

超材料技术及其应用展望

周济, 李龙土

(清华大学材料学院, 北京 100084)

摘要: 超材料是一类利用人工结构作为功能单元构筑的新型材料, 可实现自然材料无法获得的新性能, 得到了世界各国的高度重视, 被美国国防部列为六大颠覆性技术之一。本文从工程应用出发对超材料技术的形成和发展做了简单评述, 总结了过去一些年超材料在几个典型领域, 如隐身、电子元器件及机械减震系统中取得的若干重要突破, 预测了可能导致颠覆性技术的几个方向, 如超材料透镜技术、超材料全光调控技术, 以及超材料与常规材料的融合等, 并对超材料技术未来发展的难点和战略思路提出了建议。

关键词: 超材料; 人工结构; 颠覆性技术; 材料设计

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A

Metamaterial Technology and Its Application Prospects

Zhou Ji, Li Longtu

(School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Metamaterials are artificial materials that can achieve properties that do not occur naturally from their artificial functional units. The metamaterial technology has attracted much attention in many countries. It was listed as one of the six major disruptive technologies by the Department of Defense of the United States. In this paper, the development of metamaterial technology is briefly reviewed from the perspective of engineering application. A few major breakthroughs, such as invisible cloak, metamaterial electronic components, and mechanical metamaterials are summarized. Several promising applications that may lead to disruptive technologies, such as superlens, metamaterial all-optical switching, and the merging of metamaterials and conventional materials, are predicted. Strategic suggestions on the development of metamaterial technology are proposed.

Keywords: metamaterials; artificial structure; disruptive technologies; material design

一、前言

超材料是世纪之交诞生的一个新的科学概念。基于这一概念, 在过去的十几年中发展出了一系列

具有奇异特性的新型人工材料系统, 可望在诸多领域产生颠覆性技术。超材料技术被美国国防部列为“六大颠覆性基础研究技术”之一, 并先后被评选为材料科学领域“50 年中的 10 项重大成果”之一

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-11-09

通讯作者: 周济, 清华大学材料学院, 教授, 中国工程院, 院士, 主要研究方向为材料科学与工程; E-mail: zhouji@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10)

本刊网址: www.enginsci.cn

和 21 世纪前 10 年 10 项重大突破之一 [1,2]。

“超材料”一词最初由美国德克萨斯州大学奥斯汀分校 Roger M. Walser 教授提出，用来描述自然界不存在的、人工制造的、三维的、具有周期性结构的复合材料 [3]。尽管各种科学文献给出的定义也各不相同，但一般都认为“超材料”是具有通过人工结构作为基本功能单元、能够实现自然材料不具备的超常物理性质的人工材料。近年来，典型的超材料如左手材料、“隐身斗篷”、完美透镜等已在光学、通信、国防等应用领域渐露头角，而为数众多的电磁超材料、力学超材料、声学超材料、热学超材料以及基于超材料与常规材料融合的新型材料相继出现，形成了新材料的重要生长点。

二、超材料的实现方法——以左手材料为例

左手材料是一类典型的超材料，这类材料的设计和实现对超材料思想的形成起到了关键作用。

左手材料的源头可追溯到苏联科学家 Veselago 于 1968 年提出的一个思想实验 [4]。他预测，如果有某种材料同时具有负的介电常数和负的磁导率，电磁波在该材料中传播时的电场矢量、磁场矢量以及波矢量之间的关系将不再遵循经典电磁学中的“右手定则”，而呈现出与之相反的“左手关系”，这时材料中电磁波的波动方向和能量传播方向相反，并表现出一系列有违常理的行为，例如光的负折射、反常多普勒效应、倏逝波放大、完美透镜效应，以及反常切连科夫辐射等。然而，众所周知，同时具有负介电常数和负磁导率的材料在自然界中是不存在的，因此，Veselago 的预言在相当长的时间内未能得到科学界的重视。直到 20 世纪 90 年代中后期，英国物理学家 Pendry 的工作使左手材料的研究出现了柳暗花明的前景，并导致了超材料这一新概念的形。

Pendry 等 [5] 于 1996 年预言了由金属线构成的阵列可在谐振频率附近产生出宏观反常介电常数的性质，1998 年又提出通过人工设计具有开口的金属开口谐振环结构 (SRR) 阵列实现反常有效磁导率 [6]。基于上述思路，2000 年，Smith 等 [7,8] 利用电路板加工方法，制备了金属线与 SRR 结构阵列复合结构，直接观测到了微波频段的左手性电磁波透射通带和负折射行为 (见图 1)。

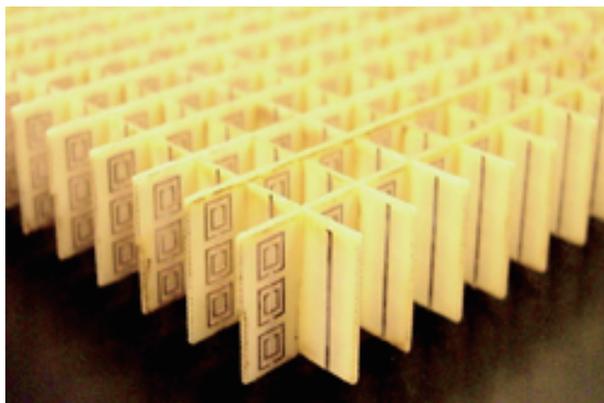


图 1 基于金属线与 SRR 结构阵列复合结构的左手材料

左手材料的实现改变了人们的一些固有观念，昭示人们可以在不违背物理学基本规律的前提下，通过人工功能单元的设计，获得与自然界中的物质具有迥然不同的超常物理性质的“新物质”。从材料科学的角度看，超材料的意义远远超越了左手材料等几种人工材料本身，它提供了一种全新的材料获取方法，即针对需求进行逆向设计，通过设计“人工材料基因”来构建材料的功能。

三、若干重要研究和工程应用进展

超材料的重大科学价值及其在诸多应用领域呈现出革命性的应用前景得到了世界各国政府、科技界、产业界，以及国防部门的密切关注。美国国防部启动了关于超材料的多项研究计划，美国大型的半导体公司如英特尔、美国超威半导体 (AMD) 和国际商业机器公司 (IBM) 等也成立了联合基金资助相关研究。欧盟组织了 50 多位顶尖的科学家聚焦这一领域的研究，并给予高额经费支持。日本在经济低迷之际出台了一项研究计划，支持至少两个关于超材料技术的研究项目，每个项目的研究经费约为 30 亿日元。超材料的研究和工程化应用在近年来得到了迅速发展。

在电磁超材料方面，科学家对各种电磁谐振结构进行了优化，发展出了多种基于金属线和 SRR 环的衍生结构以及介质结构的人工原子，并设计研制出了隐身斗篷、完美透镜等新型超材料器件；与此同时，将微纳加工技术引入到了超材料的制备，发展出了可在光学频段下工作的各种超材料和器件。近年来，超材料也从电磁领域逐渐走向了力学、

声学、热学以及传质等领域，一系列具有超常性质和奇异功能的新型超材料相继问世。

(一) 超材料“隐身斗篷”

2006年, Pendry等[9]发表了关于设计电磁隐身衣的新方法。他们指出, 具有特定磁导率和介电常数分布的超材料可以控制电磁波传播, 并干扰电磁波的传播轨迹, 使其发生弯曲。因此, 可以利用电磁超材料制备的套型装置, 引导电磁波绕过目标物体之后返回原始的传播轨迹, 给观察者造成一种物体不存在的假象, 可以使放置在其内部的物体“隐身”, 不被外界探测到。在此基础上, Schurig等[10]对材料的参数进行了简化, 实验验证了世界上首个超材料隐身衣, 从隐身衣外部无法探测到隐身衣内部物体的信息, 实现了完美隐身。近年来, 科学家对超材料隐身衣技术做了进一步的改进和优化, 以期获得隐身性能更好、频带更宽、超材料结构更轻薄的超材料系统(见图2)。

与传统隐身技术相比, 超材料隐身的特点是靠引导电磁波, 而不是靠吸收电磁波, 因此没有目标影子, 是国防军工领域的一项颠覆性技术, 得到了各国军工界的广泛重视。目前, 基于超材料隐身斗篷技术已开始军事装备中获得应用。

(二) 基于超材料的新型无源电子元器件

电磁介质是无源电子元器件的材料基础和技术

核心。传统的无源元件基于常规介质材料, 介电常数和磁导率均为大于1的正值, 且不会特别高。超材料技术可以实现具有负值、超低或超高介电常数或磁导率的人工电磁介质, 为一些具有变革性的新型无源电子元器件的出现提供了条件。

天线是超材料应用的较为成功的一类器件。利用超材料超常的电磁性质和高度可设计的特点, 人们成功地开发出多种具有高性能、能满足各种特殊要求的天线, 实现了天线的小型化、高效、高增益、共型化、高信号选择性等。例如, Ziolkowski等[11]提出了基于超材料的天线空间匹配的概念, 可有效地抵消电抗, 提高天线的辐射效率, 同时通过空间耦合成为天线的寄生辐射元增益, 可将天线尺寸大幅缩小, 辐射效率大幅提高。利用复合左/右手(CRLH)传输线结构设计出的天线, 借助于零阶谐振, 天线的尺寸可以任意地小。利用零折射率超材料的出射面趋近平行于法线的方向射入自由空间的特性, 可以有效地使电磁波汇聚, 提高阵列天线的方向性和增益。目前, 在通信等领域的一些天线中已融合了超材料技术。

在无源集成领域, 笔者首次提出了基于负介电常数的无绕线电感技术。利用平板电容结构, 以负介电常数材料作为介质产生类似于电感器的交流响应, 有效解决了无源集成模块中电感器复杂的绕线结构占据大量布线空间、导致复杂工艺及对周围元器件产生漏磁干扰的问题。

(三) 超材料减震技术

机械/声学超材料近年来发展迅速, 这类超材料有迫切的工程需求。机械超材料是对各种力学作用做出超常响应的人工材料, 按所调控的弹性模量不同可分为超强、超硬超材料, 可调节刚度超材料, 负压缩性超材料, 反胀、拉胀超材料和智能超流体[12]。利用这些超常力学性质, 可以开发出很多应用功能, 其中一个成功的工程应用领域是减震和降噪。目前常用超材料实现减震降噪的方案很多, 其中一个方案是利用电磁波“隐身斗篷”类似的坐标变换原理, 将受保护物体利用特殊设计的力学超材料包覆起来, 使机械波绕开物体。这一思路也被用于大型建筑及城市的地震防护。此外, 利用具有负泊松比(受到拉力时发生侧向膨胀)超材料和负刚度超材料的组合, 科学家成功地研制出了能够抑

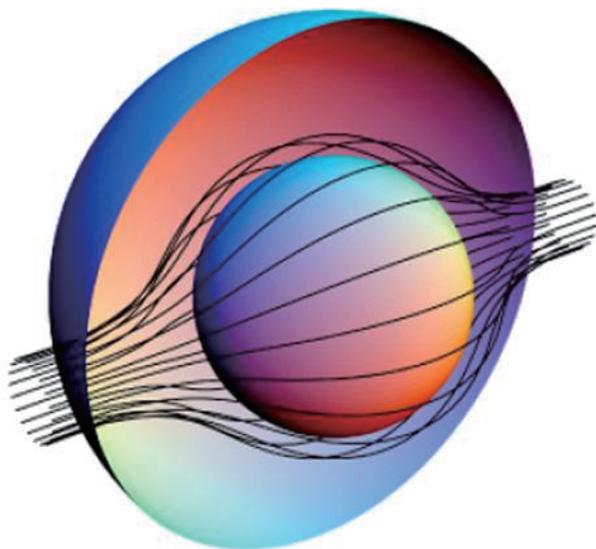


图2 超材料隐身斗篷原理示意图

制许多不同频率的振动的新型防震结构，可望应用于运送早产儿的车辆上。

四、值得关注的颠覆性技术

（一）超材料透镜

超材料透镜是一类典型的颠覆性技术。传统透镜受到衍射极限的约束限制，光学器件无法对尺度小于半个工作光波长的物体成像，其深层物理原因是常规介质中倏逝波的衰减。2000年，Pendry[13]在理论上提出了负折射材料可以用于制作超透镜的想法，并证明了当介质的介电常数为负数时，电磁波中的倏逝波成分会被放大，其中所携带的信息就可以在负折射率介质材料中传播。由负折射材料制备的平板具有成像的功能，物体发射出的光线会经负折射率平板前后界面两次折射后重新汇聚在一起，进而实现无衍射极限的成像（见图3）。

近年来，各种超透镜的设计层出不穷，由于在超材料加工上的困难，对于可见光频段的超透镜在实验方面进展较慢。2015年，Sun等[14]设计并研制出了一种可进行单个分子成像和癌细胞检测的透镜——超材料超透镜，可将光学内视镜的成像分辨率从10000 nm提高至250 nm或更好。最近，Arbabi等[15]开发了一种新型平面光学透镜系统，该系统可以实现批量生产，并且还能与图像传感器进行集成，可望用于小型化的相机和显微镜中，并

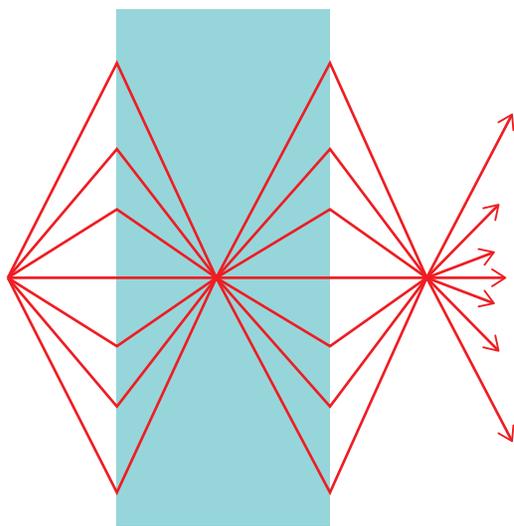


图3 超透镜原理示意图

扩展其功能和操作方式。

超材料透镜在生物、材料、微电子学、光学工程领域都有急切的要求。可以对病毒和DNA分子、细胞以及各种材料的显微结构等在自然环境中进行直接观察。同时，基于超材料的完美透镜可实现亚波长尺度的光刻，一旦实现将使微电子加工技术水平大幅度提高，从而进一步延续集成电路的摩尔定律。

（二）全光信息元器件

全光信息技术是信息技术发展的重要方向，是突破电子技术“摩尔定律”物理极限的主要途径。尽管这一技术原理已趋于完善，但在实际应用中面临着一系列器件的实现问题，其中作为逻辑光路的核心部件的全光开关器件是光信息技术的主要难点。常规全光开关借助于光学非线性过程，需要较高（远高于信号）的驱动光功率（非线性阈值），同时材料内部结构的改变和弛豫过程需要相对较长的响应时间（开启和关闭时间）。高阈值功率和低响应速度是全光开关技术走向应用的主要障碍。

超材料为构筑新型全光开关器件提供了新的可能性。笔者首次提出了一种基于超材料中模态耦合的全光开关的设计思想[16]：利用介质超材料中人工原子可承载多个谐振模态的特性，通过两束电磁波导致的电磁谐振模态发生相互耦合，改变通过材料的信号波传播特性，进而实现全光调制。由于这种新机制无需通过非线性光学过程参与，所获得的全光开关器件将具有低开关阈值和极高的开关速度，从根本上解决制约光开关技术的两大核心问题，即开关阈值和开关速度问题，从而突破全光信息技术的瓶颈（见图4）。

（三）超材料与常规材料的融合

超材料是一种特殊的材料。超材料与常规材料相比，其界面非常清晰，超材料的功能主要来源于人工结构，与源于自然结构的常规材料完全不同。两类材料的优势和劣势完全相反，常规材料源于自然，易于获得，但难于设计和剪裁；超材料则刚好相反，易于设计和剪裁，但不容易获得。鉴于此，笔者提出了通过超材料与常规材料的融合构建新型功能材料的概念，并在此基础上发展出了介质基电磁超材料、本征型超材料介质及若干种基于超材料

原理的“常规材料”[17]（见图5）。

超材料与常规材料的融合能够发展出一些新的材料，为突破常规材料的性能极限开辟了新的道路。常规材料的性能主要取决于材料的自然结构，如原子结构、电子结构、分子结构、化学键结构、晶体结构、晶粒-晶界结构等。随着材料科学和技术的进步，人们对这些结构的操控能力逐渐增强，材料的性能不断提高，越来越趋近于材料的自然极限。同时，自然单元和结构间的相互关联和相互影响，也决定了人们无法随心所欲地对材料性能进行精准操控。超材料结构单元简单，易于被操控，因此可望成为突破常规材料功能极限的一种途径。

超材料与常规材料的融合也是超材料走向工程化应用的一个捷径。狭义的超材料是具有常规材料所不具备性质的人工材料，尽管其性能极具吸引力，但真正形成对应的产业技术尚需要一个发育期。而利用超材料的方法构筑具有优异性能的“人工常规

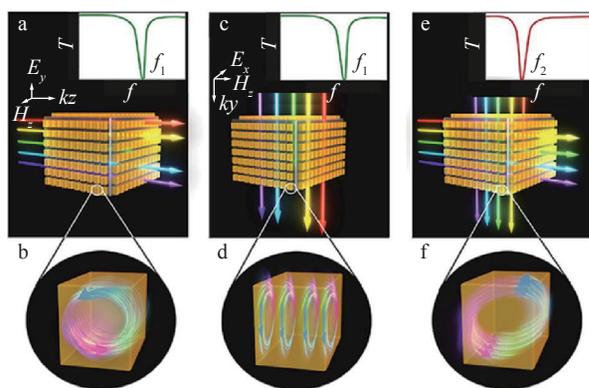


图4 超材料全光开关原理示意图

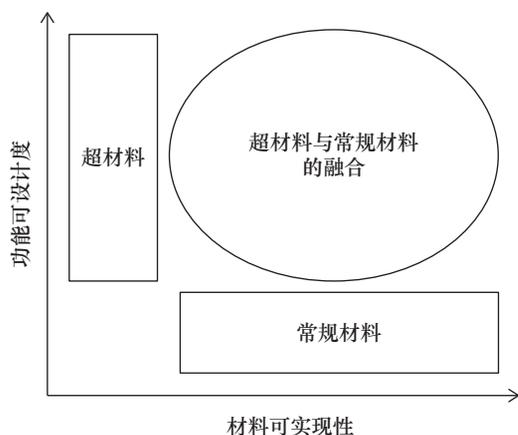


图5 超材料与常规材料的融合

材料”，则可望借助已有的工业技术系统，将超材料迅速推向工程化。

五、技术难点及政策建议

超材料的应用可能导致众多领域的技术变革，目前这些技术变革正处于酝酿阶段，值得密切关注和期待。作为一大类全新的材料系统，从超材料的研发到产生颠覆性技术需克服一系列技术障碍。主要体现在以下几点。

(1) 超材料的模拟设计技术。目前超材料的研究以原理性探索为主，模拟仿真技术基于简单模型和通用的模拟软件，而实际应用的器件设计需要考虑多种服役因素、多场耦合和海量计算，各种超材料的专用设计技术尚需进一步发展。

(2) 超材料的制备技术。超材料制备需要精密的材料加工，特别是一些电磁超材料（如太赫兹以上频率的电磁超材料）的制备依赖于相关加工技术的进步。

(3) 大尺寸超材料的工程可行性和服役性能。超材料由大量的人工结构单元构成，这种单元阵列的可工程化及其服役性能（如机械性能、热性能等）是其应用的难点，例如，利用电磁斗篷实现军事目标的完美隐身需要在其外面包覆较厚的超材料“铠甲”，如何将其减薄是一个重要难题。

为推动超材料技术的发展，建议采用以下措施。

(1) 加强对超材料及其工程化领域的研发投入。在国家 and 地方各类科研计划中提高对超材料研究的投入。面向技术路线清晰的重大需求，启动相关研究专项，通过示范性研发，带动通用技术的完善。

(2) 通过政策引导推动超材料产业链的形成。将超材料应用列入国家产业发展计划，培育基于超材料的新型高新技术产业的形成和发展，鼓励超材料向信息技术、常规材料、能源、国防军工、精密仪器等领域渗透。

(3) 重视超材料与常规材料的融合。加快建立超材料应用的标准体系，重点发展基于超材料思想和常规功能的新型材料系统，推动这些超材料走向传统工业领域，形成颠覆性技术。

(4) 重视超材料的科普工作。通过多种方式，使科技界、工业界以及公众对超材料的科学意义和

应用价值有更全面的理解，增强全社会对这一新兴颠覆性技术的重视，提高企业和国防部门对超材料应用的积极性。

参考文献

- [1] Wood J. The top ten advances in materials science [J]. *Materials Today*, 2008, 11(1-2): 40-45.
- [2] Service R F, Cho A. Strange new tricks with light [J]. *Science*, 2010, 330(6011): 1622.
- [3] Walser R M. Electromagnetic metamaterials [J]. *SPIE*, 2001, 4467: 1-15.
- [4] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10 (4): 509-514.
- [5] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [6] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, 10(22): 4785-4809.
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [9] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5514): 1780-1782.
- [10] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [11] Ziolkowski R W. Metamaterial-based antennas: Research and developments [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2006, 89 (9): 1267-1275.
- [12] Yu X L, Zhou J, Zheng H L, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review [J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 114-173.
- [13] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [14] Sun J B, Shalaev M I, Litchinitser N M. Experimental demonstration of a non-resonant hyperlens in the visible spectral range [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7201.
- [15] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [16] Liu X M, Zhou J, Litchinitser N, et al. Metamaterial all-optical switching based on resonance mode coupling in dielectric meta-atoms [J]. *arXiv*, 2014: 1412.3338.
- [17] 周济. 广义超材料: 超材料与常规材料的融合 [J]. *中国材料进展*, 2018, 37(7): 21-25.
Zhou J. Generalized metamaterials: Merging of metamaterials and conventional materials [J]. *Materials China*, 2018, 37(7): 21-25.