

超表面透镜的宽带消色差成像 (特邀)

莫昊燃^{1,2}, 纪子韬¹, 郑义栋¹, 梁文耀¹, 虞华康¹, 李志远¹

(1. 华南理工大学 物理与光电学院, 广东 广州 510641;
2. 广东晶启激光科技有限公司, 广东 东莞 523808)

摘要: 超透镜是一种由二维亚波长阵列结构表面所设计的透镜, 其对光场中振幅、相位和偏振的调控能力较灵活, 同时具有低损耗、易集成、超轻薄等优点, 近些年引起了科研人员广泛的研究兴趣。然而在大多数情况下, 针对特定波长设计的超透镜会遭受较大的色差, 从而限制了其在多波长或宽带应用中的成像作用。超透镜因其二维平面结构引入了新的自由度, 在对色差的消除上体现了新的潜力。文中报道了多种不同的消色差超透镜设计及其消色差调控机理, 并对现有的消色差超透镜从调制波段类型进行了分类, 如对离散波长的和对连续波长的消色差超表面透镜, 后者又可从工作模式上分类为透射型和反射型, 最后介绍了超透镜阵列在成像上的应用以及其在大量深宽带消色差器件上的前景。

关键词: 超表面; 超透镜; 消色差聚焦透镜

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211005

Broadband achromatic imaging with metalens (*Invited*)

Mo Haoran^{1,2}, Ji Zitao¹, Zheng Yidong¹, Liang Wenyaoyao¹, Yu Huakang¹, Li Zhiyuan¹

(1. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. Guangdong Full-spectra Laser Technology Co., Ltd, Dongguan 523808, China)

Abstract: Metalens, the specific type of lens designed with the surfaces mading of two dimensional array at the subwavelength scale, has shown great flexibilities to control the light field, including the arbitrary modulation abilities of amplitude, phase and polarization at the subwavelength scale. Moreover, the metalens possesses the unique advantages of low loss, integratable and conformable design and ultrathin, therefore attracts immense attentions in recent years. However, in most cases, the metalens designed for a specific wavelength may penetrate through the large chromatic aberration, which limits their usefulness in multi-wavelength or broadband applications. On the other hand, the metalens has renewed new degrees of freedom due to its two-dimensional planar structure, which has the potential in the elimination of chromatic aberration. Some different typical achromatic metalens designs and their achromatic modulation mechanism were reviewed, the existing achromatic metalens were classified from the types of modulated light bands, such as the achromatic matelens for discrete and continuous wavelength respectively, and the latter can be classified as transmissive and reflective from the working mode. Finally, the application of metalenses array in imaging and their prospect of broadband achromatic devices of large depth of field were introduced.

Key words: metasurfaces; metalens; achromatic focusing lens

收稿日期: 2020-11-14; 修订日期: 2020-12-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0306200); 国家自然科学基金 (11974119, 12074127, 11504114); 广州市科技计划项目 (201904010105); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2019ZZ50); 华南理工大学教研教改项目 (x2wl-Y1190281)

0 引言

透镜是光学应用的基本元件,在数码相机、激光、光学传感、安防、车载等各个领域都有着广泛的应用。传统透镜以玻璃或其他透明材料制成,通过光在介质中的光程积累来达到对出射光场相位分布的调控^[1-3],这要求透镜具有一定的曲面面形和厚度,同时为了消除像差,往往需要多个透镜组合起来。因此传统光学器件通常具有较大的体积和重量,这与未来光学元件的集成化和微型化发展趋势相悖。光学器件的平面化进程可以追溯到上个世纪末,当时研究者基于衍射理论研制出了二元光学器件^[4],极大地降低了光学器件的厚度,但是其厚度仍比调控波长要大,且有数值孔径较小,色差大等限制。

21 世纪以来,伴随着微纳加工技术的发展,学界提出了亚波长结构器件的概念。由于较多的自由度和灵活的设计,亚波长结构器件能对电磁波的振幅、相位、和偏振等多种参量进行操控,同时可达到亚波长或深亚波长的调制尺度。超材料 (metamaterials) 便是一种基于亚波长结构的的人工结构材料,由 D.R.Smith 在 2001 年首次提出^[1,5]，“meta”在希腊语里面是“超越”的意思,故该材料命名为超材料,意为其利用亚波长结构设计出的奇异电磁响应已经超出了自然界现有材料的电磁参数的范畴,即超材料的性质并不取决于其材料的化学性质,而是由其组成的结构决定,如亚波长金属和电介质结构以及由其构成的阵列。因其奇异的电磁响应特性和设计自由度,超材料在近年来有极大的发展,并在超分辨成像^[6-7]、光学隐形^[8-10]和高方向辐射天线^[11]上表现出了应用潜力。鉴于三维超材料在光波段的损耗问题和加工难度,二维化的超材料具有极薄的厚度,能大幅降低材料对光场的损耗,从而提高透反射或散射的效率,由此提出了光学超表面 (metasurfaces) 的概念^[12-14]。2011 年哈佛大学的 Capasso 团队利用其设计的 V 形天线超表面明确了超表面的折反射定律^[14],也称为广义折反射定律,并对其进行了三维拓展^[15]。其后,超表面引发了极大的研究热度。其中,超透镜 (metalens) 或称超表面透镜,便是一种基于光学超表面设计的光学器件。光学超透镜在理论上可以通过其平面亚波长结构产生 2π 范围的相位,以及按需改变振幅,偏振,具有在亚波长或深亚波长尺度上任意操控电磁波的潜力,同

时兼具平面化的优点,这是光场调控能力的一个全新的革命。

然而,在实际的超表面设计中,大多局限于单一波长的范畴,当进入超表面的光线的波长并非为预设的波长时,超表面原定的调控功能将会出现偏差甚至不能实现。这种情况与传统光学元件中由于材料的折射率随入射光频率而改变所引起的色散现象相似,色散会在透镜系统中产生一定程度的焦点分离,影响光学系统的性能及成像质量。超透镜的色散主要体现在两方面,一是不同波长复振幅对超表面上的亚波长结构的响应不同造成的色散。二是光在超表面出射后的自由空间中传播波矢随波长改变造成的色散。超表面中的色散必然会限制其应用范围,设计超表面透镜时,由色散产生的色差将会在一定程度上降低成像质量。在传统的光学设计中,将具有不同色散性质的玻璃进行组合,如使用冕玻璃凸透镜和火石玻璃凹透镜组合的两片式透镜,从而抵消色差。而在超透镜消色差设计中,要求其亚波长结构做到对多波长或者宽带波段的结构色散和传播色散共同调控。不过超透镜的二维平面结构引入了新的自由度,在解决色差问题时极具潜力。在目前众多的超透镜研究中,已经提出了几类不同的消色差方案。

1 离散波长的共焦消色差超透镜

目前,研究者们已经报道了一些具有宽谱响应的透射或反射式的超表面^[16-22],在这些研究中,由超表面实现的相位函数在若干个波长范围内相对恒定。然而,与超表面相互作用后,光在传播过程中所积累的相位色散将会导致出射光场的色差现象,如图 1(a) 所示。哈佛大学的 Capasso 团队^[23]指出,传播相位的累积色散可以通过超表面结构中仅与波长相关的相移来补偿。通常,当光与超表面相互作用时,界面之后的总累积相位 ϕ_{tot} 是两种相位贡献的总和:

$$\phi_{\text{tot}}(r, \lambda) = \phi_{\text{m}}(r, \lambda) + \phi_{\text{p}}(r, \lambda) \quad (1)$$

式中: ϕ_{m} 是由超表面在 r 点提供的相移;而 ϕ_{p} 是通过自由空间传播所积累的相位。右边第一项对亚波长结构的共振响应有着高度的敏感性,第二项则满足 $\phi_{\text{p}}(r, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} l(r)$, $l(r)$ 为超透镜上 r 点到所求场点的距离。显然,只要保持 ϕ_{tot} 为一个常数,那么就得到了总体色散为零的结果,继而实现消色差功能。

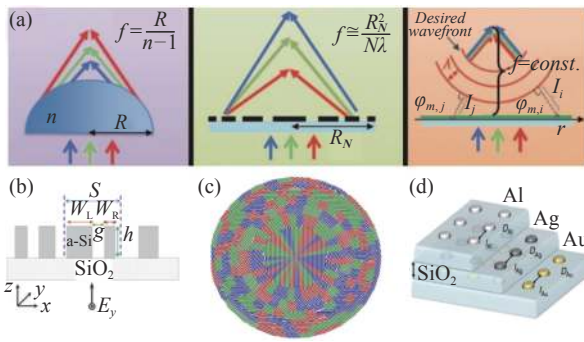


图 1 (a) 传统透镜、超透镜和消色差超透镜的色散^[24]; (b) 非晶硅耦合器示意图^[25]; (c) 复合消色差超透镜^[26]; (d) 含有金属 Al、Ag 和 Au 的三层亚波长结构^[27]

Fig.1 (a) Dispersion in conventional lens, metalens and achromatic metalens^[24]; (b) Schematic diagram of the α -Si coupler^[25]; (c) Composite achromatic metalens^[26]; (d) Three-layer subwavelength structure containing metal Al, Ag and Au^[27]

要实现保持 ϕ_{tot} 为一个常数值,在设计超表面时必须考虑不同波长的光线的色散,并根据所需的波长进行补偿。这种方法最近由 Capasso 团队提出并通过实验证明^[24-25],通过用耦合的条形介质谐振器作为多波长的相移模块。将两个条形介质谐振器放置在近距离处,使它们的近场重叠,创建了一个耦合谐振器系统。近场耦合将影响两个相邻条形谐振器的模态场分布,从而改变耦合谐振系统对应的的光谱位置和谱宽度。间隙大小和位置可以作为附加自由度来设计出射的振幅和相位,该耦合器单元结构如图 1(b) 所示,在超透镜的空域相位设计中,针对不同波长,选取每个单元上不同的条形耦合器的宽度和它们之间的间隙距离 g ,使其满足下式:

$$\varphi_m(x, \lambda_i) = -\frac{2\pi}{\lambda_i} \left(\sqrt{x^2 + f^2} - f \right), i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

Capasso 团队用此方案实现了波长分别为 1 300 nm、1 550 nm 和 1 800 nm 的三波长共焦超透镜,其焦距 f 为 7.5 mm,透镜直径 D 为 600 μm ,基板材料为二氧化硅 (SiO_2),条形谐振器材料为非晶硅 (α -Si),且测得其效率分别为 15%、10% 和 21%。

近年来利用若干离散波长的共焦来实现消色差超透镜的研究同样有很大的进展。Arbabi 团队构建了非晶硅纳米柱的超透镜,通过空间多路复用的方法实现了对 915 nm 和 1 550 nm 两个离散波长的同时成像,其聚焦效率分别为 22 % 和 65 %,数值孔径为

0.46^[28]。该团队还设计了一种双折射椭圆纳米柱结构的超透镜,能独立控制两个互为正交偏振的不同波长入射光的相位,在 x 和 y 两个偏振下将波长为 780 nm 和 915 nm 的光聚焦到同一点,其聚焦效率在 65% 到 90% 以上,数值孔径可达 0.7^[29]。在可见光波段, Lin 等人通过整合分别对 480 nm、550 nm 和 620 nm 这三个波长有确定焦距响应的硅基超表面结构,得到了能将这三种离散光聚焦在同一焦点上的复合消色差超透镜^[26],如图 1(c) 所示。

除了以上利用介质谐振特性的方案外,Avayu 等人则设计了一种阶梯形堆叠的三层单元,每层分别含有 Al、Ag 和 Au 等不同金属材料构成的亚波长结构,分别对不同频段的局部表面等离子共振进行响应,并演示了在 450 nm、550 nm 和 650 nm 三个波段的共焦消色差成像,如图 1(d) 所示^[29]。

以上超透镜实现多波长消色差聚焦的方法多是将面向单一波长的若干种超透镜集合在一个超透镜整体中,虽然近似实现了连续波段内的消色差成像,但在原理上还是基于结构参数优化的思路,因此会限制了后续研究中对带宽的拓展。在荧光显微镜或确定波段的光通信应用等面向若干个离散工作波长的应用中,这些超透镜是能有效工作的。当工作波长的数目增加时,这类消色差超透镜的设计复杂度将会大幅上升。其本质原因是此类超构表面的结构单元所提供的参数空间难以兼具色散调控的频域相位补偿和聚焦所需的空域相位分布,当更多的工作波长加入时,难以避免出现意外的耦合和干扰。这些缺陷限制了此类超透镜进一步在宽带光源下的消色差成像应用,这要求人们发展出新的设计原理和方法来突破消色差超透镜的连续和大带宽应用上的瓶颈。

2 连续波长的宽带消色差超透镜

2.1 反射型的宽带消色差超透镜

超表面的初期研究多数为基于金属结构单元的结构设计^[30-32],由金属谐振器构成的超表面其相位突变更易于提供给反射波,故早期的研究多采用反射式的设计。由于金属固有电阻的存在,金属谐振器构成的超表面会产生较大的损耗,进而降低了转换效率^[19, 25]。因此,研究者在之后的研究中采用了介质材料,如硅,二氧化钛等来替换金属谐振器^[33-35],设计出

了新的超表面,不过早期对于反射式超表面的研究在一定程度上推动了反射型的宽带消色差超透镜的发展。

Capasso 团队^[36]设计了一种基于二氧化钛纳米柱的反射型连续消色差超透镜。二氧化钛(TiO_2)介质表现出较高的折射率和较宽的带隙^[37],具有在可见光波段实现消色差超透镜的潜力。该团队采用铝涂层的二氧化硅反射基底,以及具有正方形截面的纳米柱作为介质谐振器,改变方形截面的宽度可以调控其相位响应,通过调整几种不同纳米柱的排列,可提供不同的色散值并相互抵消,从而在目标波长下得到消除色差的聚焦,该团队已经展示了在 490~550 nm 波长范围内(带宽为 60 nm)可获得恒定的焦距的样品。

Arbabi 等人^[38]则在镀膜了二氧化硅涂层的铝反射层采用非晶硅纳米柱作为介质谐振器,设计实现了具有正、零和负色散效应的聚焦消色差透镜。该团队设计的零色散超透镜在以 1 520 nm 为中心波长,带宽为 140 nm 的波段范围内得到了近恒定的焦距。

南京大学祝世宁院士团队与台湾中央研究院应用科学中心蔡定平教授团队^[39]合作,在连续宽带消色差超表面中取得了新的进展。如公式(3)所示,该团队提出可将超表面透镜的相位拆分成两个部分,一个是与波长无关的基础相位,另一个是与波长有关的补偿相位。前者可以通过超表面单元的旋转角度,在圆偏振光场照明下实现;后者则可以由各种金属微纳结构组成的集成共振单元得到。使用这两种相对独立的相位产生机制,可以分别满足宽带消色差超构器件所需要的相位分布中的基本功能要求(基本相位)和不同波长之间的相位差异(色差效应)这两种相对独立的物理机制。

$$\varphi_{\text{Lens}}(R, \lambda) = \varphi(R, \lambda_{\text{max}}) + \Delta\varphi(R, \lambda) \quad (3)$$

不同于通常共振造成的突变型的相位补偿,该团队提出的集成共振是通过设计几个金属棒的排列和旋转方式,从而使它们耦合得到的谐振器具有伴随着频率的线性相位变化区域,如图 2(a)所示,当其满足与频率成正比的线性相位补偿时,两者的共同作用就可以有效地抵消掉色散。

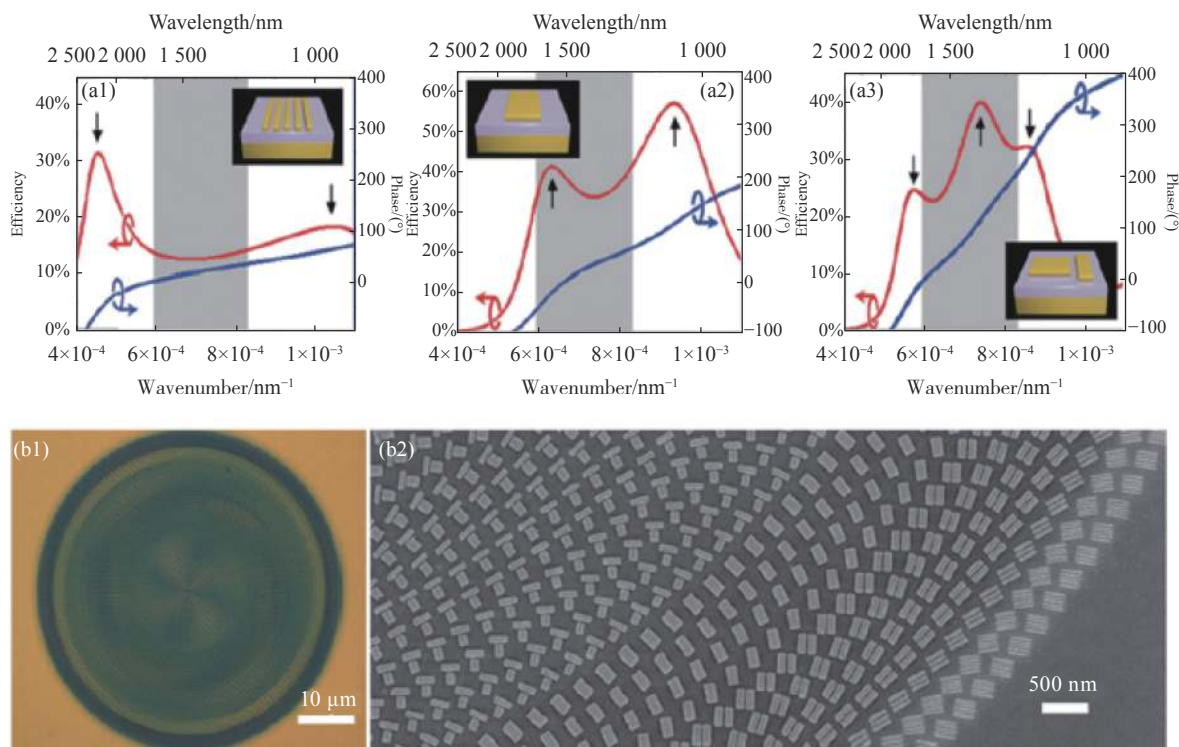


图 2 (a) 不同金属纳米棒结构的 RCP-to-LCP 偏振转换效率(红色曲线)和相位曲线(蓝色曲线);(b) 加工样品的光学显微照片(左)和局部放大电子显微照片(右)^[39]

Fig.2 (a) RCP-to-LCP polarization conversion efficiency (red curves) and phase profile(blue curves) with different nanorods; (b) Optical micrograph (left) and the partial enlarged electron micrograph (right) of the samples^[39]

该团队已经制备出了超透镜的样品实物, 图 2(b) 左图是一个数值孔径为 0.268 的反射型超透镜的实物图, 右图则是其在电子显微镜下的局部放大图, 从图中可以看到, 不同谐振器之间按照聚焦所需的几何相位进行排列和旋转, 而各个谐振器内部由不同的金属棒构成以实现集成共振效应。经过实验, 证明了该反射型消色差超透镜可对 1200 到 1680 的连续波长范围内的圆偏振光进行消色差聚焦, 其带宽可达中心波长的三分之一, 其焦距约为 100 μm , 这与其理论设计相符合。

但是, 由于金属结构的损耗较大, 造成上述的消色差超透镜的工作效率偏低, 其平均效率低于 10%, 最高效率仅有 12%, 这是反射型超透镜亟待解决的问题。

2.2 透射型的宽带消色差超透镜

在 2.1 节中, 祝世宁和蔡定平的联合团队在反射式消色差超透镜的研究中提出了集成共振方法, 基于此方法他们在 2018 年报道了一种基于氮化镓 (GaN) 介质的透射型宽带消色差超透镜, 如 3(a) 所示^[40]。氮化镓是一种新型的半导体材料, 其在可见光波段下具有良好的光学性能。为了引入集成共振方法, 该团队设计了具有六方晶格周期的氮化镓介质柱和介质槽两种结构, 如图 3(b) 中小图所示, 作为集成共振谐振器的构成单元, 放置在氧化铝 (Al_2O_3) 基底上。

这些集成共振谐振器通过精细设计其排列位置和旋转角度以满足聚焦传播所需的几何相位分布。通过集成共振谐振器内部的近场耦合, 可以得到不同的相位补偿, 从而满足消除色差所需的相位要求。对于单个共振谐振器, 改变介质柱或介质槽的长宽比, 能获得从 $660^\circ \sim 1140^\circ$ 不等的相位补偿。另一个提高相位补偿的方法是增大介质柱或介质槽的高度。由于介质槽具有更大的相位补偿, 因此其主要分布在透镜的中央区域, 对相位的分布起主导作用。同时, 由于谐振光场高度集中在介质结构内部, 因此集成共振谐振器之间的相互作用可以忽略, 这降低了意外耦合的发生。图 3(b), 3(c) 中展示了单个集成共振谐振器的相位补偿、转换效率和共振模式的磁场分布。

该团队已经制备出在 400~660 nm 的可见光波段

工作的连续宽带消色差超透镜, 其设计焦距为 235 μm , 经实验证实了该样品可得到较好的宽带消色差聚焦效果, 其转换效率平均为 30%~40%, 大大高于反射型的消色差超透镜。同时该透镜的焦点半高全宽已经接近于衍射极限, 即 $\frac{\lambda}{2NA}$, NA 为数值孔径, 这表明该透镜具有较好的成像质量。

中山大学的董建文团队^[41]设计了一种基于氮化硅介质的宽带消色差超透镜, 可通过白光的消色差集成成像重建三维光学图像, 实现了可见光成像。研究人员采用自上而下的纳米制造工艺在具有氮化硅涂层二氧化硅基底上蚀刻出空心的六边形氮化硅结构。该团队提出了一种零有效色散的超透镜设计方法, 入射光从超透镜出射后的相位分布方程如下:

$$\phi(r, \omega) = \frac{\omega}{c} \left(-\sqrt{r^2 + f^2} + f + \alpha \right) + \beta \quad (4)$$

通过引入 α (决定了透镜中心的几何参考相位) 和 β (决定零频率处的光谱参考相位) 来改写公式 (4) 得到:

$$\phi(r, \omega) = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}}(r, \omega) \cdot d + \beta \quad (5)$$

其中,

$$n_{\text{eff}}(r, \omega) = \frac{1}{d} \left(-\sqrt{r^2 + f^2} + f + \alpha \right) \quad (6)$$

对于无色散超透镜 ($d\phi/d\omega = 0$), 可以得到下式:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} n_{\text{eff}}(r, \omega) = 0, \quad \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (7)$$

该团队得出, 如公式 (7) 所示, 为了实现宽带消色差超透镜, 必须在光谱区域内实现零有效色散, 并尽可能扩大空间区域内的非均匀有效折射率 n_{eff} 的分布范围。

在宽谱范围内实现消色差, 要求超透镜的亚波长单元有足够多的可选参数, 从而使色散曲线从离散点逼近连续曲线。如图 4 所示, 该团队建立了一个不同参数的氮化硅纳米柱库, 从中选取出了十种氮化硅纳米柱来构成消色差超透镜。该纳米柱 (平均透过率测得为 47%) 都经过精算设计使得有效材料色散为零, 同时优先选择具有 90° 空间旋转对称性的纳米柱以处理非偏振可见光。制备得到的超透镜样品仅由厚度为 400 nm 的单层氮化硅涂层组成, 其聚焦性能同样

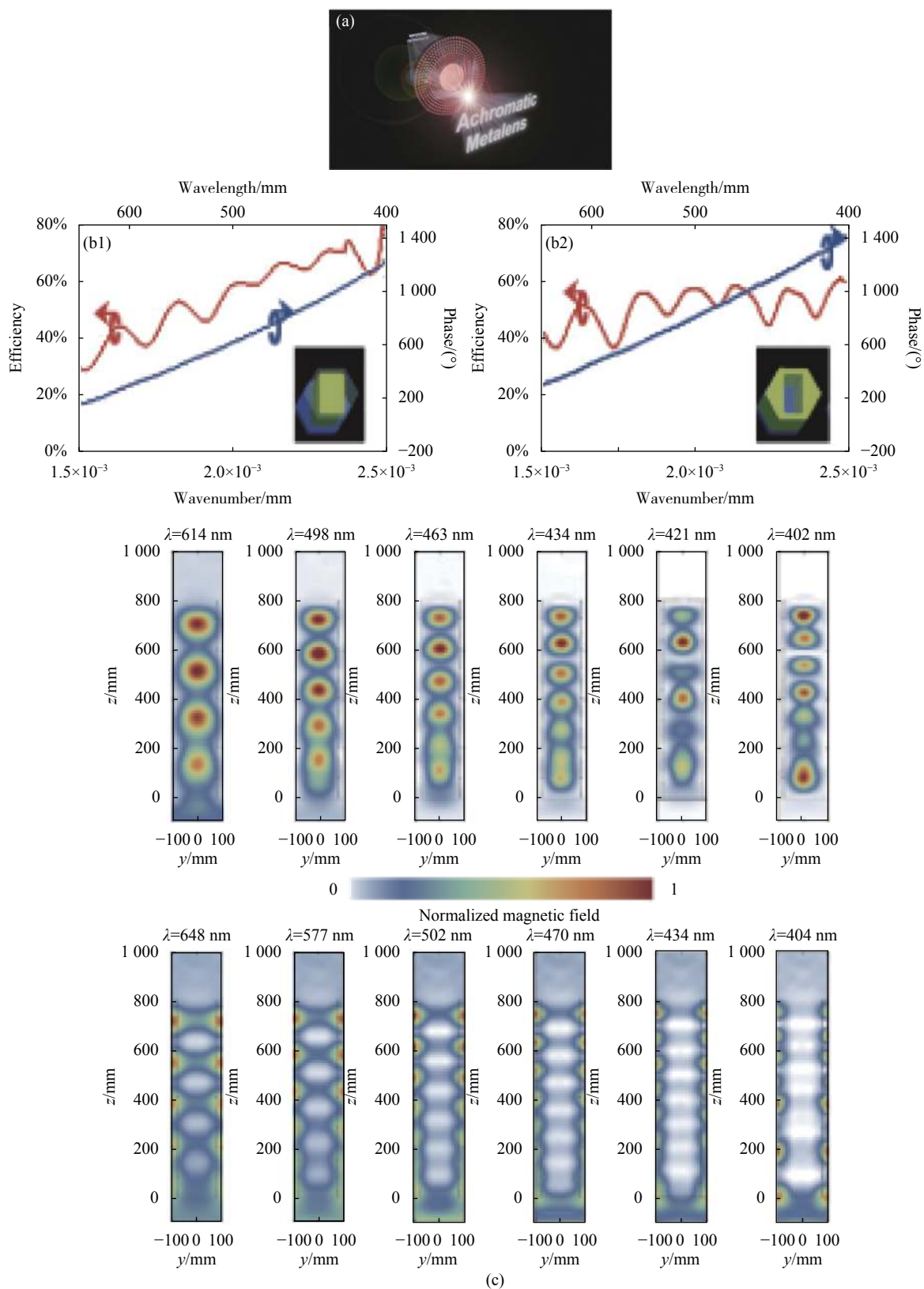


图 3 (a) 可见光宽带消色差超构透镜示意图; (b) 介质柱结构和介质槽结构对应的相位曲线 (蓝色曲线) 和工作效率 (红色曲线); (c) 超透镜单元中不同入射波长的归一化磁能^[40]

Fig.3 (a) Schematic diagram of the broadband achromatic metalens in the visible band; (b) Phase profile (blue curve) and efficiency (red curve) corresponding to the solid and inverse nanostructures; (c) Normalized magnetic energy at different incident wavelengths in the metalens unit elements^[40]

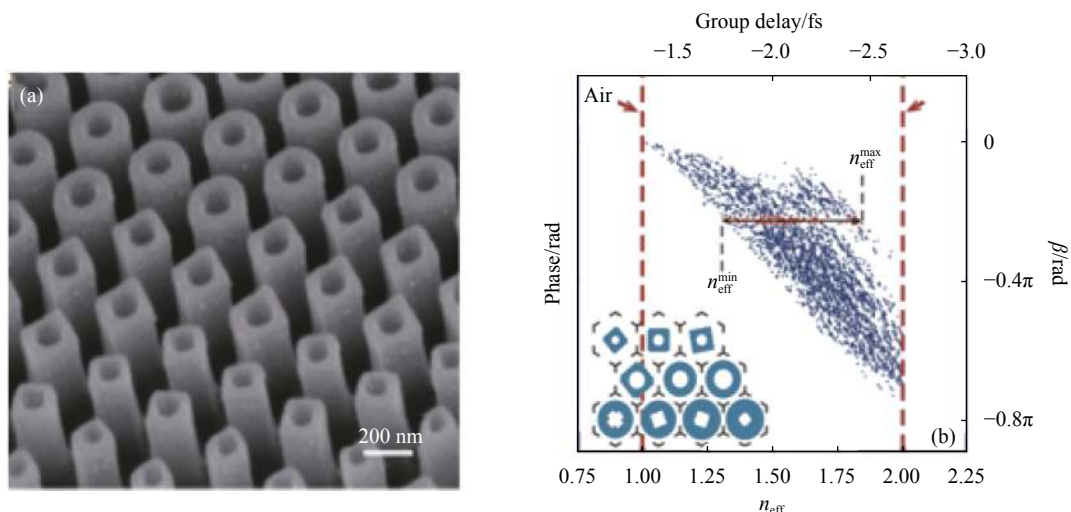


图 4 (a) 超透镜实物的局部扫描电镜侧视图; (b) 各种氮化硅亚波长的有效折射率- β 分布图, 以及选出的十种纳米柱^[41]

Fig.4 (a) Side-view SEM image of a portion of the fabricated metalens; (b) $n_{\text{eff}}-\beta$ distribution diagrams of various sub-wavelengths silicon nitride and 10 selected nanopillars^[41]

接近衍射极限。

类似的消色差方案在 2018 年也曾由 Nanfang Yu^[42] 等人提出过, 他们建立了一个亚波长硅纳米柱的参数库, 选取了处于消色差曲线的多种硅纳米硅, 设计出了聚焦效率高达 50%, 并在 1200~1650 nm 的波段内具有近恒定焦距的消色差超透镜。

3 基于消色差超透镜阵列的成像

单个的消色差超透镜有着不能同时实现大通光口径和大数值孔径的局限。利用微透镜阵列的方法, 南京大学团队基于 2.2 节中提到的消色差超透镜, 将其组成阵列, 极大地提高了通光口径和数值孔径, 基于超透镜阵列的宽带连续消色差光场成像更引入了新的功能^[43]。

该团队使用了 60×60 个直径为 $21.65 \mu\text{m}$ 的超透镜组成阵列, 在可见光范围内 (400~660 nm) 保持相同的焦距, 实现了在可见光区域内的宽带消色差特性。其中, 在 420 nm 波长下, 最高效率可高达 $74.8\% \pm 2.6\%$, 而在整个工作带宽内, 平均效率约为 $39.1\% \pm 1.8\%$ 。

该团队的超透镜阵列的成像示意图如图 5(a) 所示, 先由物镜用于收集消色差超透镜阵列上的圆偏振光, 并在消色差超透镜阵列前面形成中间图像; 进一步地, 在消色差超透镜阵列形成各种子图像, 这些子图像具有测感了平面处的每个子透镜的三维

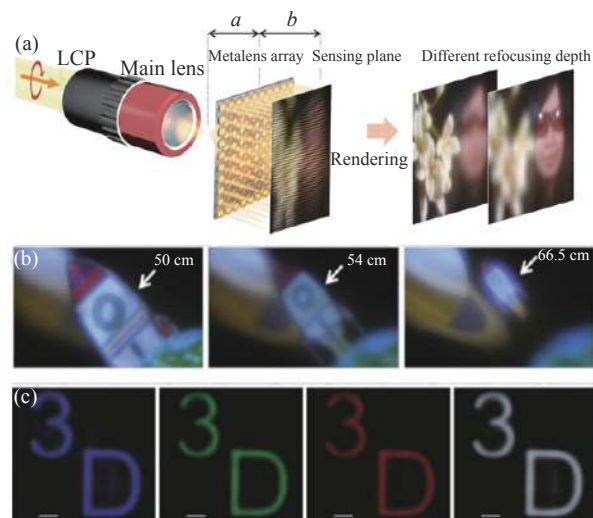


图 5 (a) 超透镜阵列光场成像和渲染图像的示意图; (b) 分别对地球 (50 cm), 火箭 (54 cm) 和土星 (66.5 cm) 三个物体成像^[43]; (c) 以不同波长同时对不同深度的“3”和“D”成像^[41]

Fig.5 (a) Schematic diagram of the light field imaging and rendering image of the achromatic metalens array; (b) Image the earth (50 cm), rocket (54 cm) and saturn (66.5 cm) respectively^[43]; (c) Simultaneously at different wavelengths imaging of "3" and "D" with different depths at different wavelengths simultaneously^[41]

传播信息的能力。通过将每个子图像中的不同部分信息取出, 并结合数字图像处理, 可以得到具有不同聚焦深度的消色差的清晰图像。

图 5(b) 显示了该阵列的成像效果, 图中场景由三个不同深度的物体 (地球, 火箭和土星) 组成。使用超表面透镜阵列可以较好地得到不同深度物体的清晰成像效果。深度信息可以从相邻子图像之间的差异中得出。

董建文团队利用其氮化硅超透镜作为子系统, 设计了一个 60×60 的矩形超透镜阵列, 可通过对白光谱消色差集成成像来重建三维光学图像^[41]。如图 5(c) 所示, 该超透镜阵列可以在蓝色, 绿色和红色光甚至白色宽谱光下很好地重建图像, 表现了在整个可见光区域的宽带消色差性能。进一步地, 当改变不同的图像深度时, 可以清楚地看到清晰的对焦/模糊效果, 这些成像结果表现了该阵列对不同深度物体的聚焦效果。

以上结果表明, 使用消色差超表面透镜阵列的光场成像具有评估多个彩色物体的深度的能力。理论上甚至可以得到具有极大景深的消色差光场图像。这种设计解决了传统光场相机无法实现的宽带连续消色差问题。基于可见光连续消色差超透镜阵列的光场相机在机器人视觉, 自动驾驶车辆以及虚拟和增强现实等领域都具有重要应用价值。

4 结 论

文中从超表面透镜的工作波段类型以及光场调控机理等方面, 总结了近些年超表面透镜在消色差聚焦成像所取得的研究成果, 分别介绍了离散和连续宽带的消色差超透镜以及其消色差成像效果和消色差透镜阵列在光场成像的应用。宽带消色差超表面透镜已经成为研究者们广泛关注的热点, 近期在该领域仍不断地有新成果报道, 这表明了超表面透镜的巨大潜力, 而宽带消色差超表面透镜是对于超表面透镜在应用研究上进行补充的重要一环。期待未来能有更多新原理和优化设计方案提出, 从而研制出性能更优异、成本更低、并适用于大规模工业制造的宽带消色差超表面透镜。这预示着超表面透镜将取代传统透镜, 凭借其轻薄和高集成的优异性能, 应用于无人机视觉, 车辆传感和虚拟现实增强等领域, 进入未来生活的各个方面。

参考文献:

- [1] Smith D R, Pendry J, Wiltshire M C K. Metamaterials and Negative Refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [2] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [3] Chen H, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [4] Lee S H. *Diffraction and Miniaturized Optics*[M]. San Diego: Society of Photo Optical, 1994.
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [6] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [7] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [8] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [9] Leonhardt U. Optical conformal mapping [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [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] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(21): 213902.
- [12] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials [J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 10-35.
- [13] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [14] Capasso F, Khorasaninejad M, Chen W T, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [15] Aieta F, Genevet P, Yu N, et al. Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1702.
- [16] Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, et al. Broadband light

- bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.
- [17] Sun S, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [18] Pors A, Nielsen M G, René Lyng Eriksen, et al. broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [19] Yu N, Capasso F. Flat optics: Controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2013, 19: 4700423.
- [20] Lin J, Genevet P, Kats M A, et al. Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams. [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4269-4274.
- [21] Chen W, Yang K, Wang C, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [22] Wen D, Yue F, Li G, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241.
- [23] Capasso F, Aieta F, Khorasaninejad M, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139.
- [24] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [25] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P, et al. Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5358-5362.
- [26] Lin D, Holsteen A L, Maguid E, et al. Photonic multitasking interleaved Si nanoantenna phased array [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7671-7676.
- [27] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. High efficiency double-wavelength dielectric metasurface lenses with dichroic birefringent meta-atoms [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18468.
- [28] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Multiwavelength metasurfaces through spatial multiplexing [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32803.
- [29] Avayu O, Almeida E, Prior Y, et al. Composite functional metasurfaces for multispectral achromatic optics [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14992.
- [30] Larouche S, Tsai Y J, Tyler T, et al. Infrared metamaterial phase holograms [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 450-454.
- [31] Huang L, Chen X, Holger M, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2018, 4: 2808.
- [32] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultra-thin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932.
- [33] Lin D, Fan P, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements [J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [34] Moitra P, Slovick B A, Li W, et al. Large-scale all-dielectric metamaterial perfect reflectors [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(6): 692-698.
- [35] Li J, Shah C M, Withayachumnankul W, et al. Mechanically tunable terahertz metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12): 121101.
- [36] Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(3): 1819-1824.
- [37] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Physical Review B (Solid State)*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [38] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(6): 625-632.
- [39] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.
- [40] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [41] Fan Z, Qiu H, Zhang H, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(4): 600-609.
- [42] Shrestha S, Adam C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 85.
- [43] Lin R, Su V C, Wang S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.



第一作者简介：莫昊燃 (1996-), 男, 硕士生, 主要从事于微纳光子学和超表面器件及其光学成像方面的研究。2015 年 6 月毕业于华南师范大学信息光电子科技学院光电信息工程专业, 2019 年 9 月起至今就读于华南理工大学物理与光电学院光学专业, 已于 2020 年 12 月通过物理与光电学院的硕博连读申请。曾获 2019 年和 2020 年华南理工大学硕士生学业奖学金。



导师简介：李志远 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光子学、非线性光学、激光技术和量子物理中的理论、实验和应用方面的研究。1994 年毕业于中国科技大学物理系, 1999 年中国科学院物理研究所理学博士。2011 年获中国光学学会“王大珩光学奖”。2014~2016 年在中国科学院物理研究所任研究员, L01 组课题组长, 中国科技大学物理系兼职教授。2016 年起任华南理工大学物理与光电学院教授、博士生导师, 人工光、声微结构物理实验室主任。任 EPL Co-Editor, 《光学学报》、《科学通报》和 Advanced Optical Materials 编委。2014 年入选汤森路透全球高被引科学家, 2016 年入选爱思维尔中国高被引科学家。