Can researchers make a perfect optical lens?

能否制造完美的光学透镜?

包刚¹, 何赛灵², 马云贵^{2*}

1. 浙江大学数学科学学院, 杭州 310027;

2. 浙江大学光电科学与技术学院光与电磁波研究中心, 杭州 310058

* 联系人, E-mail: yungui@zju.edu.cn

2017-03-09 收稿, 2017-03-14 修回, 2017-03-15 接受, 2017-05-05 网络版发表

摘要 完美透镜可以突破衍射极限实现亚波长成像, 具有重大的应用价值. 该概念的物理效果已经通过微波二维传输线实验得到验证, 目前人们关心的是在光波段是否也可以制作出完美透镜. 本文简要回顾了完美透镜概念的产生和发展过程, 并从理论机制、器件参数和制备能力等角度阐述了它在光波段的发展前景.

关键词 完美透镜, 超构材料, 衍射极限

高分辨率光学成像系统在微纳制造、生物医学、遥感成像、天文观测等众多领域具有重要与广泛的应用, 不断获取更高成像分辨率一直以来是相关科学与技术领域的一项重要挑战. 依据阿贝衍射极限理论, 携带被观测物细节信息的倏逝波(evanescent wave)在自由空间中迅速衰减, 导致远场光学成像存在约半波长尺度的分辨率局限, 即所谓的衍射极限. 2000年英国帝国理工大学Pendry^[1]创造性地提出了一种基于负折射率系数材料透镜的成像理论, 可以在远场突破衍射极限还原被观测物的细节信息而完美成像, 称之为完美透镜(perfect lens). 这一新概念器件对传统光学成像理论具有颠覆性意义, 并开启了超构材料(metamaterial)这一新的研究领域. 完美透镜这一概念的物理效果在微波段通过二维传输线实验^[2]已经得到实验验证, 目前人们更关注的是在具有广泛应用前景的光波段能否制造出完美透镜.

1 背景与挑战

从20世纪40年代开始, 前苏联科学家针对不同结构下的异常电磁波传输现象开展了基础理论研

究^[3], 发现了周期性结构中存在后向电磁波传播现象, 即坡印廷能量向前传播但等相位面却向后运动. 1968年Veselago^[4]进一步提出如果存在折射率等于-1的平板介质, 其内部光线亦具有后向波传播现象, 并在空气界面处发生负折射现象, 由此预言该平板透镜具有绝对聚焦与无畸变成像能力(如图1). 时隔30年, Pendry首次揭示了该类透镜也能同时接收并放大来自被观测物的倏逝波信号, 抵消在自由空间里的指数衰减, 实现完美成像(如图1). 这一新概念的提出得到了学术界广泛关注, 同时也产生了一些质疑, 认为负折射率与倏逝波放大是不符合物理规律的^[5].

事实上完美透镜在概念与实现上确实存在着若干挑战. 首先, 负折射系数材料(超构材料)在自然界中不存在, 技术上需要通过人工谐振单元及周期性结构来实现, 而共振特性导致其工作频率范围狭窄. 其次, 谐振状态不可避免地会产生明显材料损耗, 严重影响了倏逝波放大与最终成像效果. 另外, 超构材料的制备也充满技术挑战, 特别是在高频段. 这方面的实验研究在2005年之前主要以微波段为主, 此后光波段实验也得到快速发展^[6].

引用格式: 包刚, 何赛灵, 马云贵. 能否制造完美的光学透镜? 科学通报, 2017, 62: 1802-1805

Bao G, He S L, Ma Y G. Can researchers make a perfect optical lens (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 1802-1805, doi: 10.1360/N972017-00270

图1 (网络版彩色)完美透镜及成像过程. 来自被观测物的行波与倏逝波经过完美透镜后在焦平面理想叠加. 行波在完美透镜界面发生负折射, 倏逝波则在其内部被放大

Figure 1 (Color online) Imaging of the perfect lens. Both propagating and evanescent waves can pass through the perfect lens and be ideally superimposed in the focal plane. They will experience negative refraction and amplification, respectively, inside the lens

2 微波验证

根据负折射理论, 完美透镜需要磁导率与介电系数皆为负数的特殊材料(亦称为双负材料), 且损耗小到可以忽略. 2001年, 加州大学Shelby等人^[7]在微波实验中利用开口金属谐振环与金属线组合首次实现了双负参数的要求, 成功演示了负折射效应, 但由于该人工复合结构电磁损耗大, 没能够获得倏逝波放大与完美成像. 2004年, 多伦多大学Grbic等人^[12]利用左手传输线概念, 基于微波传输线理论设计一个工作于1.057 GHz的二维完美透镜, 不仅实现了-1的等效折射率参数, 同时实验观测到了倏逝波放大并达到突破衍射极限的成像效果. 该结果强有力证实了负折射完美透镜的概念正确性.

3 光学探索

微波实验的成功让人们人们对完美透镜在光波段的应用更加充满期待, 但由于基质材料(如金属)参数与制备手段等变化, 实验上不允许把微波架构方案直接移植到光波段, 需要在借鉴思想的基础上重新进行结构设计. 对于光波段应用, 考虑到金属等在此波段已经具有负介电系数特性, 获取低损耗光学负磁导率响应是此方面理论研究的核心内容, 另外与微波段应用不同, 光学人工结构单元的精确制备亦是研究难题. 高频段(太赫兹到可见光)人工磁性超构材料最早得到关注, 目前已经掌握不同频段人工磁性及负折射系数超构材料的基本架构方案, 并进行了实验验证. 但由于损耗等参数限制, 双负折射系数材

料还没有能够在完美光学透镜中得到直接应用, 具有类似功能的其他透镜方案在理论与实验上得到了快速发展^[6].

关于完美透镜实验方案, Pendry曾理论预测基于单负系数平板介质在近场情形下也可以针对特定极化波获得完美成像效果, 该想法2005年得到加州大学张翔研究小组^[8]的实验验证. 他们利用银膜透镜在365 nm紫外波段首次实验演示了倏逝波参与情形下的亚波长光学成像效果, 并称之为超透镜(superlens)以示与双负完美透镜的区别. 这类透镜的缺陷是只能近场成像, 该课题组进一步提出利用光栅结构把放大的倏逝波转化为行波, 并通过远场收集与处理, 获得亚波长光学成像. 该方法在二维和三维尺度上得到了实验验证, 但在应用上受限于无法直接透镜成像. 2006年普林斯顿大学Jacob等人^[9]提出, 由双曲(色散)材料组成的空心圆柱或球结构能把物体发出的倏逝波信号逐渐转化成行波, 从而在远场通过透镜收集成像并获得亚波长成像分辨率, 称之为双曲透镜(hyperlens). 很快这种透镜方案得到Liu等人^[10]的实验验证, 并在紫外波段获得五分之一波长的成像分辨率. 此后关于双曲材料的构造制备、物理特性及应用研究逐渐获得拓展, 类似概念也被拓展到声学来实现声波的超分辨成像.

以上透镜方案都是继承了最早完美透镜倏逝波放大或利用的思想, 因而能够在远场实现亚波长成像, 但它们的效果受限于实现方式、工作波段与材料损耗(主要是金属损耗), 且物-镜只能是近场关系. 2012年英国南安普顿大学Rogers等人^[11]提出利用满足超振荡(Super-oscillatory)相位分布关系的特殊金属图形透镜来解决物-镜之间的近场局限, 但巨大旁瓣与逐点扫描的局限让该方案难于实际应用. 目前相关实验研究整体处于概念验证后阶段, 离实际应用尚有距离, 近几年的发展也相对缓慢.

4 小结

令人欣喜的是光波段负折射率材料已有成功实验报道. 一个代表性工作是普渡大学Shalaev等人^[12]提出了一种由双层金纳米棒周期阵列组成的超构材料, 其单元内部相邻金属棒间的等离子共振让它在特定光频率范围具有负折射系数效应. 另外一个代表性工作是Valentine等人^[13]提出的渔网状超构材料, 首次在红外通信波段制作出负折射系数材料(实

部折射率为-1.23, 品质因数3.5). 该方案提出后得到了广泛重视和发展, 迄今已在工作波长与品质因数有了大幅改进提高. 针对材料损耗这一关键因素, 人们也尝试了不同解决方案. 其中最有成效的是普渡大学Xiao等人^[14]提出的通过增益介质来补偿超构材料金属损耗, 制备出可用于737 nm可见光的高质量负折射率材料(实部折射率为-1.017, 品质因数26). 虽然这些方案目前在大面积有效制备、均匀性与可重复性上还有诸多问题需要解决, 但已经使人们对负

折射系数材料在光波段的制作与应用充满希望. 未来随着超紫外曝光等软X射线微结构加工技术的进步发展与成熟, 并恰到好处运用增益介质等其他手段, 大规模制作低损耗光学负折射系数超构材料有望得到解决.

综上所述, 能否制造出严格意义的光学完美透镜, 现阶段主要受限于实验困难. 但随着理论研究的深入及实验技术的突破, 未来光学完美透镜或超透镜值得期待.

参考文献

- 1 Pendry J. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966–3969
- 2 Grbic A, Eleftheriades G V. Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 117403
- 3 Capolino F. *Theory and Phenomena of Metamaterials*. BocaRaton: CRC Press, 2009
- 4 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*, 1968, 10: 509–514
- 5 Garcia N, Nieto-Vesperinas M. Left-handed materials do not make a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 207403
- 6 Zhang X, Liu Z. Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nat Mater*, 2008, 7: 435–441
- 7 Shelby R A, Smith D R, Shultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292: 77–79
- 8 Fang N, Lee H, Sun C, et al. Report sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science*, 2005, 308: 534–537
- 9 Jacob Z, Alekseyev L, Narimanov E E. Optical hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit. *Opt Express*, 2006, 14: 8247–8256
- 10 Liu Z W, Lee H, Xiong Y, et al. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects. *Science*, 2007, 315: 1685
- 11 Rogers E T, Lindberg J, Roy T, et al. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging. *Nat Mater*, 2012, 11: 432–435
- 12 Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, et al. Negative index of refraction in optical metamaterials. *Opt Lett*, 2005, 30: 3356–3358
- 13 Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*, 2008, 455: 376–379
- 14 Xiao S M, Drachev V P, Kildishev A V, et al. Loss-free and active optical negative-index metamaterials. *Nature*, 2010, 466: 735–738

马云贵

浙江省安吉县人, 2005年于兰州大学获得博士学位, 其后赴新加坡国立大学从事科学研究工作, 2011年初回国加入浙江大学工作至今, 现为浙江大学光电科学与工程学院教授, 获得教育部新世纪优秀人才计划与浙江省杰出青年科学基金支持, 目前主要从事人工光电磁材料与器件以及亚波长微纳光学等方面课题研究.

Can researchers make a perfect optical lens?

BAO Gang¹, HE SaiLing² & MA YunGui^{2*}

¹ School of Mathematical Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

² Center for Optical and Electromagnetic Research, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

* Corresponding author, E-mail: yungui@zju.edu.cn

Perfect lens can break the diffraction limit by amplifying evanescent wave components emitted from objects and enable subwavelength imaging, which may potentially lead to the revolution of modern imaging technologies. This ground breaking feature has challenged the well-accepted wisdom on the role of evanescent waves in imaging, which has generated significant research interest from the scientific communities across different disciplines. However, it was also being strongly disputed at the beginning. The implementation of this lens would be technically rather difficult and challenging due to the absolute requirement of negative refractive indexed materials that are not available in nature. Artificial electromagnetic materials, widely known as metamaterials, with both electric and magnetic responses have been then proposed to simultaneously generate negative permittivity and permeability constants. Because of the issues of fabrication and loss, the perfect-lens effect was first demonstrated only in microwaves by a two-dimensional transmission line experiment using lumped circuit design with left-handed properties. For optics, which is more anticipated for applications, alternative lens designs have been developed to manipulate evanescent waves in different ways and also create subwavelength imaging. Design and experimental techniques and methodology have been intensively discussed in the literature to improve the fabrication efficiency and device performance. Significant progress has been achieved on subwavelength imaging inspired by the employment of metamaterials. However, there are still critically important technical or physical issues unsolved for all of the subwavelength lens scenarios proposed so far, which demand innovative ideas. In particular, it is still an unknown question that whether a perfect lens with negative refractive index could be made in optics. The promising future is indicated by the recent progress on the experiment for the fabrication of high-quality negative refractive index metamaterials. In this paper, from the historical and progressive aspects of perfect lens, we describe the perspective and outlook based on a survey of the available analysis of parametric and technological challenges imposed by this special lens.

perfect lens, metamaterial, diffraction limit

doi: 10.1360/N972017-00270