \kappa_2 \to \infty$），而天然材料无法实现这一点。由于利用热电磁表面变换设计各种热电磁器件的关键，在于基于TENM的性质，同时对电磁波和温度场实现完美的方向投影，因此，具有简化材料参数的介质（称为简化热电磁超材料）同样可以作为热电磁表面变换中的基本单元，用于设计各种热电磁器件；这类介质也能够同时对电磁波和温度场产生相同的方向投影（但会产生较小的散射）。

根据材料手册[47-49]中自然界材料的电磁参数和热导率，我们发现，图4(a)中亚波长间隔排列的铜板和EPS板可以构成简化的二维热电磁超材料，实现TM偏振电磁波和面内温度场的同步投影。在这种情况下，式(6)中的两种交错介质分别为铜（其参数为 $\varepsilon_1 \to \infty$, μ_1=1, κ_1=400 W/(m·K)，且$f_1=(p-w)/p$）和EPS（其参数为ε_2=1，μ_2=1，κ_2=0.04W/(m·K)，且$f_2=w/p$），其有效电磁/热参数可由式(6)[50,51]计算得出：

$$\begin{cases} \varepsilon_x \to \infty \\ \varepsilon_y = 2 \\ \mu_z = 0.5 \\ \kappa_x \approx 200\mathrm{W/(m\cdot K)} \\ \kappa_y \approx 0.08\mathrm{W/(m\cdot K)} \end{cases}, \tag{7}$$

其中，填充因子取为$f_1=f_2=0.5$。由于铜的填充因子f_1, 较大时，交错介质表现为更好的热学隐身介质、但电磁隐身介质性能较差；而铜的填充因子f_1, 较小时，交错介质表现为更好的电磁隐身介质、但热学隐身介质性能较差，因此在后续设计中，我们取$f_1=f_2=0.5$，以平衡简化热电磁超材料对电磁场和温度场的性能。

为验证式（7）中简化热电磁超材料的性能，可通过图3(c)中的热电磁表面变换设计一种二维热电磁移位器。该移位器能够将热电磁场的分布沿预先设计的距离从输入表面移位至输出表面，并可通过图4(b)中的交错铜板和EPS板实现；其排列方向与x 轴成固定角度 45°，且每块板之间的间距为$w = p/2=\lambda_0/10$（λ_0 为入射电磁波的波长）。与图3(i)和图3(j)中的理想热电磁移位器相比，仿真结果表明，由简化热电磁超材料实现的二维热电磁移位器对于电磁波（例如图4(c)和图4(e)中分别所示的平面TM偏振电磁波和线电磁源）以及热流（例如图4(d)和图4(f)中分别所示的平面等温线和线热源）仍能实现令人满意的移位效果。

图3(b)中通过热电磁表面变换设计的二维热电磁斗篷，也可以通过简化热电磁超材料实现，其中铜板与发泡聚苯乙烯板之间的间距选为$w = p/2=\lambda_0/11$。图4(g)-4(j)中的数值模拟验证了简化热电磁超材料实现的热电磁斗篷在不同热电磁探测源下的性能。与图3(e)-(h)中的理想热电磁斗篷相比，图4(g)-4(j)中由简化热电磁超材料实现的热电磁斗篷仍能提供令人满意的热电磁隐身效应。由于空气与简化热电磁超材料之间存在阻抗失配，简化热电磁超材料构成的移位器/隐身斗篷周围会出现少量电磁反射/散射；通过减小两个交错排列的各向同性介质之间的间距p 或减小铜的填充因子f_1，可以减少这些反射/散射。有关填充因子f_1 的选择以及简化热电磁超材料的带宽分析，详见补充说明3。

通过热-电磁表面变换设计的各种其他二维热电磁器件，也可以用简化热电磁超材料以类似方式实现。针对不同应用，二维热电磁器件可以制成很高（只要入射 TM 极化波/等温线位于器件的同一二维截面内）[40]，也可以制成位于一个表面内（只要入射 TM 极化波/等温线被限制在同一表面上），以实现图 1 所示的片上热电磁控制。接下来，一种二维热-电磁

采用简化热电磁超材料在一个表面内制成的电磁隐身斗篷，其片上热电磁隐身性能已通过实验验证。

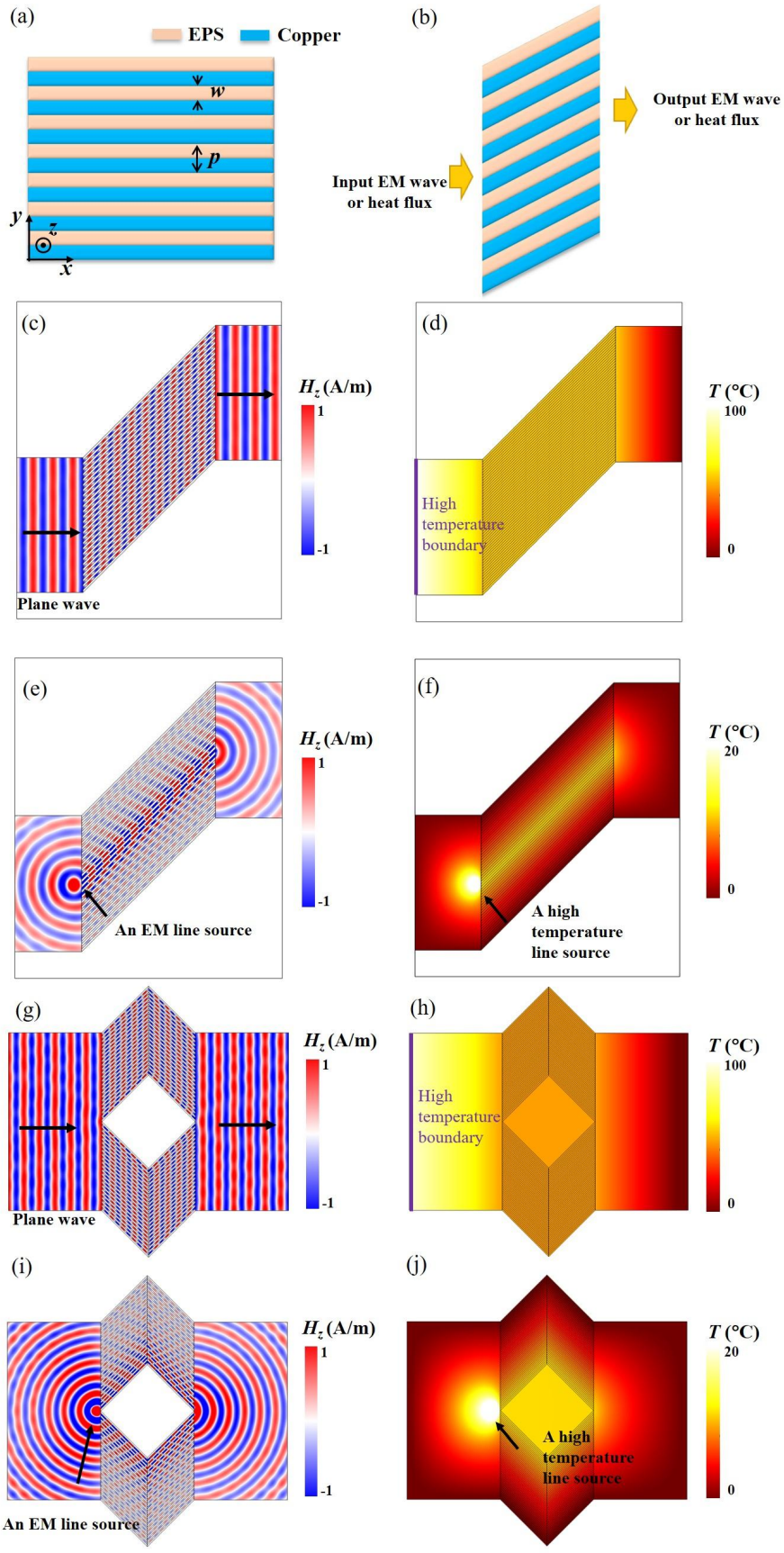

图 4（a）通过交错排列铜板和发泡聚苯乙烯板实现的简化热电磁超材料。（b）由简化热电磁超材料实现的热电磁移位器。二维仿真

简化 TENM 热电磁移位器在（c、d）平面 TM 偏振波/等温线入射和（e、f）线热源/电磁源条件下的磁场/温度场分布。简化 TENM 热电磁隐身斗篷在（g、h）平面 TM 偏振波/等温线入射和（i、j）线热源/电磁源条件下模拟得到的二维磁场/温度场分布。

实验设计与测量

为通过交错排列的铜板和 EPS 板，实验验证上述设计的热电磁斗篷的片上隐身效应，我们制作了图5(a)所示的样品斗篷，该斗篷由96块铜板（橙色）和92块 EPS 板组成（绿色），两者尺寸相同（即长度2 141l a=· =√mm，宽度w = 3mm，高度为h = 10mm）。工作波长设计为 λ 0=100w/9 =100/3mm。隐蔽区域（即黑色凸起方块）在x-y 平面内的横截面为正方形，对角线长度为2a = 200 mm，高度为h = 10mm；其周围由铜板包围，内部填充 EPS。使用一片泡沫片（灰色，尺寸为440mm×616mm×100mm，热导率为0.04W/m/K），并在其上覆盖薄导热垫（蓝色，厚度为 Δh = 2mm，热导率为13W/m/K），以模拟片上运行环境。有关样品制作的更多细节，请参见补充说明4。

图5(a)展示了用于验证所制备样品片上热电磁隐身效应的实验装置。在热学实验部分，将带电源的加热板（硅橡胶加热器，在图5(a)中以黄色标示）粘贴在一个导热垫的边界处，可提供约5.7 W的恒定热功率，并在样品上产生入射热流。另一个导热垫的边界处放置了一块带电源的冷却板（珀尔帖冷却器），作为恒定低温源，并在实验过程中维持 0°C。测量期间，所制备的隐身斗篷固定在片上结构（即覆盖热垫的泡沫片）的中心。测量期间，整个结构上方覆盖一块尺寸相同的泡沫板，以避免上边界处发生热对流；该泡沫板也可模拟芯片的封装盖。使用红外摄像机实时监测温度变化。约4小时后，红外摄像机拍摄的温度分布不再变化（即整个系统达到热稳定状态），随后记录测得的温度分布，如图5(b)所示。图5(b)中的测量结果与图5(d)中的三维模拟结果吻合良好，表明所制备的样品能够使热流平滑地绕过隐蔽区域，并将该区域内的温差保持在较低水平（实验中为ΔT_{max}< 0.5 °C）。模拟和测量结果均证实，所设计的热电磁隐身斗篷能够保护隐蔽区域，使其免受极端温差影响，同时避免影响斗篷外部的温度场分布（即导热垫中的等温线仍保持平直）。

作为对照，还测量了移除隐身斗篷并以背景热垫替代的情况，如图5(c)所示；相应的仿真结果见图5(e)。结果表明，热流无法平滑地绕开黑色凸起方块，且黑色凸起方块内部出现较大的温差（即三维仿真和实验中均为 $\Delta T_{\max} \geq 4.6$℃）。在这种情况下，如果将任何热敏元件置于黑色凸起区域内，则无法获得热防护（该区域较大的温度场梯度会严重影响热敏元件的性能），而且周围温度场也会受到显著影响（即导热垫中的等温线发生畸变）。有关热场实验装置和测量的更多详情，请参阅补充说明5。

对于电磁实验部分，样品和片上结构与热实验相同。实验装置也如图5(a)所示，置于一个小型电波暗室中，周围由电磁金字塔吸波材料（QYH-J200）包围。使用一台矢量网络分析仪（ROHDE&SCHWARZ ZVL13，工作频率范围为5kHz至13.6GHz），该仪器可在设计频率f_0=9GHz下同时用作微波信号源和探测器，在电磁测量过程中通过一个端口（端口1）输出电磁波，并通过另一个端口（端口2）探测电磁波。源环形天线通过同轴电缆连接至矢量网络分析仪的端口1，可作为二维磁偶极子，模拟微波片上系统中的辐射元件；它固定在距芯片黑色凸起区域正面L = 30mm处。探测环形天线通过同轴电缆连接至矢量网络分析仪的端口2，在测量过程中可沿y轴移动，并用作场探测器。源天线和探测天线均沿z方向与隐身斗篷中心对齐，并位于片上结构表面上方5mm处。测量时，探测环形天线与黑色凸起区域背面保持L = 30mm的距离，并沿y方向以0.255λ_0 (=8.5mm)的间隔移动，随后测量矢量网络分析仪在不同位置（图5(f)中的圆点标记处）的S21参数，以获得相对磁场分布（图5(h)中的红点）。图5(h)中的实测磁场与图5(f)中的三维模拟结果吻合良好，这验证了所制备的隐身斗篷能够引导由片上辐射元件（此处为源环形天线）辐射的TM偏振电磁波平滑绕过芯片上的黑色隐蔽区域，且不会扰乱隐身斗篷另一侧的电磁辐射图样。

作为参考，我们还测量并模拟了移除隐身斗篷、仅保留隐蔽区域内物体（即由四块铜板围成的方形EPS区域）的情况；测量结果和三维模拟结果分别如图5(h)和图5(g)所示。在这种情况下，隐蔽区域内的物体会使大部分电磁波发生强烈散射，明显扰乱隐身斗篷另一侧原有的电磁辐射图样。有关电磁场测量的更多详情，请参见补充说明6。仿真和测量结果均证实，所设计的热电磁斗篷能够在片上结构中引导电磁波和热通量绕过隐蔽区域

（见影片2），这或许是同时解决高集成度片上系统中电磁兼容问题和散热问题的有效方法。

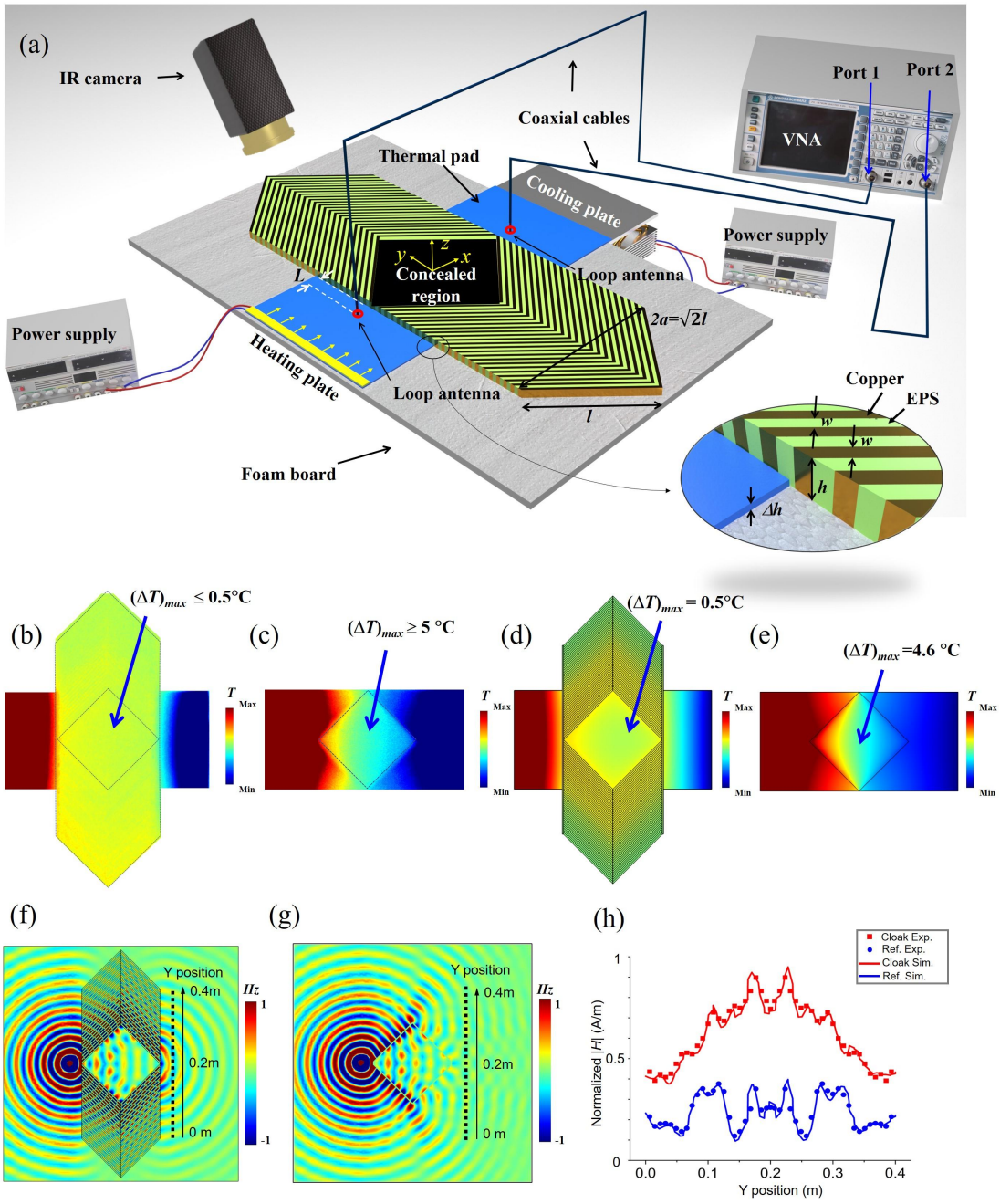

图5 (a) 测量热电磁斗篷的实验装置示意图。橙色和绿色狭缝分别表示铜和发泡聚苯乙烯。灰色泡沫板表面的两块蓝色薄导热垫共同模拟片上环境。黑色区域是TM偏振电磁波和热通量的隐蔽区域。测得的温度分布显示，在有斗篷（b）和无斗篷（c）的情况下，芯片上的黑色凸起方块不会和会影响入射平面等温线。带斗篷时的三维模拟温度分布

(d)和无隐身斗篷的情况(e)分别与(b)和(c)中的测量结果吻合良好。辐射元件（即环形天线）分别位于带隐身斗篷(f)和不带隐身斗篷(g)的芯片黑色凸起方块前方时，三维模拟得到的归一化*z*分量磁场。(h)沿(f)和(g)中标记虚线测得并模拟的磁场归一化幅值。

结论：

总之，我们提出了一种图形化设计方法，即热电磁表面变换，可同时控制电磁波和热场。借助所提出的方法，热-电磁器件的设计可转化为几何投影问题，并可通过标准化的黑箱设计步骤简便地设计出多种具有不同功能的热电磁器件。此外，采用所提出的方法设计的所有电磁-热器件，无需超材料/超表面，即可通过交错排列的铜板和EPS板实现。

作为一个示例，我们设计并通过实验验证了一种片上热-电磁斗篷，它能够保护芯片上的热敏电气元件免受周围热流的影响，同时不影响辐射元件产生的电磁辐射方向图。模拟结果与测量结果高度吻合，验证了所设计的热电磁斗篷能够有效引导来自片上天线的电磁波和来自周围热元件的热通量绕过隐蔽区域。所提出的方法还可用于设计具有其他功能的热电磁器件，例如同时实现热-电磁场分束/复用和模式转换，这类器件可应用于智能微控制系统以及集成度较高的片上系统。

数据可用性

支持本研究结论的主要数据和模型均可在本文及补充信息中获取。如有合理需求，可向通讯作者咨询更多信息。

致谢

本工作得到国家自然科学基金（编号：61971300、12274317、61905208）、中国-白俄罗斯“一带一路”电磁环境效应联合实验室开放基金（编号：ZBKF2022031202）以及山西省高等学校科技创新项目（STIP）（编号：2019L0159和2019L0146）的资助。

作者贡献

Yichao Liu：方法论、软件、实验设计、撰写初稿。Xiaomin Ma：样品制备、热学与电磁测量、数据记录。Kun Chao：热学测量、数据记录。Fei Sun：构思、方法论、监督、审阅与编辑。Zihao Chen：协助样品制备、协助电磁测量、数据记录。Jinyuan Shan：样品制备、协助电磁测量。Hanchuan Chen、Gang Zhao、Shaojie Chen：协助数据记录。所有作者均参与讨论。

利益冲突

作者声明不存在经济利益冲突。

参考文献：

1. Loke, D., Skelton, J. M., Chong, T.-C. & Elliott, S. R. 用于布尔逻辑和类脑计算的纳米尺度、可集成CMOS热引导结构设计。*ACS*应用材料与界面**8**, 34530-34536, (2016). 2. Tan, H., Zong, K. & Du, P. 用于相控阵天线冷却的对流叶脉形流体微通道中的温度均匀性。国际热科学杂志**150**, 106224, (2020). 3. Wang, J., Min, J. & Song, Y. 高功率固态激光板条的强制对流冷却。应用热工程**26**, 549-558, (2006年). 4. Zhang, Y. 等人用于汽车余热回收的高温高功率密度纳米结构热电发电机。能源转换与管理**105**, 946-950, (2015). 5. Jaziri, N. 等人具有圆柱形凹槽的低温共烧陶瓷基热电发电机，用于从电力电路中收集余热。应用热工程**184**, 116367, (2021). 6. Park, T.等人用于通过混合能源电池结构收集太阳热的光热激活热释电聚合物薄膜。*ACS*纳米**9**, 11830-11839, (2015). 7. Rogers, J. W. & Plett, C. 射频集成电路设计。(Artech House, 2010). 8. Han, S.-J., Garcia, A. V., Oida, S., Jenkins, K. A. & Haensch, W. 石墨烯射频接收器集成电路。《自然·通讯》**5**, 1-6, (2014). 9. Rebeiz, G. M. 毫米波与太赫兹集成电路天线。*IEEE*会刊**80**, 1748-1770, (1992). 10. Reed, G. T., Mashanovich, G., Gardes, F. Y. & Thomson, D. 硅光调制器。《自然·光子学》**4**, 518-526, (2010). 11. Shacham, A., Bergman, K. & Carloni, L. P. 面向未来几代芯片多处理器的片上光子网络。*IEEE*计算机学报**57**, 1246-

1260, (2008). 12. Piggott, A. Y. 等人。紧凑型宽带片上波长解复用器的逆向设计与演示。《自然·光子学》9, 374-377, (2015). 13. Pendry, J. B., Schurig, D. & Smith, D. R. 控制电磁场。《科学》312, 1780-1782, (2006年). 14. Sun, F. 等人。变换光学：从经典理论及应用到其新分支。《激光与光子学评论》11, 27, (2017). 15. Guenneau, S., Amra, C. & Veynante, D. 变换热力学：热流的隐身与聚集。《光学快报》20, 8207-8218, (2012). 16. Cai, W., Chettiar, U. K., Kildishev, A. V. & Shalaev, V. M. 利用超材料实现光学隐身。《自然·光子学》1, 224-227, (2007). 17. Schurig, D. 等人。微波频率下的超材料电磁隐身斗篷。《科学》314, 977-980, (2006年). 18. Lai, Y. 等人。幻象光学：将一个物体光学变换为另一个物体。《物理评论快报》102, 253902, (2009). 19. Wu, Q., Turpin, J. P. & Werner, D. H. 基于变换光学赋能的梯度折射率器件的集成光子系统。《光：科学与应用》1, e38-e38, (2012). 20. Li, S. 等人。基于变换光学的通用多模波导交叉。《光学》5, 1549-1556, (2018). 21. Gabrielli, L. H., Liu, D., Johnson, S. G. & Lipson, M. 用于多模波导弯曲段的片上变换光学。《自然·通讯》3, 1-6, (2012). 22. Li, S. 等人。通过变换光学形状优化实现的紧凑型宽带多模波导弯曲段。《光子学研究》8, 1843-1849, (2020). 23. Cui, T. J., Smith, D. R. & Liu, R. 超材料。(施普林格, 2010). 24. Li, J., Gao, Y. & Huang, J. 利用变换介质实现的双功能隐身斗篷。《应用物理学杂志》108, 074504, (2010). 25. Ma, Y., Liu, Y., Raza, M., Wang, Y. & He, S. 多物理场隐身斗篷的实验演示：同时操控热流和电流。《物理评论快报》113, 205501, (2014). 26. Lan, C., Li, B. & Zhou, J. 利用扇形结构同时聚集电场和热场。《光学快报》23, 24475-24483, (2015). 27. Yang, T. 等人。隐形传感器：在多物理场中同时实现传感和伪装。《先进材料》27, 7752-7758, (2015). 28. Zhang, X., He, X. & Wu, L. 一种适用于广泛天然材料的双层热电伪装装置。《复合结构》261, 113319, (2021). 29. Moccia, M., Castaldi, G., Savo, S., Sato, Y. & Galdi, V. 通过双功能超材料独立操控热和电流。《物理评论X》4, 021025, (2014). 30. Lan, C., Bi, K., Fu, X., Li, B. & Zhou, J. 可同时独立操控热场和电场的双功能超材料。《光学快报》24, 23072-23080, (2016).

31. Yang, Y., Wang, H., Yu, F., Xu, Z. & Chen, H. 用于电磁波、声波和水波的超表面地毯隐身衣。*Sci. Rep.* **6**, 1-6, (2016). 32. Zhou, Y., Chen, J., Liu, L., Fan, Z. & Ma, Y. 用于水下物体的磁声双物理隐形涂层。*NPGAsia Mater.* **12**, 1-11, (2020). 33. Zhou, Y. 等超薄电磁-声学两栖隐身涂层。*Adv.Opt. Mater.* **8**, 2000200, (2020). 34. Song, G. 等可同时实现微波吸收和降噪的透明耦合膜超材料。《光学快报》 **26**, 22916-22925, (2018). 35. Sun, F., Liu, Y. & He, S. 用于同时控制电磁波和声波的表面变换多物理场。《光学快报》 **28**, 94-106, (2020). 36. He, Q., Xiao, S., Li, X. & Zhou, L. 光学零介质：实现与应用。《光学快报》 **21**, 28948-28959, (2013). 37. Yan, W., Yan, M. & Qiu, M. 基于变换光学的广义虚无介质。*J.Opt.* **13**, 024005, (2010). 38. Sadeghi, M., Li, S., Xu, L., Hou, B. & Chen, H. 具有法布里-珀罗共振的变换光学。*Sci.Rep.* **5**, 1-7, (2015). 39. Zhang, Y., Luo, Y., Pendry, J. & Zhang, B. 变换不变超材料。《物理评论快报》 **123**, 067701, (2019). 40. Zheng, B. 等极端参数全向隐身衣的实验实现。*Research* **2019年**, 1-8, (2019). 41. Fakheri, M. H., Abdolali, A. & Sedeh, H. B. 利用零介质实现任意形状的声学聚焦器。*Phys. Rev.Appl.* **13**, 034004, (2020). 42. Li, B., Sun, F. & He, S. 利用双层天然材料和声学零材料实现声学表面变换。*Appl. Phys. Express* **10**, 114001, (2017). 43. Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G. & Zhang, X. 声学放大超透镜的实验演示。*Nat. Mater.* **8**, 931-934, (2009). 44. Navau, C., Prat-Camps, J., Romero-Isart, O., Cirac, J. I. & Sanchez, A. 静磁场的远距离传输与路由。《物理评论快报》 **112**, 253901, (2014). 45. Yang, F., Tian, B., Xu, L. & Huang, J. 利用变换不变超材料实现热变色龙式旋转器的实验演示。*Phys.Rev.Appl.* **14**, 054024, (2020). 46. Sedeh, H. B., Fakheri, M. H., Abdolali, A., Sun, F. & Ma, Y. 热零介质赋能的实用热力学器件。*Phys. Rev. Appl.***14**, 064034, (2020). 47. Yucel, K., Basyigit, C. & Ozel, C. 见第*15*届热物性研讨会。 54-66. 48. Powell, R. & Touloukian, Y. 元素的热导率。《科学》**181**, 999-1008, (1973). 49. Bandyopadhyay, P. C., Chaki, T. K., Srivastava, S. & Sanyal, G. S. 聚苯乙烯泡沫在微波频率下的介电行为。*Polym. Eng. Sci.* **20**,

441-446, (1980). 50. Garcia-Vidal, F., Martin-Moreno, L. & Pendry. 带孔表面：新型等离激元超材料。*J. Opt. A: PureAppl. Opt.* **7**, S97, (2005年). 51. Shin, J., Shen, J.-T., Catrysse, P. B. & Fan. 作为各向异性超材料薄膜的贯穿式金属狭缝阵列。*IEEE J. Sel. Top. Quant.***12**, 1116-1122, (2006年).