

超材料：重新塑造与重新思考

刘若鹏^{1,2*} 季春霖^{1,2} 赵治亚^{1,2} 周添¹

摘要：超材料是一种复合材料，它在声学、电学、磁学或光学等方面的材料特性是由基体和基体中的微结构共同决定的，而且微结构在其中起到了决定性的作用。超材料在发展过程中不断地重新定义着材料科学的边界。在电磁学领域和其他领域，借助于定制化的材料特性和在外部刺激作用下的可调特性，这种材料展现出了优越的灵活性。在本文中，我们对超材料技术及其转化方面进行了介绍，对其工业化进程进行了分析，并且提供了自身的经验和对未来的展望。

关键词：超材料，超材料表面，智能结构，超材料器件，工业化

1 引言

超材料通过对人工结构单元的排布，可以实现超出常规的电磁特性。图 1 展示了微结构均匀排布的电磁超材料示意图。超材料与传统材料相比具有的优势在于它们的可设计性。借助定制化的介电特性和可调谐的电磁响应，超材料在材料设计中展现了良好的灵活性，并且

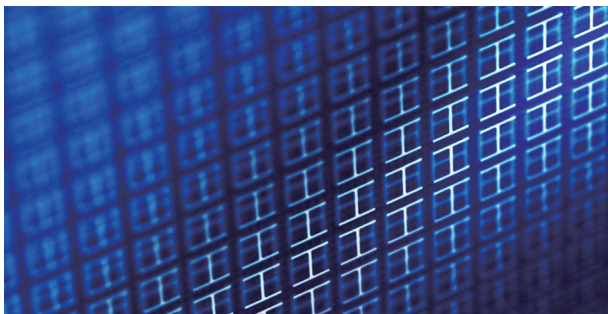


图 1. 电磁超材料示意图。

为解读材料本身提供了新的视角。

在 Veselago 发表的富有远见的超材料报道被忽略了近 30 年之后，John Pendry 在 2000 年发表的论文为这个领域掀起了新的开端 [1]。在此之后的 10 年中，超材料技术已经成为一项突破性技术，并在隐身和光学调制等领域显示了应用潜力 [2–6]。伴随这项技术逐渐成形，开始在无线通信、传感、航空航天、光学(太赫兹和近红外)和医疗器械领域中得到越来越多的应用。除了工业中的应用，超材料在军事和国防领域也展现了巨大潜质。美国国防部先进研究项目局 (DARPA)、北大西洋公约组织 (NATO) 和全球主要的国防军工企业都密切关注着这一领域的发展 [7–12]。

本篇文章回顾了超材料技术在理论研究(第 2 节)和工业中的发展，尤其是最新技术在工业化方面的应用(第 3 节)。我们也分享了在超材料工业化进程中的经验，以及对这一极富吸引力的领域的展望(第 4 节)。

2 理论研究

经过早期的原理验证工作以后，Leonhardt [13] 和 Pendry 等 [14] 分别在同一期《Science》杂志上发表的文章开启了超材料研究的崭新阶段。在不断的探索之后，变换光学 (transformation optics, TO) 方法的建立为超材料设计提供了科学的设计方法，这为隐身、超透镜等许多重要研究领域奠定了基础 [4, 15, 16]。变换光学作为设计中的有力手段，仍然存在若干方面的局限性。例如，通过坐标变换产生的部分电磁参数在现实中比较难以实现。

¹ Kuang-Chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen 518000, China; ² State Key Laboratory of Metamaterial Electromagnetic Modulation Technology, Shenzhen 518000, China

* Correspondence author. E-mail: ruopeng.liu@kuang-chi.org

Received 8 June 2015; received in revised form 20 June 2015; accepted 30 June 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(2): 179–184

引用本文: Ruopeng Liu, Chunlin Ji, Zhiya Zhao, Tian Zhou. Metamaterials: Reshape and Rethink. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015036

再者，设计中的电磁参数是连续值，而具体实施时只可能是一系列的离散值，两者之间的近似也会影响变换光学的设计效果。受限变换光学 (constrained transformation optics, CTO) 的提出改进了变换光学方法中的一些缺陷。变换光学和受限变换光学为超材料的设计提供了蓝图，而等效电路模型方法则提供了搭建这一蓝图的砖瓦。利用等效电路模型方法可以快速地进行超材料微结构拓扑形态的选择及优化 [17, 18]。微结构拓扑结构的选取通常奠定了一个优秀设计的基础。电磁设计工程师团队在吸收超材料技术的基础上，不断研究出低剖面天线系统 [19–21]、波束扫描系统 [22]、频率选择表面 [17]、结构表面 [23]、基于超材料的天线系统 [24] 和超材料雷达吸波材料等。另外一个超材料研究的发展分支以传输线理论为基础 [25]，研究人员利用这类方法做出的漏波天线可以完成由垂射到端射的扫描 [26, 27]。

技术发展如 Ziolkowski 在文献 [28] 中所述，电磁超材料的研究热情很快蔓延到光学领域 [29, 30]，许多关于超透镜的想法被全球的研究者不断实践和突破 [16, 31, 32]。复杂的电磁仿真软件包和强大的集群系统帮助研究工作者在生产制作之前完成准确的仿真迭代工作。可见光领域的超材料相关研究也不断取得进展，并且由 Dolling 等 [33] 在 2007 年报道了这一频谱负折射率的实验。

通过在超材料理论和机理上不懈的基础研究，功能性材料与超材料的结合带来了超材料功能上的显著提升。微机电系统 (MEMS) 逐渐被应用到电磁领域 [34]，尤其是太赫兹领域的可重构超材料中 [35, 36]。微流控也被用于重构微波超材料器件 [37]。2006 年，在半导体基材上制作的金质超材料阵列可以通过外部的电流信号对辐射进行实时控制 [38]。制作工艺方面，借助 20~50 nm 的加工精度，可以在介质膜上制作金质等离子纳米微线图案，并通过外界刺激进行对电磁响应的控制 [39]。

在电磁超材料领域取得的成就也鼓舞着其他领域的研究学者，并且逐步把设计理念扩展到声学、水波、等离子体和其他受不同机理控制和不同方程描述的其他领域 [40, 41]。

不同的超材料研究机构中，特别值得一提的是位于欧洲的人工电磁超材料虚拟学院 (Metamorphose VI)。该学院致力于积极的“整合、管理、协调和关注”超材料领域中的研究项目，并定期举办会议宣传研究成果，以及持续向工业界转化先进技术。

在美国，由国家自然科学基金 (NSF) 支持的“工业与大学联合研究中心”于 2002 年成立。该中心由纽约大学牵头，联合北卡罗来纳大学等学术机构、雷神公司等国防军工企业和超材料领域的其他研究团体组成。目前

该中心正在进行的项目包括快速制作和打印可调节超材料、仿真和设计算法研究、有源超材料表面、共形超材料天线和光学复合材料。这些都是目前超材料领域中十分吸引人并且极具分量的研究方向。

3 应用及工业化

3.1 初期应用

时至今日，市场上对从声学到太赫兹及光学波段的超材料均有着明确的需求。根据对超材料市场的分析，这些需求可以归纳为五个板块：传感、卫星通信与无线通信、航空航天与国防、光学 (太赫兹与近红外) 和医疗器械。根据 MarketsandMarkets 在 2014 年做出的市场分析报告 (SE2430)，超材料市场在未来 10 年预期将以 41% 的复合年均增长率增长。

在传感器市场，诸如 Toyota 和 BMW 在内的著名汽车生产商在微波和毫米波超材料的开发中已开展相关技术储备 [42, 43]。根据 Toyota 中心研发实验室的报道，超材料预期在车载雷达扫描系统、移动通信天线、电动马达用新型磁性材料和电磁兼容 (EMC) 中使用的高性能吸收与屏蔽材料中获得推广 [42]。举例来说，对于传统的巡航和预防碰撞安全系统，在 76~77 GHz 毫米波段上以约 20° 的视角覆盖 150 m 的距离已经可以充分满足需求。然而，新型自适应巡航控制和预防碰撞辅助系统则需要以 60° 的视角覆盖 60 m 的距离。为了满足这些市场需求，Toyota 开发了新型的频率不敏感左右手复合漏波扫描天线，其具有宽波束扫描、高增益和易生产的优势。在 Toyota，LED 头灯和红外成像夜视系统也是超材料的应用研究方向。图 2 展示了超材料在汽车行业的潜在和实际应用。BMW 遇到的问题则是在集成 77~81 GHz 毫米波传感器时喷漆塑料挡板带来的高电磁波反射和吸收。这对具有近光学传输特性的毫米

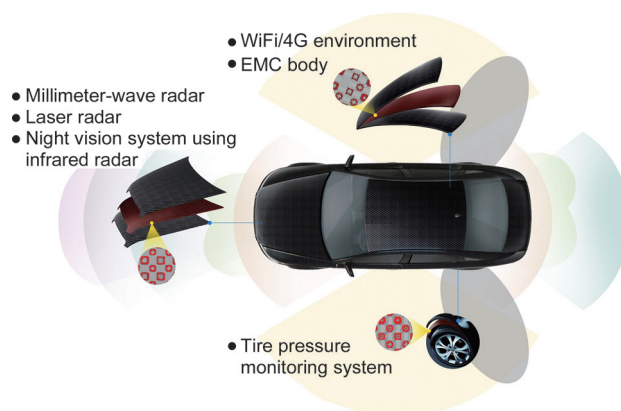


图 2. 可在汽车领域应用的工业级超材料。

波频段来说十分常见。针对这个问题, BMW 利用超材料阻抗匹配技术来缓解从高介电常数挡板到自由空间电磁断面的过渡 [43]。根据 BMW 提供的测试结果, 采用超材料后反射在 -10 dB 以下的带宽达到了 3.8 GHz, 最小反射低至 -25 dB, 这比传统材料带来的反射低近 15 dB。

在卫星通信行业, 美国公司 Kymeta 借助电控超材料采取全息技术实现对目标卫星的动态电子扫描对准 [44]。波束的指向是通过精确选择特定组合的微结构来完成的 [45]。通过采用电控超材料这一技术路径, 由于省去了发射/接收 (T/R) 组件, 可以在更低的成本条件下达到与传统相控阵天线相近的电气表现。这种平板化、低剖面、轻质量和低成本的全息超材料天线将被安装于飞机、游艇和常规的汽车上。根据 Kymeta 的网站信息, 该公司预期在 2015 年为指定客户和商业伙伴提供开发工具包, 不过这比之前设定的 2014 年末这一时间有所推迟。我们判断, 增加的时间应该是被用于将实验室样机向工程化样机的转化和提高指向精度等工作之中。

在近红外频段, 超材料正在被研究用于控制热量定向辐射。美国公司 Plasmonics 与美国 Sandia 国家实验室利用超材料的非朗伯 (non-Lambertian) 辐射特性来设计和制作具有方向性的辐射表面。这种超材料表面的其中一个潜在应用是对卫星的热量控制。具体来说, 研究人员期望实现从卫星向外部空间的高效率辐射, 同时实现对太阳热辐射的高截止率。也就是说, 这种设计要求超材料在热学特性上具有非互易性。

在能源领域, 太阳能的大范围推广一直受限于每千瓦时输出所需的成本, 这一成本基本上是采用煤炭发电所需成本的五倍左右。集成了超材料纳米复合材料的薄膜技术可以收集更宽角度的入射光线并吸收其中的可用频谱, 从而显著提高太阳能转化的效率。这项技术也可直接应用于现有转化效率已经下降的太阳能面板之中。太阳能转换效率的提高意味着用户每千瓦时成本的降低和太阳能发电企业利润的增加。商业级别的产品已由加拿大公司 Metamaterial Technologies 完成生产, 并持续与 Alberta 大学的 Sandipan Pramanik 教授进行更深入的合作研究 [46, 47]。

在航空航天方面的应用, 采用超材料技术的纳米复合材料被用于调控宽角度入射的光线 [48, 49]。一家加拿大公司最近宣布与空中客车公司建立战略合作伙伴关系, 共同致力于将这项创新技术用于商业航空市场。超材料薄膜表面将被应用于飞行器的挡风玻璃, 选择性地阻挡包括高功率激光在内的特定频谱的穿透。在解决联邦航空管理局等机关的各类许可问题后, 他们的生产线计划于 2016 年初投入使用。

3.2 驱动应用

超材料的奇异性能和它们在隐身方面的潜在应用很快得到了如 DARPA 等机构的关注。早在 1999 年, DARPA 便着手收集有关超材料方面的信息 [28]。在 2001 年, DARPA 多方研究启动项目将目标定为“模拟、合成、表征和开发新型合成超材料” [28]。接到 DARPA 的要求后, 波音公司幻影工作室 (现在波音的研发部) 在 2003 年制作了他们称为波音方块的首个三维超材料 [50]。自从 2000 年以来, DARPA 就将超材料定义为强力推进领域并持续不断地提供经费以支持超材料技术的相关项目。根据最新报道, DARPA 在 2015 财年在这个领域的经费投入增长为 75%。除 DARPA 以外, 美国国防部科研和工程助理 (ASD R&E) 将超材料列为六大“具有破坏性的基础研究领域”。从 2006 年以来, 美国空军也已经资助了超过 60 个与超材料技术相关的小型企业创新研究 (SBIR) 和技术转化项目 (STTR), 并且大部分项目已经进入了第二和第三阶段。

在欧洲, 从 2011 年 1 月开始, NATO 开展了针对超材料在国防和安全方面应用的为期三年的研究项目, 并对其可能对 NATO 产生的影响进行了评估。研究中的六个主要方向包括: 微波超材料天线; 电磁特征缩减; 热学和近红外特征控制; 超材料在成像和传感中的应用; 有源、转换和非线性超材料; 声学超材料。这六个领域基本覆盖了超材料在国防安全方面应用的主要研究方向。

据报道, 超材料技术已经被应用于多种作战平台的多种军事设备上。电磁超材料结构件已经被应用于 E2 鹰眼预警机雷达罩以减少支撑结构造成的相位差。这类超材料结构件需要具有的特征包括但不限于轻质量、电磁兼容、可替换以及满足雷达罩环境所需的所有物理条件。这类超材料也可以用于改进类似的物理结构干扰电磁信号传播的问题。具有定制化特性的大规模生产的超材料也已经应用于舰载装备。这类材料的新颖特性为解决复杂电磁问题提供了更多元化的方案。借助于创新的超材料制作和组装技术, 具有更低通讯干扰、更优雷达吸收和更佳阻抗匹配的低剖面天线、异型波导和宽幅超材料已经在美国和欧洲海军战舰上崭露头角。

3.3 工业化

Ziolkowski 在 2014 年《Applied Metamaterials》杂志中指出, 当超材料研究学者理解了基本原理之后, 我们会在后续时期看到超材料向潜在和实际应用上的转变 [28]。

这种转变得益于多方面。商业化的软件专门为超材料仿真设置了专用模块。早在 2006 年, Feko 公司便已

制作了关于负折射率材料分析的操作说明。2007年，Ansoft发表了《Left-Hand Metamaterial Design Guide》白皮书。最近，德国CST公司更是关注于基于超材料的设备在工业中应用的建模和仿真[51]。伴随着并行计算和集群系统软硬件方面的发展，基于超材料的大尺寸电气器件和设备的仿真变得更为可行和经济有效。

大规模生产和共形制作是超材料技术工业化发展中主要的技术挑战。对于光学超材料，纳米技术和精密工艺研究学者采用沉积、电子束刻蚀、离子溅射和自组装等方法来制作比波长小的超材料微结构。超材料技术与半导体及其相关技术的结合还进一步提供了奇特的调节性能。直接印刷、激光雕刻和标准刻蚀工艺被用来进行大规模微波超材料生产。美国马萨诸塞州的SI2 Technologies公司开发出直接打印技术用于超材料的生产。共形特性和整卷制备的方式也为航空领域应用集成提供了显著的优势。

超材料的研究和发展是光启高等理工研究院(以下简称光启)的核心工作。光启致力于在超材料技术基础研究

和工业实践中建立连接。基于其在超材料市场中多年的实践，光启已经建立了适合工业化发展的架构，如图3所示。在这种结构下，真实需求从市场和客户导入，并根据相应的规则过滤。超材料产品将根据需求，利用本院核心技术进行定制化的生产。运用这种方式，光启的超材料技术已经延伸到邻近空间通信、卫星通信、机载/车载射频系统和地铁系统无线覆盖等诸多领域。光启已申请的超材料国内外相关专利多达2934件，其中1200件已经获得授权。

光启于2011年引入了全球首款商业化的超材料平板反射面卫星天线。借助渐变折射率设计，该天线的反射板为平面结构，且厚度仅为2mm。从产品上市以来，这些天线已经在超过22个中国城市安装，为居民提供电视信号接收服务。图4展示了可以收纳于文件包中的便携式超材料卫星天线的示意图。此外，光启最近在新西兰放飞了“旅行者号”浮空器，这一邻近空间平台借助超材料技术进行通信、监控和遥测。这也是中国第一次在其他国家释放邻近空间飞行器。

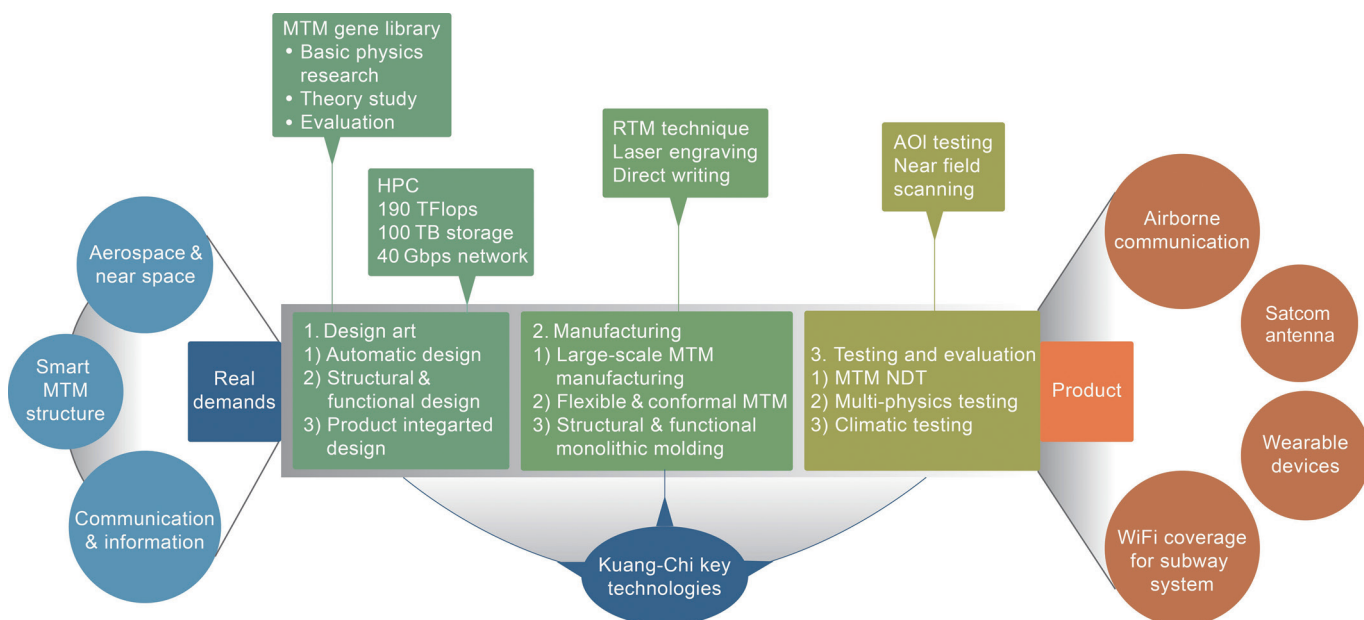


图3. 适合工业化发展的光启超材料研究架构。

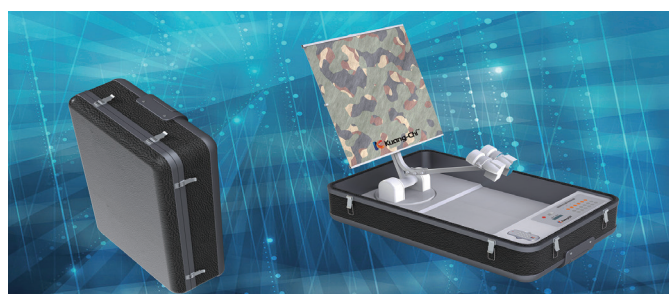


图4. 可装于文件包中的光启平板反射面卫星天线。

4 发展和未来

正如Kadic等在名为《Metamaterials beyond electromagnetism》一文中所指出的那样，超材料理念也逐渐运用于热动力学和传统力学(包括弹性静力学、弹性动力学、声学 and 流体力学)等学科[41]。正如光学和电磁超材料的蓬勃发展，超材料在其他相关领域预期也将得到迅速的突破。

毫无疑问，用于制作智能结构和智能外皮的可控超材料将是下一阶段发展的趋势。利用相关技术感知和接收信号，我们可以在高速列车和房车运行的途中欣赏不间断播放的媒体。

在未来，超材料设计将会变得比以往更具有挑战性，结构和功能特性将会越来越紧密的结合。尽管超材料的设计具有很大的自由度，它还是要面对诸如结构强度、热学性能、环境性能和制作工艺等物理边界。在原理样件、产品和系统级别的跨学科、多物理场和多模型的设计将会在材料科学研究中具有十足的挑战。

5 结论

在本文中，我们回顾了超材料技术在研究和产业领域的发展。对电磁波、光线和声波的控制及操纵将超材料与传统材料区分开来。利用它们的调控能力，超材料将能够调节传输、反射与吸收特性，偏转波束指向，控制热量传播等。它们甚至能够在无人干预的条件下做出感知和反应。

超材料已经重塑了材料科学，它们的能力也需要我们重新审视。

Compliance with ethics guidelines

Ruopeng Liu, Chunlin Ji, Zhiya Zhao, and Tian Zhou declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(18): 3966–3969
2. D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 2004, 305(5685): 788–792
3. D. Schurig, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 2006, 314(5801): 977–980
4. A. Alù, N. Engheta. Plasmonic and metamaterial cloaking: Physical mechanisms and potentials. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, 10(9): 093002
5. A. Alù, N. Engheta. Plasmonic materials in transparency and cloaking problems: Mechanism, robustness, and physical insights. *Opt. Express*, 2007, 15(6): 3318–3332
6. R. Liu, C. Ji, J. J. Mock, J. Y. Chin, T. J. Cui, D. R. Smith. Broadband ground-plane cloak. *Science*, 2009, 323(5912): 366–369
7. R. M. Walser. Electromagnetic metamaterials. In: A. Lakhtakia, W. S. Weiglhofer, I. J. Hodgkinson, eds. *SPIE Proceedings Vol. 4467, Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics*. San Diego: SPIE Proceedings, 2001: 1–15
8. C. G. Parazzoli, R. B. Gregor, K. Li, B. E. Koltjenbah, M. Tanielian. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(10): 107401
9. M. Li, N. Behdad. Frequency selective surfaces for pulsed high-power microwave applications. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2013, 61(2): 677–687
10. C. H. Liu, N. Behdad. Investigating the impact of microwave breakdown on the responses of high-power microwave metamaterials. *IEEE T. Plasma Sci.*, 2013, 41(10): 2992–3000
11. C. H. Liu, J. D. Neher, J. H. Booske, N. Behdad. Investigating the physics of simultaneous breakdown events in high-power-microwave (HPM) metamaterials with multiresonant unit cells and discrete nonlinear responses. *IEEE T. Plasma Sci.*, 2014, 42(5): 1255–1264
12. S. Sajuyigbe, M. Ross, P. Geren, S. A. Cummer, M. H. Tanielian, D. R. Smith. Wide angle impedance matching metamaterials for waveguide-fed phased-array antennas. *IET Microw. Antenna. P.*, 2010, 4(8): 1063–1072
13. U. Leonhardt. Optical conformal mapping. *Science*, 2006, 312(5781): 1777–1780
14. J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 2006, 312(5781): 1780–1782
15. B. Edwards, A. Alù, M. G. Silveirinha, N. Engheta. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103(15): 153901
16. N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science*, 2005, 308(5721): 534–537
17. B. A. Munk. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005
18. R. Mittra, C. H. Chan, T. Cwik. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—A review. *Proc. IEEE*, 1988, 76(12): 1593–1615
19. R. W. Ziolkowski, A. D. Kipple. Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2003, 51(10): 2626–2640
20. S. Clavijo, R. E. Diaz, W. E. McKinzie. Design methodology for Sievenpiper high-impedance surfaces: An artificial magnetic conductor for positive gain electrically small antennas. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2003, 51(10): 2678–2690
21. F. Yang, Y. Rahmat-Samii. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2003, 51(10): 2691–2703
22. D. F. Sievenpiper, J. H. Schaffner, H. J. Song, R. Y. Loo, G. Tansonan. Two-dimensional beam steering using an electrically tunable impedance surface. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2003, 51(10): 2713–2722
23. F. Yang, Y. Rahmat-Samii. *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008
24. R. W. Ziolkowski, P. Jin, C. C. Lin. Metamaterial-inspired engineering of antennas. *Proc. IEEE*, 2011, 99(10): 1720–1731
25. C. Caloz, T. Itoh. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. Portland, OR: Wiley-IEEE Press, 2005
26. A. Grbic, G. V. Eleftheriades. Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(10): 5930–5935
27. L. Liu, C. Caloz, T. Itoh. Dominant mode leaky-wave antenna with backfire-to-end-fire scanning capability. *Electron. Lett.*, 2002, 38(23): 1414–1416
28. R. W. Ziolkowski. Metamaterials: The early years in the USA. *EPJ Appl. Metamat.*, 2014, 1: 5
29. C. M. Soukoulis, S. Linden, M. Wegener. Physics. Negative refractive index at optical wavelengths. *Science*, 2007, 315(5808): 47–49
30. C. M. Soukoulis, M. Wegener. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. *Nat. Photonics*, 2011, 5(9): 523–530
31. X. Zhang, Z. Liu. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nat. Mater.*, 2008, 7(6): 435–441
32. J. Rho, et al. Spherical hyperlens for two-dimensional sub-diffractive imaging at visible frequencies. *Nat. Commun.*, 2010, 1(9): 143

33. G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis, S. Linden. Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength. *Opt. Lett.*, 2007, 32(1): 53–55
34. T. Hand, S. Cummer. Characterization of tunable metamaterial elements using MEMS switches. *IEEE Antenn. Wirel. Pr.*, 2007, 6(11): 401–404
35. H. Tao, A. C. Strikwerda, K. Fan, W. J. Padilla, X. Zhang, R. D. Averitt. Reconfigurable terahertz metamaterials. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103(14): 147401
36. B. Ozbey, O. Aktas. Continuously tunable terahertz metamaterial employing magnetically actuated cantilevers. *Opt. Express*, 2011, 19(7): 5741–5752
37. T. S. Kasirga, Y. N. Ertas, M. Bayindir. Microfluidics for reconfigurable electromagnetic metamaterials. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(21): 214102
38. H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, R. D. Averitt. Active terahertz metamaterial devices. *Nature*, 2006, 444(7119): 597–600
39. R. C. McPhedran, I. V. Shadrivov, B. T. Kuhlmeiy, Y. S. Kivshar. Metamaterials and metaoptics. *NPG Asia Mater.*, 2011, 3: 100–108
40. S. Guenneau, R. C. McPhedran, S. Enoch, A. B. Movchan, M. Farhat, N. A. P. Nicorovici. The colours of cloaks. *J. Opt.*, 2011, 13(2): 024014
41. M. Kadic, T. Bückmann, R. Schittny, M. Wegener. Metamaterials beyond electromagnetism. *Rep. Prog. Phys.*, 2013, 76(12): 126501
42. K. Sato, T. Nomura, S. Matsuzawa, H. Iizuka. Metamaterial techniques for automotive applications. In: *PIERS proceedings*. Hangzhou, China, 2008: 1122–1125
43. F. Fitzek, R. H. Rashedhofer, E. M. Biebl. Metamaterial matching of high-permittivity coatings for 79 GHz radar sensors. In: *Proceedings of 2010 European Microwave Conference (EuMC)*. London: Horizon House Publications Ltd., 2010: 1401–1404
44. K. M. Palmer. Metamaterials make for a broadband breakthrough. *IEEE Spectrum*, 2012, 49(1): 13–14
45. N. Kundtz. Next generation communications for next generation satellites. *Micro-wave J.*, 2014, 57(8): 14
46. K. M. Alam, A. P. Singh, R. Starko-Bowes, S. C. Bodepudi, S. Pramanik. Template-assisted synthesis of π -conjugated molecular organic nanowires in the sub-100 nm regime and device implications. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22(15): 3298–3306
47. R. Starko-Bowes, S. Pramanik. Ultrahigh density array of vertically aligned small-molecular organic nanowires on arbitrary substrates. *J. Vis. Exp.*, 2013 (76): e50706
48. D. J. Shelton, et al. Strong coupling between nanoscale metamaterials and phonons. *Nano Lett.*, 2011, 11(5): 2104–2108
49. D. Shelton. Tunable infrared metamaterials (Doctoral dissertation). Orlando, FL: University of Central Florida, 2010
50. J. B. Pendry, D. R. Smith. Reversing light with negative refraction. *Phys. Today*, 2004, 57(6): 37–43
51. A. Bhattacharya. Modeling and simulation of metamaterial-based devices for industrial applications. 2013-09-26. <https://www.cst.com/Applications/Article/Simulating-Metamaterial-Based-Devices-Industry>