

超构光子技术新突破

——实现超薄宽带消色差光学器件*

王湫明 李涛[†] 祝世宁

(南京大学现代工程与应用科学学院 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 南京 210093)

2017-08-31收到

[†] email: taoli@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20171207

当前的信息技术给人类生活带来了日新月异的变化。光/光子是信息采集、传输和表达的重要载体,光学技术是人与信息交互中最广泛也最为重要的手段。然而,受光学衍射极限、成像条件、材料光学参数等限制,传统的光学元件通常具有宏观尺度,对空间需求大,对环境稳定性要求高。比如常见的由透镜、分光镜、反射镜等构建的光学系统,因受光学材料色散、傍轴条件的限制,人们需要精心地设计组合透镜元件对色差、像差进行矫正才能获得良好的光学成像性能。这很难满足人们对器件的便携性、小型化、稳定度等要求。

20世纪末,英国科学家Pendry教授提出用亚波长金属线和共振环结构来获得人工电磁响应^[1, 2],从而可以按需设计材料的电磁及光学性能。这原则上可以任意引导光的传播,为发展新型的光学元件提供了一种全新的设计思想。新世纪以来,随着先进加工技术的发展,微纳光子学蓬勃兴起,特别是人们利用金属纳米结构实现对亚波长光场调控的能力取得长足的进步。基于此,人们设计并实现了负折射率材料、超透镜成像、光学隐身、人造黑洞等一系列新颖的效应和功能^[3-9],直接催生出超构材料(Metamaterials)、变换光学等新学科方向,同时也推动了微纳光学、等离激元光子学等多个分支学科的发展。

尽管超构材料的诸多原理性思想已经被实验验证并演示,但是在光学波段,其材料内部的巨大光学损耗制约了它真正走向实用化。2011年,哈佛大学Capasso教授研究组提出了超构表面

(Metasurface)的设计思想在一定程度上避免了这种损耗^[10]。超构表面是通过一薄层亚波长结构单元去局地地控制空间光场的相位、偏振及强度等分布的光学设计。它可以有效地调控光的传播性质,实现如涡旋光束、光学自旋分离、隐身地毯等功能^[10-12],同时避免了在体块超构材料内部传播的巨大损耗,因而具有重要的应用前景。超构表面的厚度仅在波长量级甚至更薄,具有优异的微纳光学集成功能。其特有的平面结构,为研制平板透镜等光学器件提供了全新的设计原理。Capasso教授组设计的超构表面是通过一系列不同形状的亚波长共振单元实现对散射光场的相位和振幅进行调控,我们称之为共振型超构表面^[10]。它可以是偏振依赖的,也可以不依赖光的偏振。但其共振属性限制了它的工作带宽。2012年,英国伯明翰大学张霜教授研究组在前人的基础上系统地发展了基于圆偏振贝里相位的超构表面设计方法^[13],通常称为几何相位法。它基于空间旋转排布的结构单元设计,不依赖于共振,因而具有较宽的工作带宽。此后,这两种方法都被不断优化,在功能演示、调控效率、信息复用等方面都取得重要进展^[14-17]。近年来,人们又将初始基于金属材料的结构设计发展到全介质体系中,获得了更高效率的超构透镜、光束调控等功能^[18, 19]。新一轮的光学技术革命——超构光子技术正方兴未艾。

目前, Capasso研究组已经成功利用基于TiO₂纳米柱单元结构研制成功可见光波段的超构表面平板透镜(百纳米量级厚度),其单波长成像性能

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0202103)、国家自然科学基金(批准号: 11674167; 11621091)资助项目

可以媲美传统光学显微镜镜头^[18]。不过, 此类新原理设计真正走向应用还面临几项重要挑战, 材料色散及衍射效应导致的色差就是其中之一。如何实现器件的宽带消色差是当前该领域大家公认的目标。前人已报道的工作大多是通过参数优化方法实现几个孤立波长的消色差^[20]。对于连续波段的消色差, 还面临很大挑战。2017年, Capasso 研究组报道了迄今可见光波段最好的超构透镜消色差结果, 其工作带宽也仅是 60 nm(490—550 nm)^[21]。加州理工学院的 Faraon 教授研究组采用相似的原理实现了以硅纳米柱为单元、工作在近红外波段的消色差超构透镜, 其工作带宽达到 140 nm(450—590 nm)^[22]。这些进展虽然实现了连续波段内的色差调控, 但原理上还是基于结构参数优化的方法, 其带宽的拓展受到局限。根本原因是这类超构表面的结构单元所提供的参数空间很难同时满足色差调控所需的空域相位分布和频域相位补偿。因此, 人们亟待发展出新的设计原理和方法来突破超构表面器件消色差带宽的瓶颈。

我们研究组长期致力于表面等离子激元和超构材料的研究。我们早期提出的实现负折射的耦合渔网结构和偏振调控的 L 形单元超构材料都成为了本领域的主流设计方案。在近年来的超构表面研究方面, 我们基于 LED 芯片实现了偏振调控的动态显示^[23], 与澳大利亚国立大学 Kivshar 教授合作实现超高效率的介质超构表面全息^[24], 见图 1。近期, 我们与台湾蔡定平教授研究组合作, 在解决超构表面器件在连续宽频段上消色差的方面取得了重要突破^[25], 见图 2。我们首先将透镜聚焦所需要的相位分解成两部分, 即: 频率无关的基础相

位和频率相关的补偿相位(与频率成正比)。然后巧妙结合超构表面结构设计的两种方案(共振性和几何相位性), 通过几何相位设计聚焦透镜需要的基础相位分布, 再通过共振设计补偿不同频率带

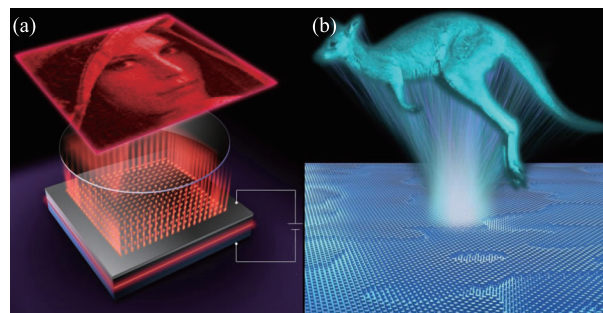


图1 (a)基于LED芯片设计的超构表面实现偏振调控动态显示^[23]; (b)基于硅纳米结构的高效率透射式超构表面全息^[24]

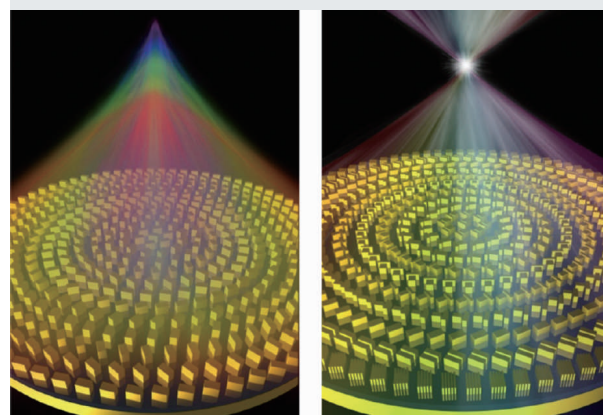


图2 传统色差的超构透镜(左)和消色差超构透镜(右)的结构和聚焦示意图

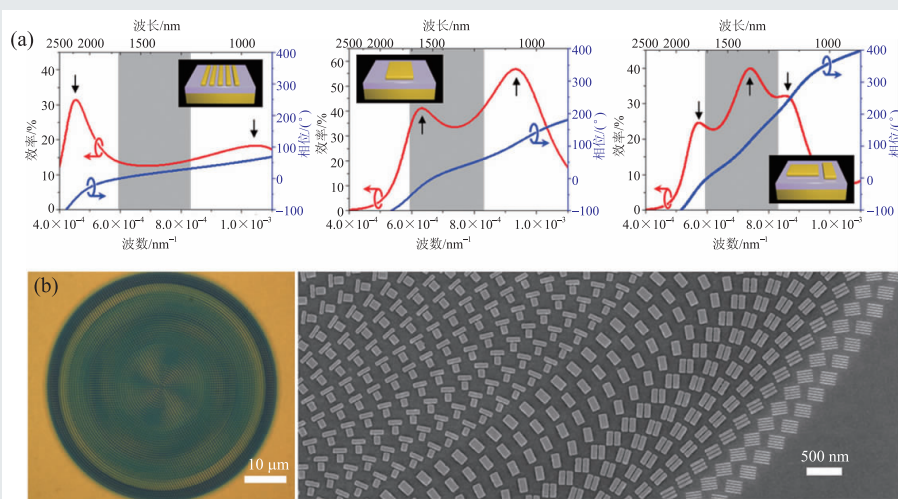


图3 (a)特殊排列的金属纳米棒结构与金属反射镜结合产生所需要的不同斜率线性相位补偿; (b)根据设计实验加工出的样品的光学显微照片(左)和局部放大电子显微照片(右)^[25]

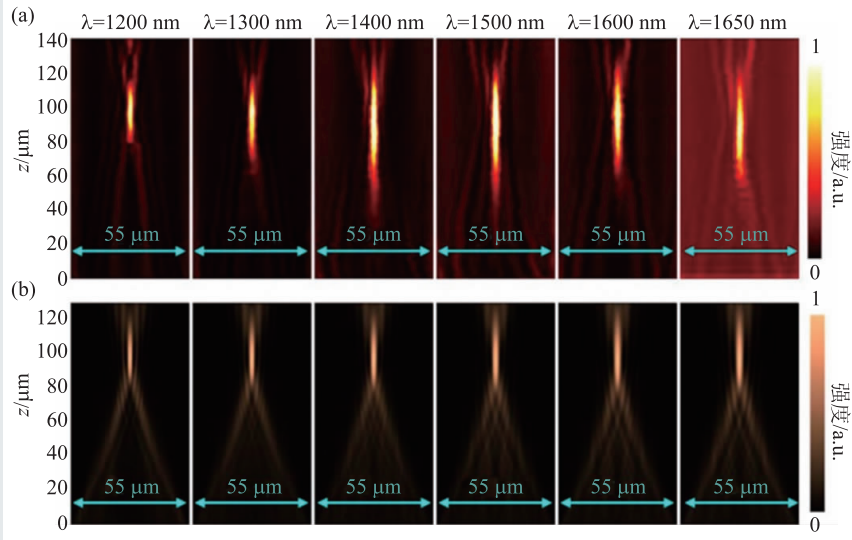


图4 (a)实验测量与(b)理论模拟获得消色差聚焦效果图^[25]

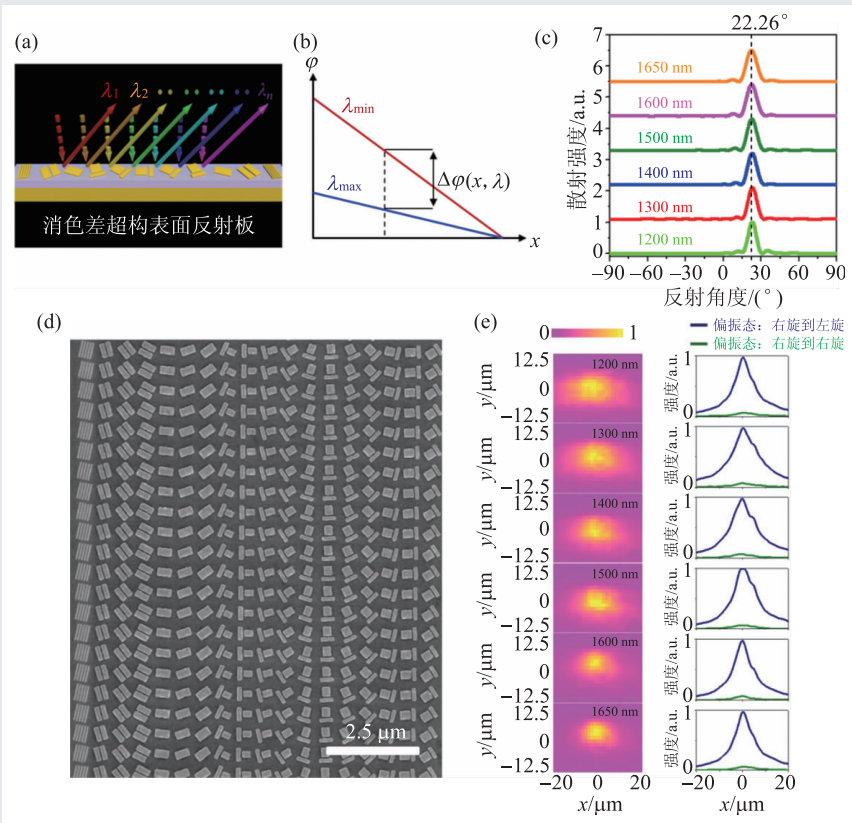


图5 (a)连续宽带消色差超构表面反射板示意图；(b)不同频率相位差示意图；(c)理论计算各种频率下消色差样品的反射角度；(d)实验制备消色差反射板的SEM图；(e)实验测试得到的反射效果^[25]

来的相位色散。需要特别强调的是，通常的共振带来相位变化都是突变的，不满足与频率成正比的线性相位补偿。本项工作中，我们提出了新颖的

“集成共振(integrate resonance)”方案，利用特殊排列的金属棒的多个共振之间的线性相位区域，成功设计出满足聚焦透镜要求的一系列不同斜率的线性相位补偿的结构单元(图3(a))。图3(b)显示了利用纳米加工制备的反射性超构透镜样品照片，整个镜片的直径约55 μm，薄膜厚度小于100 nm。右侧电子显微镜照片反映出了该超构透镜的结构单元具有几何相位的旋转排布，以及不同纳米棒形状及数目的集成共振性质。

进一步的光学测试显示了很好的宽带消色差实验结果，这与理论计算的结果符合非常好，如图4所示。可以看到，在1200 nm到1650 nm的波段内，反射型聚焦镜得到了很好的消色差聚焦效果，焦距在100 μm左右，与理论设计基本一致。值得一提的是，这个消色差聚焦镜的带宽达到了480 nm，已经接近中心波长的1/3，这是现有报道中最大的消色差带宽。此外，除了连续宽带的超构表面聚焦镜外，作为应用举例，我们还设计连续宽带的超构表面反射板。在同样的工作频段，所有频率的入射光束都可以以同一角度反射，具体结果见图5。

此项研究提出的基础相位和色散补偿相位分离的设计原理具有很强的扩展性和通用性，它从原理方法层面解决了超构表面设计中困扰大家的

宽带色散调控的问题。利用该方法,我们也设计了透射性的全介质超构透镜,其消色差带宽可以达到 1000 nm,相关实验工作正在进行中。当然,该设计采用了集成共振相位补偿方案,通常需要工作在偏离共振中心位置,这一定程度上使得它的效率不会很高。不过,我们相信随着更多

新原理的提出与发展、更多设计优化,超构光子器件的性能将越来越优异,有希望在不远的将来构建出超薄、超高集成、超稳定的光学器件,甚至对现有的透镜成像、光栅分光、光谱测量等器件和技术带来原理性变革。

参考文献

- [1] Pendry J B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76: 4773
- [2] Pendry J B *et al.* IEEE Trans. Micro. Theo. Tech., 1999, 47: 2075
- [3] Pendry J B. Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 3966
- [4] Shelby R A *et al.* Science, 2001, 292: 77
- [5] Fang N *et al.* Science, 2005, 308: 534
- [6] Pendry J B *et al.* Science, 2006, 312: 1780
- [7] Schurig D *et al.* Science, 2006, 314: 977
- [8] Yao J *et al.* Science, 2008, 321: 903
- [9] Genov D A *et al.* Nat. Physics, 2009, 5: 687
- [10] Yu N *et al.* Science, 2011, 334: 333
- [11] Yin X *et al.* Science, 2013, 339: 1405
- [12] Ni X *et al.* Science, 2015, 349: 1310
- [13] Huang L *et al.* Nano Lett., 2012, 12: 5750
- [14] Huang L *et al.* Nat. Commun., 2013, 4: 2808
- [15] Zheng G *et al.* Nat. Nanotechnol., 2015, 10: 308
- [16] Wen D *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 8241
- [17] Huang Y W *et al.* Nano Lett., 2015, 15: 3122
- [18] Khorasaninejad M *et al.* Science, 2016, 352: 1190
- [19] Arbabi A *et al.* Nat. Nanotechnol., 2015, 10: 937
- [20] Aieta F *et al.* Science, 2015, 347: 1342
- [21] Khorasaninejad M *et al.* Nano Lett., 2017, 17: 1819
- [22] Arbabi E *et al.* Optica, 2017, 4: 625
- [23] Wang L *et al.* Sci. Rep. 2013, 2: 2603
- [24] Wang L *et al.* Optica, 2016, 3: 1504
- [25] Wang S *et al.* Nat. Commun., 2017, 8: 187

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

户名:中国科学院物理研究所

帐号:112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

读者和编者

