

基于超表面的超薄隐身器件

褚宏晨, 赖 耘

(南京大学 物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 人工微结构科学与技术协同创新中心, 江苏南京 210093)

摘 要: 隐身是人类自古以来的美妙幻想和愿望。近年来,随着人工微结构超构材料领域的不断发展,隐身具备了坚实的科学理论基础和实现条件。早期的隐身设计大多数是基于变换光学原理,科学家们利用超构材料实现了渐变的折射率并在多个频段实现了隐身现象。然而,变换光学隐身器件通常具有较大的尺寸且不易制备,这极大地限制了隐身器件的应用和发展。近年来,超表面作为超构材料的二维对应物,由于其轻薄特性、制备容易、以及强大的电磁波调控能力吸引了人们广泛的关注和研究兴趣。利用超表面实现的超薄隐身器件有望解除传统隐身器件对大尺寸和极端参数材料的依赖,进一步推动了隐身领域的发展,并使隐身器件迈向实际应用。文中对近年来基于超表面的超薄隐身器件的相关研究进行了简要的回顾,着重介绍了其隐身原理,实现方法以及优劣势,最后对领域发展前景和方向提出了一些建议。

关键词: 隐身; 超表面; 超薄隐身器件

中图分类号: O441.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201038

Ultrathin invisibility cloaks based on metasurfaces

Chu Hongchen, Lai Yun

(Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, National Laboratory of Solid State Microstructures,
School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The invisibility cloak as a longstanding fantastic dream for humans is now within the realm of possibility, thanks to the development of metamaterials. Transformation-optics-based invisibility cloaks have been proposed and realized in many frequency ranges by utilizing gradient-index metamaterials. However, due to the large size of device and difficulty in fabrication, transformation-optics-based invisibility cloaks are significantly limited in practical applications. Recently, metasurfaces as the 2D counterpart of metamaterials have attracted tremendous interests because of its thin thickness and strong capability in manipulating the electromagnetic waves. Ultrathin invisibility cloaks based on metasurfaces release the demand on bulky sizes and extreme parameters, thus promoting further development of invisibility cloaks. This review overviewed recent progress in ultrathin invisibility cloaks based on metasurfaces, focusing particularly on the working principles, implementation methods, advantages and disadvantages. Finally, some advice was put forward on the trends of this fast-developing research field.

Key words: invisibility; metasurfaces; ultrathin cloaking devices

收稿日期:2020-06-10; 修订日期:2020-08-02

基金项目:国家自然科学基金(61671314, 11974176)

作者简介:褚宏晨(1990-),男,助理研究员,博士,主要从事隐身、电磁超表面等方面的研究工作。Email: chuhongchen@nju.edu.cn

导师简介:赖耘(1977-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事变换光学、隐身、电磁超材料、有效介质理论、声学超材料等方面的研究工作。Email: laiyun@nju.edu.cn

0 引言

自古以来,隐身都是人类最渴望实现的美妙幻想之一。从古希腊神话中的帕尔修斯 (Perseus) 的隐形头盔到哈利波特 (Harry Potter) 的隐形斗篷,无不展现了人们对隐身的巨大兴趣。隐身的元素常常出现在神话传说和文学、影视作品中。近年来,随着人类对自然规律的认识不断深入以及科技能力的飞速进步,隐身也像飞翔等很多古老的幻想一样成为了有望在不远的将来实现的新科技。

这里需要指出的是,这种神话中描述的隐身和最为人们熟悉的雷达隐身技术不同。雷达隐身即通过设计物体 (例如飞机、舰艇等) 的外观形状或者使用特殊的材料来减小其在某些方向上,特别是背向的散射,以此达到避免被雷达探测到的目的。雷达隐身在军事领域有着广泛的应用前景和重大的意义,因此相关研究引起了广泛的关注。通常雷达隐身的方法包括引入吸收涂层来吸收雷达波,采用独特的外观形状将反射波偏折,采用超表面实现漫反射^[1-4],等等。尽管这种减小物体在特定方向上的散射截面,而不是减少整体的散射截面的现象也被称之为隐身,但是明显区别于神话中隐身原本的含义。文中讨论的隐身是指在全空间 (透射式隐身器件) 或者半空间 (反射式隐身器件) 所有方向上都能减小被隐身物体的散射。

1 电磁隐身与超构材料

光线的弯曲可以通过渐变的折射率来实现,这导致了海市蜃楼等奇妙的光学现象。早期的隐身装置采用类似的原理来实现隐身。严格的数学证明可以基于变换光学原理做出。

2006 年,英国物理学家 J.B. Pendry 等和 U. Leonhardt 分别独立地提出了变换光学的概念和理论^[5-6]。基于麦克斯韦/亥姆赫兹方程组在坐标变换/保角变换下的形式不变性,变换光学证明了利用渐变参数材料,可以操控电磁波完美绕过一个被隐藏的区域,从而实现隐身。隐身器件的工作原理如图 1(a) 所示,其中隐身器件具有沿径向渐变的电磁参数,可以将其内的物体隐身。同年,美国杜克大学 D.R. Smith 等,利用开口圆环谐振器构成的超构材料在微波段实现了如图 1(b) 所示的电磁透射隐身器件^[7]。电磁波不论

从哪个方向入射到该隐身器件,都像穿过自由空间一样,不改变能量大小和传播方向。除此之外,英国帝国理工大学 J. Li 和 J.B. Pendry 等还提出了一种反射式隐身的方法^[8],如图 1(c) 所示。电磁波照射在隐身器件上就像是照在光滑的镜面上,会被镜面反射,从而将被隐身器件盖住的物体隐身。在实验上,美国加州伯克利大学 X. Zhang 等进一步将隐身的频率从微波推高到了光频段^[9]。如图 1(d) 所示,通过在硅材料中打孔,科学家们在红外波段成功地实现了反射式的隐身斗篷,并观察到了显著的隐身效果。基于变换光学,还可以实现一些不同于以上的隐身原理。例如图 1(e) 中所示的非包裹式隐身机制^[10],其原理是基于物体和隐身器件之间的多重散射光干涉相消,从而实现了全方位的隐身。这和之前变换光学隐身方法的重要区别在于可以让被隐身的物体与入射电磁波接触,从而允许被隐身物体“看到”外界。基于类似原理,还可以实现任意的光学幻像物体^[11]。最近,浙江大学 H. Chen, 新加坡南洋理工大学 B.L. Zhang 等通过基于几何光学,操控光线折射绕行 (见图 1(f)),已经实现了很好的可见光宽频隐身效果^[12-13]。

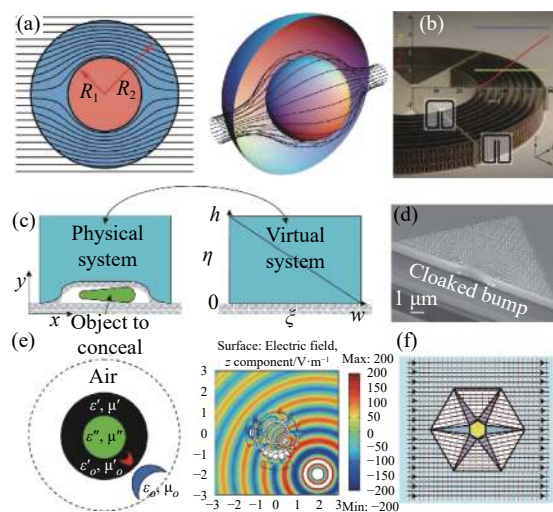


图 1 基于变换光学原理的隐身方法

Fig.1 Invisibility methods based on transformation optics

然而,基于变换光学的隐身器件通常需要较大的尺寸以及复杂的电磁参数空间分布。尽管可以利用超构材料实现,但是具有加工难度大、体积和质量较大、吸收明显等诸多不利因素,这些都限制了隐身器件的进一步发展和实际应用。如何实现轻薄实用的

隐身器件成为一个亟待解决的科学问题。

2 电磁超表面

最近,一类二维的超构材料成为了研究的热点,人们称之为超表面。超表面是一薄层超构材料,它可以在深亚波长的尺度上调控电磁波的相位、振幅和偏振等基本特性。与三维的体超构材料相比,二维超表面具有轻薄、制备容易等优势,而且具备强大的电磁波调控能力。2011年,美国哈佛大学 F. Capasso 等人提出了广义折反射定律^[14](见图 2(a)),通过引入一层 V 形人工微结构构成的超表面来产生沿界面梯度变化的相位突变,从而在光频段控制折射波和反射波的传播方向。此外,超表面产生了很多种新奇的现象和重要应用。例如,利用超表面产生类似于凸透镜的相位分布,可以实现被称为超透镜 (Metalens)^[15-18]的微纳光学成像器件(见图 2(b));当相位沿界面的梯度变化很快时,超表面可以实现高效的空间波到消逝波的转化(见图 2(c))^[19-20];利用超表面调控空间相位和振幅分布,可以实现高效的全息成像(见图 2(d))^[21-25];利用超表面还可以产生具有对应于不同角动量的结构光场(见图 2(e))^[26-27]或对具有不同自旋的光进行操

控(见图 2(f))^[28-31];超表面还为产生光学高维量子纠缠态提供了一个平台(见图 2(g))^[32]。此外,编码电磁超表面 (Coding metasurface)^[1-3, 33-35]还将电磁超表面和数字信号连接起来(见图 2(h))。总的来说,超表面在成像、显示、信息信号处理等诸多领域有广泛的应用前景。

3 反射式超薄隐身器件

超表面能否用于隐身,这成为了一个有趣的问题。因为超表面轻薄且易于加工的特性,使得它天生相比体超构材料具有更多优势。在 2013 年,东南大学 T.J. Cui 等就提出了利用超表面进行隐身的方法^[36]。具体的原理是通过调控不平表面上每点的反射相位,使得最终整体的反射波前等同于镜面反射的平面波前,如图 3(a) 所示。采用“工”字形结构单元,研究人员成功地在微波段验证了该隐身原理。

在 2015 年,美国加州伯克利大学 X. Zhang 等利用超表面在光频段实现了反射式隐身^[37]。由于超薄特性,他们称之为皮肤隐身衣 (skin cloak)。通过在凹凸不平的物体上覆盖一层精心设计的超表面,使得照射在其上的光波像是入射在光滑的镜面上一样发生镜面反射,从而实现了对物体的反射式隐身(见图 3(b))。其中超表面的基本结构单元采用了常见的金属-绝缘体-金属结构。底层的金衬底可以阻止电磁波透射保证了高反射率,而通过调节上层金块的尺寸可以调节反射相位。一个凹凸不平的曲面,在平面波照射下的反射波本来会有明显的漫反射特征。但覆盖上超表面之后,反射波变成了镜面反射中的平面波。实验验证了这个隐身器件具有良好的隐身效果。在波长 730 nm 的激光照射下,本来凹凸表面的反射图像可以看到明显的阴影(见图 3(c))。覆盖上超表面之后,反射图像变得非常均匀(见图 3(d)),类似镜面反射的效果。

由于上述超表面结构单元中的“工”字形结构和矩形块具有明显的各向异性,因此以上的反射隐身器件只能对一种偏振的入射波实现隐身^[36-38]。针对这个缺点,美国纽约城市大学的 A. Alu 等人利用各向同性的金属双圆环结构作为基本结构单元,设计了一种对偏振不敏感的微波反射隐身器件,并且在实验上实现了对三角形隆起的隐身(见图 4(a))^[39]。美国加利福

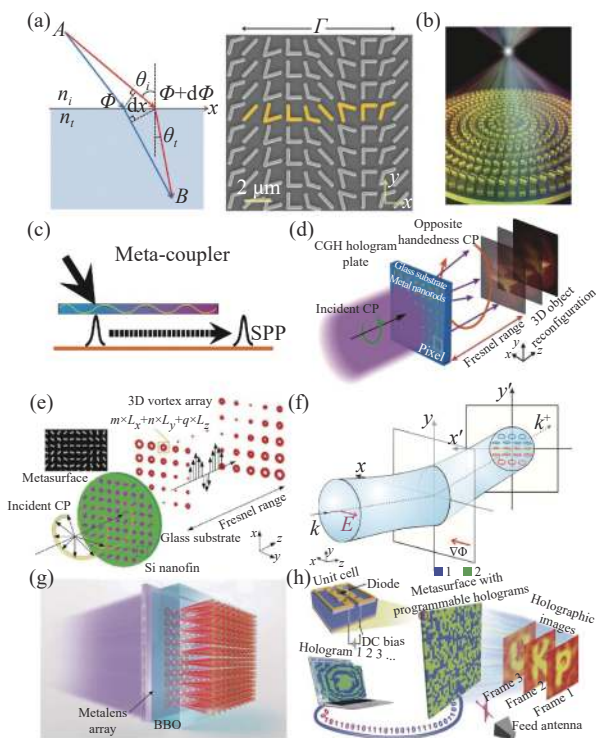


图 2 电磁超表面的工作原理与相关应用

Fig.2 Principle and applications of metasurface

尼亚大学圣迭戈分校的 B. Kanté 等人采用各向同性的电介质圆柱作为结构单元同样实现了针对三角形隆起的对偏振不敏感的微波反射隐身^[40]。这个设计的

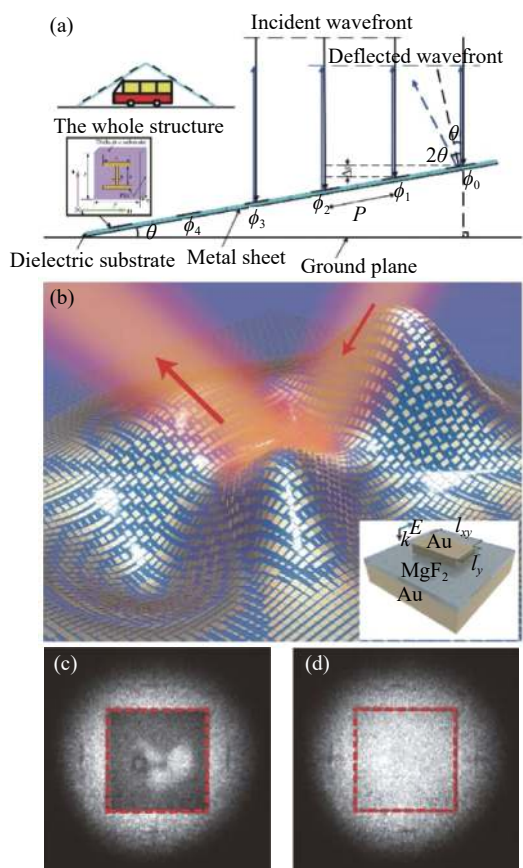


图 3 基于电磁超表面的超薄反射式电磁隐身器件

Fig.3 Reflection-type ultrathin electromagnetic invisibility cloaks based on metasurfaces

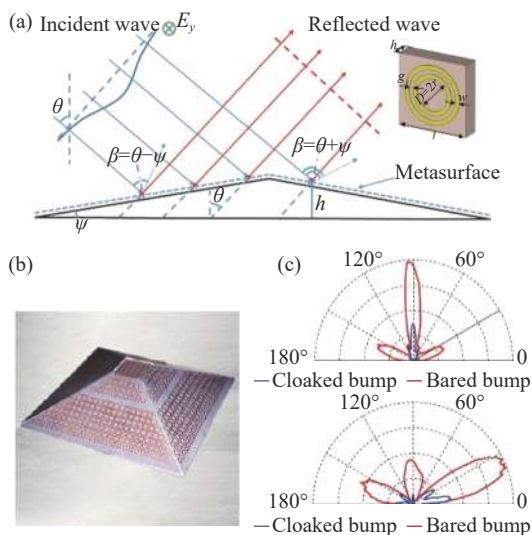


图 4 与极化无关的超薄反射式隐身器件

Fig.4 Polarization-insensitive reflection-type ultrathin invisibility cloaks

好处是在光频段的效率可能更好,因为在光频段,电介质材料的耗散普遍小于金属材料。这种对偏振不敏感的隐身器件设计原理不局限于二维物体,也可以应用于三维物体。浙江大学的 H. Chen 等人采用矩形金属环结构设计的超表面证明了这一点(见图 4(b))^[41]。他们通过实验证明超表面反射隐身器件确实可以有效地减小被隐身体物的散射截面(见图 4(c))。

4 透射式超薄隐身器件

反射式隐身虽然隐藏了物体,但并没有实现自由空间的幻像,而是实现了一个反射镜面的幻像。然而,透射式隐身要求必须实现自由空间的幻像,因而其实现的复杂度和难度大大增加。目前,所有反射式隐身超表面的原理都是基于调控每点的反射相位,从而调控整体的反射波前。显然,透射式隐身要求超表面为透射型,而不是反射型。然而,单单将超表面从反射型转为透射型并不足以实现透射式隐身,因为除了出射波的相位调控之外,透射式隐身还要求操控电磁波的能量流绕过一个隐蔽空间。如何在超薄的透射隐身器件中同时实现相位调控和能量流操控? 目前看来,有两种解决方案。第一种是利用完美吸收和增益。美国纽约城市大学的 A. Alù 等提出了由一对吸收和增益的超表面实现透射式超薄隐身的方法^[42]。具体的工作原理如图 5(a) 所示。考虑一个圆形隐身器件,根据入射电磁波形式和方向可以将隐身器件分成两个部分:被电磁波直接照射的部分(蓝色实线)为吸收超表面,未被电磁波照射的部分(红色实线)为增益超表面。通过设计吸收超表面的阻抗,可以实现对入射电磁波的完美吸收(见图 5(b))。而通过设计增益超表面的阻抗,可以向外辐射电磁波,并使其具有与入射电磁波相同的波前,并最终实现隐身(见图 5(c))。通过模拟验证,这个方法可以完美地消除圆柱本身的散射(见图 5(d))。然而,在实际中,要实现具有完美吸收和特定增益的人工微结构并非如此简单,尤其是增益型电磁超表面。因此这种设计原理在光学中目前仅仅停留在理论阶段。在 2019 年,南京大学 B. Liang 和马德里卡洛斯三世大学 J. Christensen 等人在声学中初步验证这种透射式超薄隐身^[43]。研究人员利用具有强吸收的亥姆霍兹谐振腔构造隐身器件入射端

的吸收超表面;用增益单元和喇叭构造隐身器件出射端的增益超表面。在声学实验中初步验证了这种隐身器件的效果。

第二种解决方案则和变换光学隐身器件一样不涉及增益和吸收。2018 年,南京大学 Y. Lai 和 H.C. Chu, 复旦大学 S.L. Sun, 苏州大学 Z.H. Hang 等提出并实现了一种混合式隐身器件^[44]。这种隐身方法结合了透射超表面的波前操控功能以及零折射率材料 (Zero-

index materials)^[45-50] 的电磁波隧穿功能,最终实现了隐身的效果。基本的原理如图 6(a) 所示。混合式隐身器件是一种双层结构,外层是高透射的超表面,内侧则是一层均匀的零折射率材料。在入射端,超表面调控入射电磁波的相位,使其很好地耦合进零折射率材料。由于零折射率材料的特殊物理属性,电磁波可以以隧穿的方式绕过被隐身的内部区域到出射端。在出射端,超表面调控出射电磁波的相位,使其整体偏折回原传播方向,并完全地恢复入射波的波前和相位。这种隐身原理可以应用于任意形状的隐身器件,例如圆形、菱形、和任意不规则形状 (见图 6(b~d))。在实验中制作的菱形隐身衣如图 6(e) 所示。其中,研究人员利用 ABA 结构 (见图 6(f)) 设计了高透射的超表面 (外层),利用光子晶体结构设计了具有零介电常数和零磁导率的有效介质 (内层)。数值仿真和微波实验的结果都表明,这个菱形隐身器件可以实现重塑出射波平面波前的效果 (见图 6(g)),显著地减小散射截面 (见图 6(h))。值得一提的是,理论上,这种隐身器件对零折射率材料的厚度是有限制的。图 6(i) 展示了厚度仅为百分之一波长的隐身器件的数值仿真结果,可见隐身的效果依然很好。

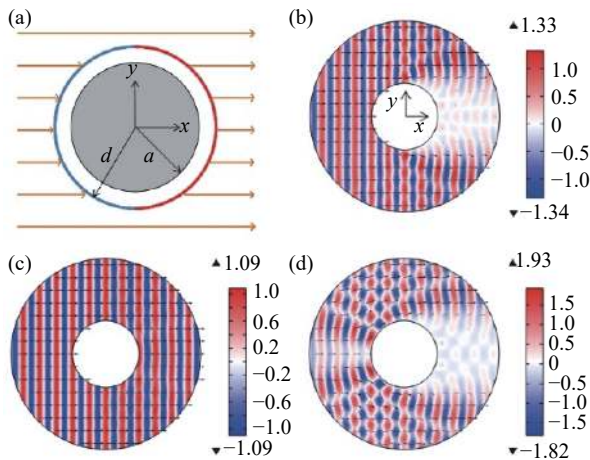


图 5 基于吸收和增益超表面的超薄透射式隐身原理

Fig.5 Transmission-type ultrathin invisibility cloaks based on metasurface with balanced gain and loss

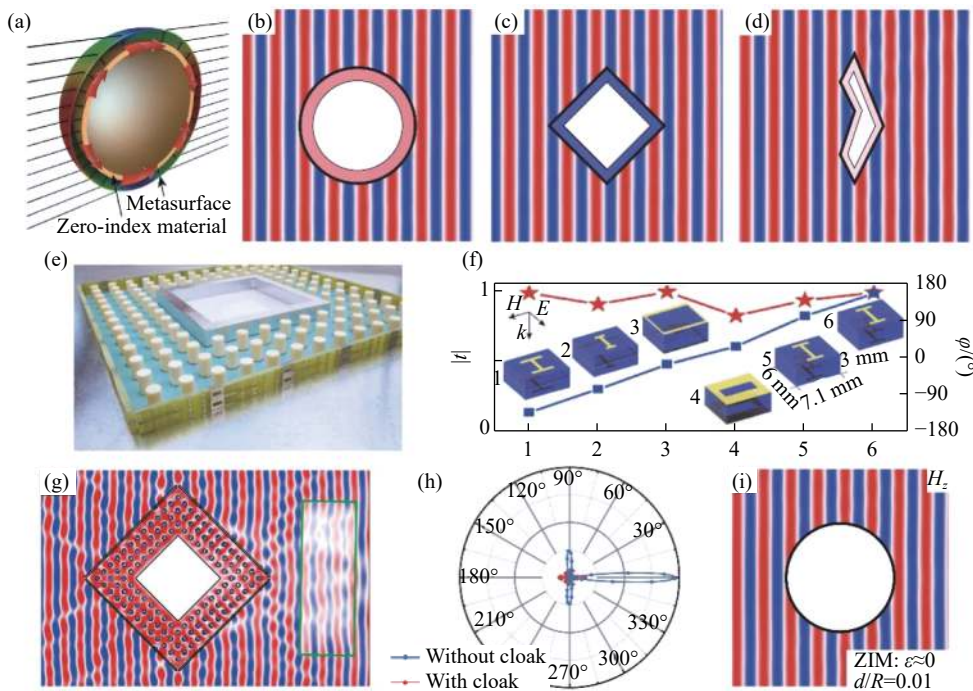


图 6 基于超表面和零折射率材料的超薄透射式隐身器件

Fig.6 Transmission-type ultrathin invisibility cloaks based on integration of metasurfaces and zero-index materials

5 总结与展望

基于超表面的超薄隐身器件所共同面临的困难是: (1) 隐身的工作带宽有限; (2) 隐身的入射角适用范围有限。这是由超表面本身的工作带宽有限, 以及调控相位隐身的原理对相位本身比较敏感造成的。目前, 绝大部分的超薄隐身器件仅能在超表面的中心工作频率和设计角度附近较小的范围内工作。不过, 如果超表面的人工微结构是可调的, 那就可以根据探测到的入射波来调整并实现隐身功能。东南大学 T.J. Cui 等提出的编码超表面^[1-3, 33-35] 将其中的基本结构单元视为二进制的数字, 通过改变单元结构的排列顺序或者结合可调节的结构单元进行编码 (见图 2(h)), 从而可以实时地电控调节反射波或透射波。最近, 浙江大学的 H. Chen 等利用深度学习实现了一种自适应无需人工干预的动态微波隐身器件^[51]。这种可调控的隐身器件上的每个单元的反射相位都是可以独立地控制。隐身器件上的探针可以探测并分析入射波的频率和入射方向, 综合考虑隐身器件的位置和环境后就可以自动生成隐身器件上所需要的相位分布, 并让结构单元快速反应产生隐身的功能。整个过程只需持续十几毫秒。利用这种方法, 超薄隐身器件实现了对不同角度、不同频率入射波的自适应隐身。此外, 中国科学院的 X. Luo 等提出了同时适用于两种波长的反射式超薄隐身器件 (见图 7(a))^[52-53]。这种隐身超表面结构单元中包含两层金属结构 (见图 7(b)), 因此具有较多的自由度。通过调节一层金属结构的几何尺寸可以对一种波长的电磁波进行独立的调控。因此可以实现双波长隐身。尽管经过了如上尝试^[51-54], 目前基于超表面的超薄隐身器件的工作带宽和适用角度还是相对有限的。

此外, 还有一类隐身器件被称为地幔隐身 (Mantle cloak)^[55-58], 是利用隐身层和被隐身物体的散射相消来实现隐身。然而这种隐身原理仅适用于尺寸为波长量级的物体, 限于篇幅在这里不做过多的讨论。

未来, 超表面隐身的研究重点在于如何进一步拓宽带宽以及放宽对入射角的限制。实际上, 很多超表面具有一定的工作带宽, 并在色散调控上具有独到的机制。例如, 通过设计单元结构的频率色散, 南京大学 S.M. Wang, T. Li 和 S.N. Zhu 等实现了可在可见光

频段成像且无色像差的宽频超透镜 (见图 2(b))。这些研究为实现宽频的超薄隐身打下了坚实的基础。其次, 对于如何拓宽超表面隐身的入射角范围, 具有角度色散的非局域 (Nonlocal) 超表面^[59] 可能是解决这一难题的一条途径。最近复旦大学 L. Zhou 等针对超表面角度色散^[60-61] 的研究工作揭示了结构单元间耦合在角度色散中的关键作用。通过调节这种耦合, 研究者们成功地在同一个超表面上实现了对不同角度入射波进行不同的波前调控 (见图 7(c))。另一个重要的研究方向应该是在可见光频段的隐身器件研究。虽然基于几何光学的变换光学隐身器件已经展示了很好的隐身效果, 但是其尺寸较大, 对入射角也有限制, 因此离实际应用仍然有一定的距离。如能实现广角和超薄的可见光频段隐身器件, 将具有重要的价值和意义。在光学频段, 除了理论的发展进步之外, 精准的微纳尺度加工也是一个必要的条件。当前的微纳加工技术已经达到了 5 nm 芯片量产的程度, 相信在未来的某一天可以解决当前隐身所面临的各种阻碍, 让人类穿上向往已久的隐身衣。

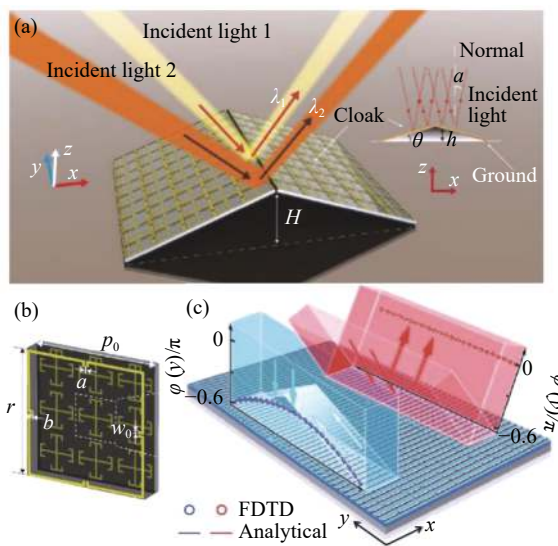


图 7 拓宽超薄隐身器件工作带宽和所适用入射角的范围

Fig.7 Broadening the bandwidth and the range of incident angles of ultrathin invisibility cloaks

参考文献:

[1] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.

- [2] Gao L, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324.
- [3] Liang L, Qi M, Yang J, et al. Anomalous terahertz reflection and scattering by flexible and conformal coding metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(10): 1374-1380.
- [4] Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(5): e16076.
- [5] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [6] Leonhardt U. Optical conformal mapping [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [8] Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: A new strategy for cloaking [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 203901.
- [9] Valentine J, Li J, Zentgraf T, et al. An optical cloak made of dielectrics [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(7): 568-571.
- [10] Lai Y, Chen H, Zhang Z, et al. Complementary media invisibility cloak that cloaks objects at a distance outside the cloaking shell [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 93901.
- [11] Lai Y, Ng J, Chen H, et al. Illusion optics: The optical transformation of an object into another object [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 253902.
- [12] Chen H, Zheng B, Shen L, et al. Ray-optics cloaking devices for large objects in incoherent natural light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2652.
- [13] Zheng B, Zhu R, Jing L, et al. 3D visible-light invisibility cloak [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(6): 1800056.
- [14] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [15] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and sub-wavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [16] Wang S, Wu P C, Su V, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [17] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [18] Lin R J, Su V C, Wang S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14(3): 227-231.
- [19] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [20] Sun W, He Q, Sun S, et al. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(1): e16003.
- [21] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [22] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [23] Huang L, Mühlenbernd H, Li X, et al. Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces [J]. *Adv Mater*, 2015, 27(41): 6444-6449.
- [24] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [25] Deng Z, Deng J, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [26] Huang L, Song X, Reineke B, et al. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces [J]. *Acs Photonics*, 2017, 4(2): 338-346.
- [27] Liu B, Chu H, Giddens H, et al. Rotational Doppler effect of spinning metasurface in radar system[C]//IEEE, 2019.
- [28] Yin X, Ye Z, Rho J, et al. Photonic spin hall effect at metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339(6126): 1405-1407.
- [29] Shitrit N, Yulevich I, Maguid E, et al. Spin-optical metamaterial route to spin-controlled photonics [J]. *Science*, 2013, 340(6133): 724-726.
- [30] Luo W, Xiao S, He Q, et al. Photonic spin hall effect with nearly 100% efficiency [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(8): 1102-1108.
- [31] Ling X, Zhou X, Yi X, et al. Giant photonic spin Hall effect in momentum space in a structured metamaterial with spatially varying birefringence [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e290.
- [32] Li L, Liu Z, Ren X, et al. Metalens-array -based high-dimensional and multiphoton quantum source [J]. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 2020, 368(6498): 1487-1490.
- [33] Li L, Jun Cui T, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 197.
- [34] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Angle-multiplexed metasurfaces: Encoding independent wavefronts in a single metasurface under different illumination angles [J]. *Physical*

- Review X*, 2017, 7: 0410564.
- [35] Zhang X G, Jiang W X, Cui T J. Frequency-dependent transmission-type digital coding metasurface controlled by light intensity [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(9): 91601.
- [36] Zhang J, Mei Z L, Zhang W R, et al. An ultrathin directional carpet cloak based on generalized Snell's law [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(15): 151115.
- [37] Ni X, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light [J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [38] Yang Y, Wang H, Yu F, et al. A metasurface carpet cloak for electromagnetic, acoustic and water waves [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20219.
- [39] Orazbayev B, Mohammadi Estakhri N, Alù A, et al. Experimental demonstration of metasurface-based ultrathin carpet cloaks for millimeter waves [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600606.
- [40] Hsu L Y, Lepetit T, Kante B. Extremely thin dielectric metasurface for carpet cloaking [J]. *Progress in Electromagnetics Research-Pier*, 2015, 152: 33-40.
- [41] Yang Y, Jing L, Zheng B, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 6866-6871.
- [42] Souнас D L, Fleury R, Alù A. Unidirectional cloaking based on metasurfaces with balanced loss and gain [J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4(1): 14005.
- [43] Li H, Rosendo-López M, Zhu Y, et al. Ultrathin acoustic parity-time symmetric metasurface cloak [J]. *Research*, 2019, 2019: 1-7.
- [44] Chu H, Li Q, Liu B, et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 50.
- [45] Silveirinha M R, Engheta N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using Epsilon-near-zero materials [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(15): 157403.
- [46] Silveirinha M G, Engheta N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using epsilon near-zero metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(24): 245109.
- [47] Liu R, Cheng Q, Hand T, et al. Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 23903.
- [48] Edwards B, Alù A, Young M E, et al. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 33903.
- [49] Huang X, Lai Y, Hang Z H, et al. Dirac cones induced by accidental degeneracy in photonic crystals and zero-refractive-index materials [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(8): 582-586.
- [50] Liberal I, Mahmoud A M, Li Y, et al. Photonic doping of epsilon-near-zero media [J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1058-1062.
- [51] Qian C, Zheng B, Shen Y, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 383-390.
- [52] Yang J, Huang C, Wu X, et al. Dual-wavelength carpet cloak using ultrathin metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1800073.
- [53] Wang C, Yang Y, Liu Q, et al. Multi-frequency metasurface carpet cloaks [J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14123.
- [54] Huang C, Yang J, Wu X, et al. Reconfigurable metasurface cloak for dynamical electromagnetic illusions [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1718-1725.
- [55] Chen P, Argyropoulos C, Alù A. Broadening the cloaking bandwidth with non-foster metasurfaces [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(23): 233001.
- [56] Chen P, Alù A. Mantle cloaking using thin patterned metasurfaces [J]. *Physics Review B*, 2011, 84(20): 205110.
- [57] Alù A, Engheta N. Cloaking a sensor [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(23): 233901.
- [58] Alù A, Engheta N. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings [J]. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2005, 72(1 Pt 2): 16623.
- [59] Monticone F, Valagiannopoulos C A, Alù A. Parity-time symmetric nonlocal metasurfaces: All-angle negative refraction and volumetric imaging [J]. *Physical Review X*, 2016, 6(4): 41018.
- [60] Qiu M, Jia M, Ma S, et al. Angular dispersions in terahertz metasurfaces: Physics and applications [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9: 0540505.
- [61] Zhang X, Li Q, Liu F, et al. Controlling angular dispersions in optical metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 76.