

基于宽带消色差超构透镜的彩色成像

王湫明[†] 李涛 祝世宁

(南京大学物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 现代工程与应用科学学院 人工微结构科学与技术协同创新中心 南京 210093)

2018-04-29收到

[†] email: wangshuming@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180605

研究表明,人类从外界获取的绝大部分信息是通过眼睛得到的。丰富多彩的颜色使我们身边的事物可以彼此区分,也使我们的生活多姿多彩。如何得到对身边彩色世界的最优成像是人们一直以来的终极目标,也是光学研究领域的一个重要课题。然而,我们制造光学元器件的光学材料或多或少存在着色散现象——材料的光学特性随波长变化而改变。这导致了光学元器件的色差现象。色差问题严重影响着宽波段工作的光学系统的精度和效果,特别是在可见光波段的彩色成像。传统光学设计是通过将多片不同色散性质、不同曲面形状的透镜贴合在一起,实现针对几个分立波长的消色差效果,从而可以大致得到比较宽带的近似消色差效果。要实现宽带连续消色差光学元器件始终是一个非常困难的挑战,需要新的设计原理才有可能解决这个问题。

超构表面是解决传统光学系统结构厚重和设计复杂问题的一种非常有效的方案。通过设计超构表面每个位置上的超构单元的结构、尺寸和排布方式可以准确地得到所需任意的相位分布^[1]。然而超构表面中的结构单元存在电磁共振,会引入额外的共振色散,从而导致很强的色差效应,如图1所示。一系列前人的研究结果始终没有给出宽带消色差超构表面的有效设计方案^[2-6]。近期,南京大学祝世宁院士团队与台湾蔡定平教授团队组成的联合团队,在可见光连续宽带消色差超构透镜的研究方向取得了重大的突破。他们首次使用连续宽带消色差超构透镜,实现了白光照明成像以及彩色图片成像,并得到了很好的消色差的成像效果。

事实上,在此之前,该联合团队已经在近红外宽带消色差超构表面器件领域取得了引人注目

的结果^[7, 8]。他们创新地提出将聚焦镜满足的相位拆分成两个部分:一部分是与波长无关的基础相位,对应着聚焦效应;另一部分是与波长有关的补偿相位,对应于色差效应。前者可以通过使用几何相位实现;后者则可以使用集成共振单元的共振相位得到。使用这个方案,他们成功地实现了在近红外波段(1200—1650 nm,带宽为中心波长的1/3)的宽带消色差反射型聚焦镜和反射板。

但是,使用金属结构得到的集成共振单元的工作效率偏低,而且反射型器件的使用较透射型器件少。在近期发表的工作中,该联合团队将研究推进到可见光波段、透射型、高效率的宽带消色差超构透镜(图2(a))。他们使用在可见光频段透明的氮化镓材料,加工超构表面。利用不同长宽尺寸的介质柱和介质槽结构,得到相较于反射体系更高的工作效率,且相位曲线与频率成正比。值得一提的是,介质槽结构的引入可以进一步扩大结构单元提供的相位补偿和更高的工作效率。结构单元的相位补偿、工作效率和单元中支持的高阶共振模式的磁场分布,如图2(b, c)所示。使用这些集成共振单元,可以组成覆盖可见光波段

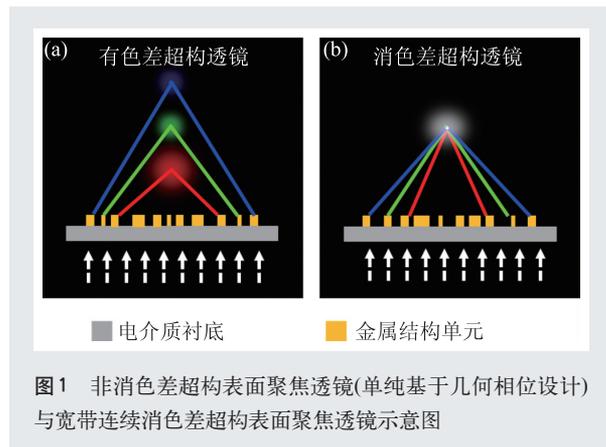


图1 非消色差超构表面聚焦透镜(单纯基于几何相位设计)与宽带连续消色差超构表面聚焦透镜示意图

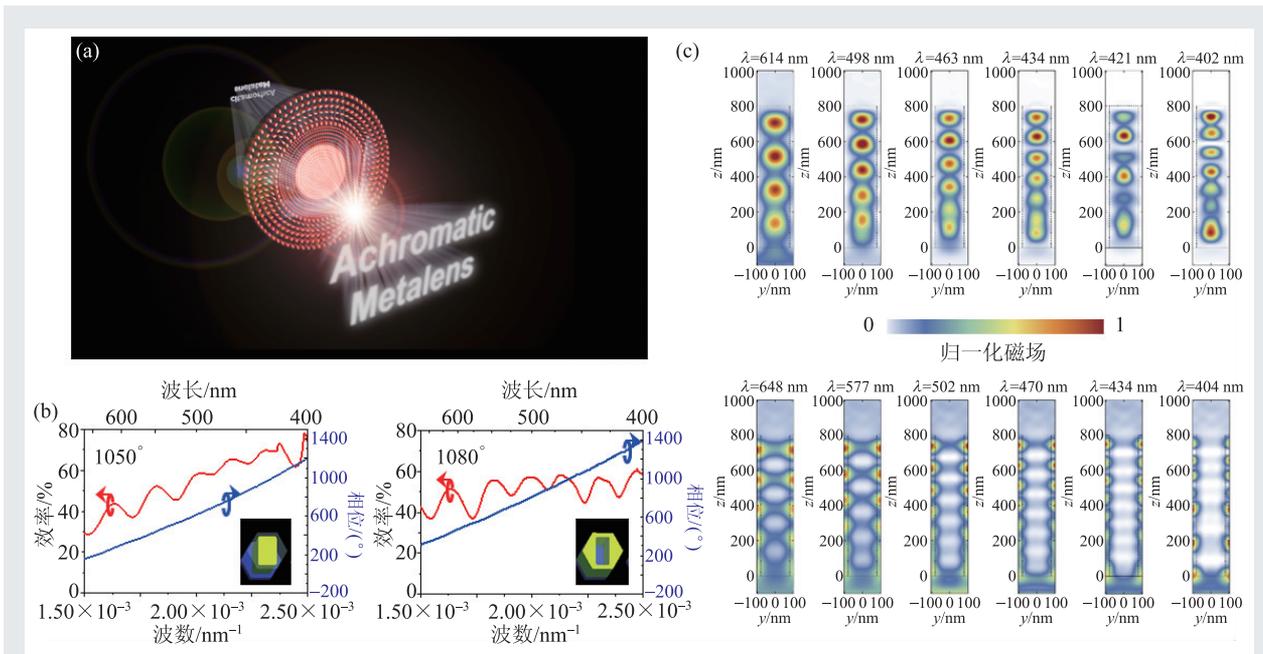


图2 可见光宽带消色差超构透镜 (a)示意图; (b, c)介质柱结构和介质槽结构对应的相位曲线、工作效率和单元中的高阶电磁共振对应的磁场分布

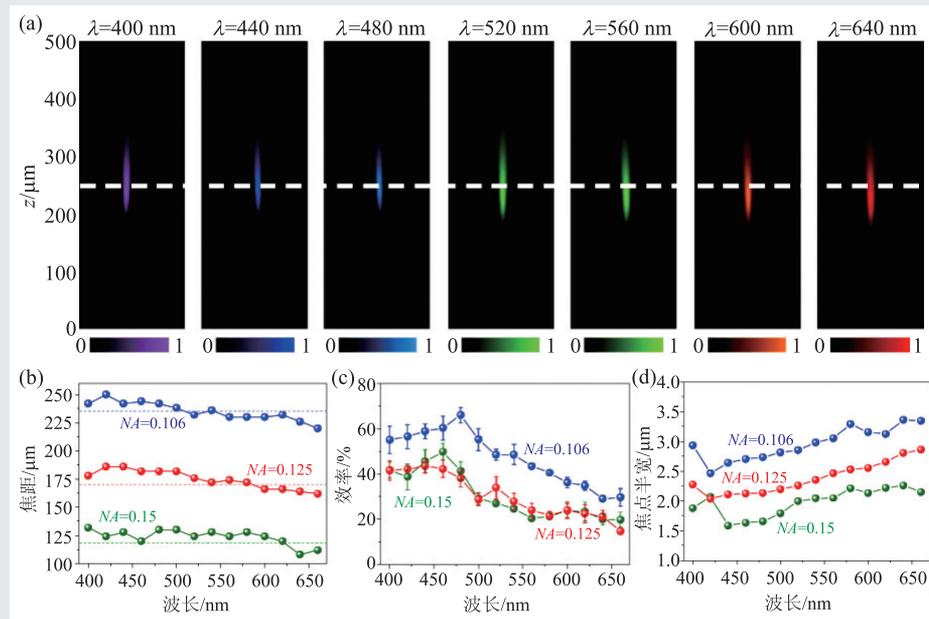


图3 (a)使用连续宽带消色差超构透镜, 实现宽带消色差聚焦, 工作波长范围为400—660 nm; (b—d)不同数值孔径的宽带消色差超构透镜在工作波段中的焦距分布、工作效率分布和焦点半高宽

(400—660 nm, 带宽为中心波长的1/2)的连续宽带消色差超构透镜。

他们首先使用制备的数值孔径为0.106的宽带消色差超构透镜实现了宽带消色差聚焦效果。如图3(a)所示, 在400 nm到660 nm的工作波段, 入射的平行光都可以聚到相同的焦点(设计焦距为

235 μm)。作者同时制备了不同数值孔径的宽带消色差超构透镜, 可以看到都可以得到很好的连续宽带消色差聚焦效果(图3(b))。这些超构透镜的效率都比较高, 平均效率为30%—40%, 最高效率接近70%(图3(c))。从这些超构透镜的焦点半高宽可以看出, 它们已经非常接近衍射极限 $\frac{\lambda}{2NA}$, 这里NA代表数值孔径。这证明制备

的超构透镜的质量很理想(图3(d))。

在消色差聚焦的基础上, 他们使用消色差超构透镜对白光照明的美军标1951分辨率板进行成像, 可以得到很好的白光成像的效果。为了比较消色差的成像效果, 作者制作了单纯使用几何相位设计的非消色差超构透镜, 并对白光照明的分

分辨率板也进行了成像。可以看到，没有消色差设计的超构透镜的色差非常明显，成像图案中出现了各种颜色的色差效应。但是经过宽带消色差设计的超构透镜成像图案始终是白色的(图4(a, b))。同时，也对更精细的线条进行成像，可以看清7阶最精细的条纹，对应的线条宽度为 $2.19\ \mu\text{m}$ ，接近此透镜的成像分辨率的理论极限(图4(c))。可见这个宽带消色差超构透镜具有比较好的成像效果。在白光照明成像的基础上，作者首次使用宽带消色差超构透镜对彩色图片进行成像，得到无色差的色彩丰富的成像效果，如图4(d—i)所示。这是之前超构透镜领域没有实现和报道过的。此工作已于2018年初发表在 *Nature Nanotechnology* 上^[9]。值得一提的是，在这个工作发表的同期，在 *Nature Nanotechnology* 上也刊登了哈佛大学 Capasso 组在可见光(470—670 nm)宽带消色差超构透镜的研究结果^[10]。相较之下，前者的结果具有更宽的工作带宽和更高的工作效率，并且还首次展示了彩色成像的效果，这是后者没有给出来的。

综上所述，可见光宽带消色差超构透镜已经成为研究者们广泛关注的新热点。近期连续在该领域的新成果报道，表明超构透镜正在以飞快的

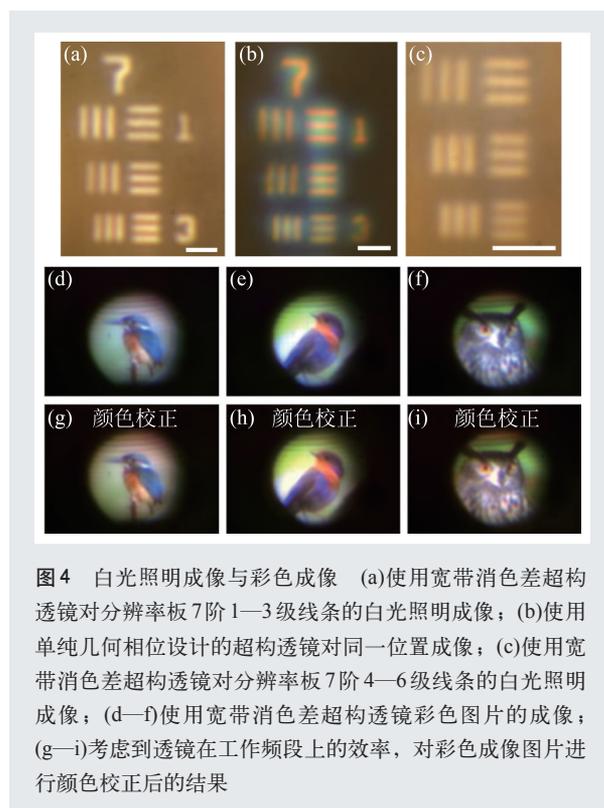


图4 白光照明成像与彩色成像 (a)使用宽带消色差超构透镜对分辨率板7阶1—3级线条的白光照明成像；(b)使用单纯几何相位设计的超构透镜对同一位置成像；(c)使用宽带消色差超构透镜对分辨率板7阶4—6级线条的白光照明成像；(d—f)使用宽带消色差超构透镜彩色图片的成像；(g—i)考虑到透镜在工作频段上的效率，对彩色成像图片进行颜色校正后的结果

速度实现对自身成像能力的完善和对传统透镜的挑战。相信不久的将来，超构透镜可以凭借在特定领域自身独有的优异表现，应用于人们的生活和工作之中。

参考文献

- [1] Yu N, Genevet P, Kats M A *et al.* *Science*, 2011, 334:333
- [2] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P *et al.* *Nano Lett.*, 2015, 15:5358
- [3] Aieta F, Kats M A, Genevet P *et al.* *Science*, 2015, 347:1342
- [4] Avayu O, Almeida E, Prior Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8:14992
- [5] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y *et al.* *Nano Lett.*, 2017, 17:1819
- [6] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M *et al.* *Optica*, 2017, 4:625
- [7] Wang S, Wu P C, Su V C *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8:187
- [8] 王漱明, 李涛, 祝世宁. *物理*, 2017, 46:830
- [9] Wang S, Wu P C, Su V C *et al.* *Nat. Nano.*, 2018, 13:227
- [10] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V *et al.* *Nat. Nano.*, 2018, 13:220

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投稿与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029

《物理》编辑部