

# 激光与光电子学进展

## 二维超构表面:超透镜应用及研究进展

唐剑雄, 龚岩栋\*, 庞恺

北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192

**摘要** 超透镜是一种近年来新兴的基于超材料的先进平面光学装置,可以高自由度设计入射光的振幅、相位和偏振度以满足应用要求。超透镜可以通过不同的结构设计实现多种功能,例如达到衍射极限的聚焦、像差消除等。本文总结了超透镜的发展过程、基本原理和应用;基于激发原理将超透镜归纳为等离激元型和介质型,基于功能性将其归纳为变焦距型、像差消除型,以及宽带无色散型;分类综述了超透镜的最新进展和研究趋势;总结了相关研究的参数数据、优缺点、商业化进程并展望了未来。本文的主要目的是让读者全面了解超透镜,并为设计高性能的超透镜提供潜在的灵感。

**关键词** 材料;超材料;超表面;超透镜;多功能集成

中图分类号 0438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222602

## Two-Dimensional Metasurface: Application and Research Progress of Metalenses

Tang Jianxiong, Gong Yandong\*, Pang Kai

*School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China*

**Abstract** Metalenses are new advanced planar optical devices based on the metamaterials. They can control the amplitude, phase, and polarization of incident lights with high free degrees to satisfy application requirements. Furthermore, they can perform various functions through different structural designs, such as diffraction-limited focusing and aberration correction. In this paper, we summarize the basic principles, applications, and progress of metalenses. Based on the excitation principle, we classify metalenses into plasmonic and dielectric metalenses. Based on the function, we classify them into tunable, aberration cancellation, and broadband achromatic metalenses. We also summarize the parameter data, advantages and disadvantages, and commercialization process of relevant research. Moreover, we discuss the problems and challenges faced by metalenses and recommend future research directions. The main purpose of this paper is to clarify metalenses and provide potential inspiration for designing high-performance metalenses.

**Key words** materials; metamaterials; metasurface; metalens; multifunction integration

### 1 引 言

透镜是根据光的折射规律制成的,第一代透镜是由透明物质制成的一种光学元件。物镜、目镜及聚光镜等部件均由单个和多个透镜组成,可广泛应用于安防、数码相机、激光等各个领域,随着市场的不断发展,透镜技术的应用也越来越广泛。光学透镜由厚度不同的光学材料制成,利用材料中光传输的相位积累不同改变透镜的透射光波前,而这个过程是连续渐进的,要想改变波前通常需要通过改变介质的厚度来实现,在

此原理下入射波的波长数量级往往都会远小于透镜的厚度,这就导致了透镜在现代应用中遇到了体积大、质量大、数值孔径小、畸变严重、存在像差等问题。

第二代透镜菲涅耳衍射透镜是通过衍射而不是反射或者折射的方式来实现光束的聚焦,这是球面透镜到平面透镜的第一次换代,菲涅耳透镜在保留凸透镜光学表面曲率的同时,将中间材料去除 $2\pi$ 相位的整数倍,实现从球面透镜向平面透镜的转变,具体衍化原理如图 1 所示。

一般而言,菲涅耳透镜其中一面为光滑表面,另一

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-10-28; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(62075013)、北京信息科技大学重点培育项目(2121YJPY209)

通信作者: \*eydong@bistu.edu.cn

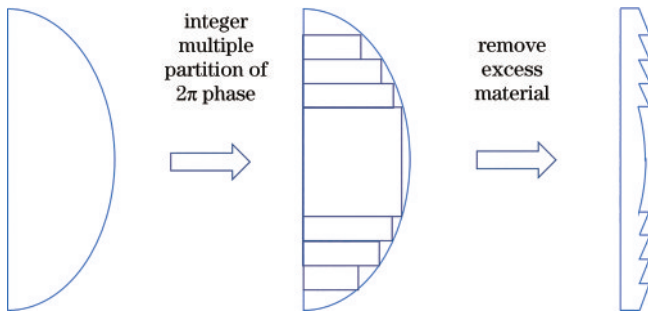


图1 球面透镜转变为平面透镜的原理图  
Fig. 1 Principle diagram of changing spherical lens into plane lens

面是由一系列锯齿形棱镜所形成的不连续折射表面,其工作原理为通过锯齿形棱镜实现指定光谱范围的光波导,具体光路示意图如图2所示。菲涅耳透镜对比传统透镜具有面积大、体积小、质量轻、价格较低等优点。但由于衍射极限的存在,倏逝波呈指数级衰减导致小于半个波长的成像细节丢失,无法得到完美成像,这一现象决定了传统光学成像系统的分辨率极限。直至2000年, Pendry<sup>[1]</sup>提出负折射率超材料可以使倏逝波在其中不再呈指数级衰减,反而被增强使得完美成像成为可能。

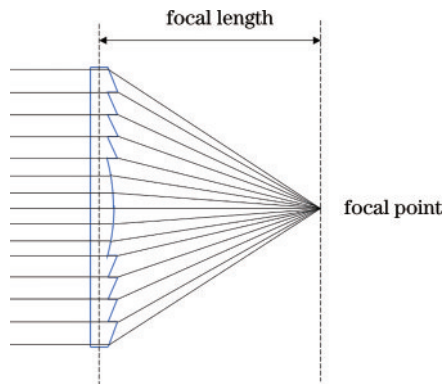


图2 菲涅耳透镜光路图  
Fig. 2 Light path diagram of Fresnel lens

超材料是由特定几何结构的介电单元周期性排列组成,其结构单元能够与电磁场中的电场或者磁场分量发生耦合作用,产生与自然材料不同的电磁特性。在过去的二十余年中,超材料吸引了人们的极大关注,并由此产生了许多突破传统的光电现象。然而,超材料共振响应机制散射强、效率低,以及三维结构加工困难等缺点,阻碍了其实际应用。二维超构表面是超材料的一个新分支,具有亚波长厚度且仅由单层或几层平面结构叠加而成,由于其可以与传统半导体加工工艺相兼容,因此加工难度大幅降低。超表面可以在其结构上空间内各个点产生不同的光学响应(振幅、相位和偏振等),并将光学波前面塑造成任意的形状,这些特点都有助于功能材料的集成和非线性效应的增强。

超透镜是超表面的一个分支应用,也是透镜由球

面透镜到平面透镜的第二次换代,大幅度缩减了光学透镜冗余的体积,推动透镜组的集成化、小型化发展。近些年,许多研究使得超透镜的聚焦、透射等效率有很大提高,可以达到甚至超过传统光学透镜,同时也产生了各种不同功能的特种超透镜。超透镜由于其超薄厚度、集成性能以及全域光场控制的优势使其在聚焦成像领域具有极强的发展潜力,在推动小型化平面光学元件、取代传统光学元件,甚至是促进微纳光学与纳米光子学的发展等方面具有重要意义。

本节说明了透镜在成像系统中的重要地位,同时介绍了从第一代传统透镜到第二代菲涅耳衍射透镜再到第三代超透镜的技术发展原理。全文结构如图3所示,第2节说明了超透镜的基本原理包括广义斯涅耳定理、超透镜的相位分布原理等。第3节根据材料将超透镜分为等离激元型和介质型两类。第4节根据超透镜的功能分为变焦距型、像差消除型,以及宽带无色散型,分别讲解了超透镜的设计原理、发展过程和最新研究进展。第5节对超透镜的研究方向、商业化进程、应用领域、面临的挑战进行了总结并进行了展望。

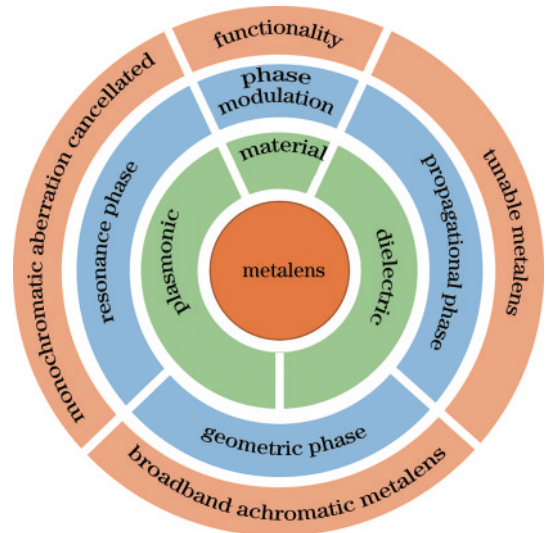


图3 全文结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure of this review

## 2 超透镜基本原理

### 2.1 广义斯涅耳定律

超透镜能够以超薄平面实现光波的任意波前整形是基于2011年哈佛大学 Capasso 团队<sup>[2]</sup>发表在 *Science* 上的封面文章内提出的广义斯涅耳定律,该定律基于费马原理推导得到,这打破了传统光学组件的限制,传统光学组件依赖于沿光路的渐变相位积累来改变传播光的波前,而基于广义斯涅耳定律的设计策略可以实现在极小的尺度内调整光学波前的相位和振幅,这对变换光学和积分光学具有重要意义,推动了光学透镜的轻薄化、集成化发展,对于二维超构表面的设计起到了奠基作用。

在透射型超表面中,折射光线遵循广义斯涅耳折射定理,光路图如图 4 所示。

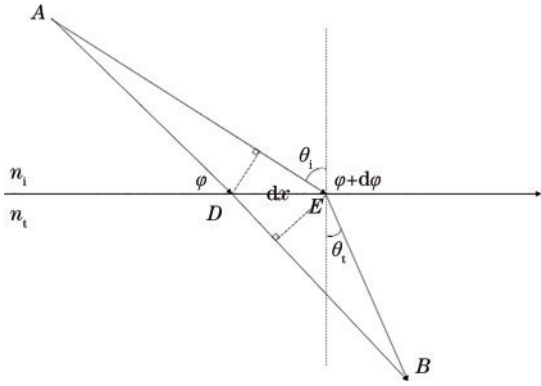


图 4 广义斯涅耳折射光路图

Fig. 4 Optical path diagram of generalized Snell refraction

光线以  $\theta_i$  入射至  $x$  轴形成的超表面界面上,  $\theta_t$  为折射光线和法线的夹角, 由于光线  $ADB$  和  $AEB$  具有相同的起止点, 则根据费马原理可知, 从  $A$  点到  $B$  点的各个光线之间的光程应该是相等的, 相位也是相同的, 则以相位为等量可得:

$$k_0 n_t \sin \theta_t dx + \varphi + d\varphi = k_0 n_i \sin \theta_i dx + \varphi, \quad (1)$$

式中:  $k_0$  为波数或波矢量;  $n_i$  和  $n_t$  分别为入射和折射介质的折射率;  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别为入射角和折射角;  $\varphi$  是  $D$  点的相位调制角。

将  $k_0 = 2\pi/\lambda$  代入式(1), 可以得到广义的斯涅耳折射定律:

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0 d\varphi}{2\pi dx}. \quad (2)$$

而在反射型超表面界面, 反射光线遵循广义斯涅耳反射定理, 光路图如图 5 所示。

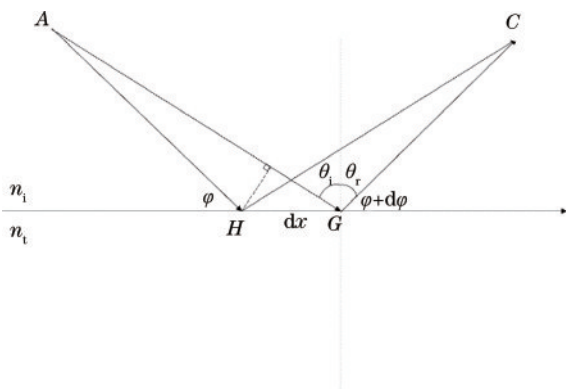


图 5 广义斯涅耳反射光路图

Fig. 5 Optical path diagram of generalized Snell reflection

与广义斯涅耳折射定律类似, 考虑一个光线从  $A$  点以  $\theta_i$  角入射到超表面上, 以  $\theta_r$  为反射角出射到  $C$  点, 则根据费马原理可知, 从  $A$  点到  $C$  点的各个光线之间的光程应该是相近的, 相位也是相同的, 则以相位为等量可得到广义斯涅耳反射定律:

$$k_0 n_t \sin \theta_r dx + \varphi + d\varphi = k_0 n_i \sin \theta_i dx + \varphi, \quad (3)$$

式中:  $k_0$  为波数或波矢量;  $n_i$  为介质的折射率;  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别为入射角和反射角;  $\varphi$  是  $H$  点的相位调制角。

同理, 将  $k_0 = 2\pi/\lambda$  代入式(3)可得:

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0 d\varphi}{2\pi n_i dx}. \quad (4)$$

## 2.2 超透镜的相位分布

传统的透镜想要在某一位置处实现光束会聚, 需要满足一个重要条件, 即透镜各个点的出射光线到焦点的相位相等或者是相差  $2\pi$  的整数倍。对光路和透镜进行设计时, 透镜上的点到焦点处所经历的光程必须一致, 也即有同样的相位补偿。光程通常用介质的折射率和几何路程的乘积来计算。相位差为

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} n(L_2 - L_1), \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  表示波长;  $n$  表示传播介质的折射率;  $L_2 - L_1$  表示不同的入射光束所经历的光程差值。如果要在透射平面上的同一点形成聚焦, 必须保证平面上出射的每一点到达焦点的光程差相等。

超表面透镜与传统透镜结构对相位的调控原理不同, 它通过亚波长微纳单元的突变相移对光波进行控制, 继而使各光束在某一设定好的位置发生会聚, 不再依赖于各个光路连续的光程累加。由此, 可以根据实际应用来设计超透镜的相位分布实现其功能(聚焦、焦点调谐、像差消除、宽带无色散等), 以最基本的聚焦透镜为例, 以超透镜中心为坐标原点的二维相位分布应符合:

$$\varphi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left( f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2} \right) + \Delta\varphi_{na}, \quad (6)$$

式中:  $x, y$  是任意点到超透镜表面中心之间的距离(假设超表面透镜的中心位于  $z = 0$  的平面内);  $\lambda$  和  $f$  分别是自由空间中的入射波长和设定的焦距;  $\Delta\varphi_{na}$  是设计范围内的相位校正值。当超透镜满足上述公式时, 即可实现聚焦功能。

## 3 基于材料的超透镜分类及研究进展

### 3.1 等离子激元型超透镜

#### 3.1.1 传播相位调制

传播相位型等离子激元超透镜的电磁模式通过表面等离子体激元(SPP)的形式传输<sup>[3]</sup>, 其发生在金属层的表面, 当入射光的振动频率与金属自由电子相近时会产生集体共振, 这将在结构表面激发局域微电流, 如图 6(a) 所示, 这种电磁模式仅可沿结构表面传播, 图 6(b) 展示了 SPP 在金属薄膜中狭缝的传播方式。基于此原理已有几个等离子激元超透镜的研究报道, 如 2004 年 Sun 等<sup>[4]</sup> 使用有限差分域模拟(FDTD)在理论上证明了通过在金属薄膜上刻蚀纳米狭缝阵列实现

光束聚焦或准直功能,狭缝的深度用以控制相位延迟。2005年 Shi 等<sup>[5]</sup>提出恒定狭缝深度,通过改变狭缝宽度来实现相位控制从而制成聚焦超透镜结构,如图 6(c)所示。2009年 Verslegers 等<sup>[6]</sup>通过在金膜上铣削纳米

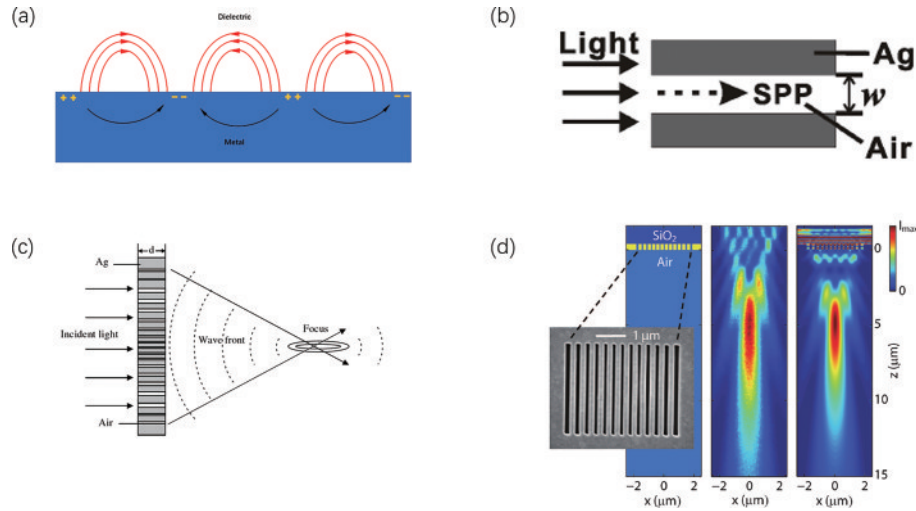


图 6 等离激元型传播相位超透镜。(a) SPP 的形成原理;(b) SPP 在空气狭缝中的传播方式<sup>[4]</sup>;(c) 在金属薄膜上形成不同宽度的纳米狭缝阵列示意图<sup>[5]</sup>;(d) 基于纳米狭缝阵列的超透镜结构及模拟结果<sup>[6]</sup>

Fig. 6 Plasmonic metalens based on propagation phase. (a) Schematic of SPP formation;(b) propagation mode of SPP in air slit<sup>[4]</sup>;(c) schematic of nanoslit arrays with different widths formed on metal films<sup>[5]</sup>;(d) metalens structure and simulation results based on nanoscale slit array<sup>[6]</sup>

### 3.1.2 共振相位调制

当光线入射到金属纳米天线的表面时,当入射光子频率与金属内自由电子的振动频率相匹配时,光波可以被自由电子的集体振荡散射,这种现象称为局域表面等离子体共振(LSPR)<sup>[7]</sup>。基于共振相位调制方法,2011年 Cappaso 团队 Yu 等<sup>[2]</sup>提出了广义斯涅耳定律,证明了相位梯度超表面可以任意地操纵光波前,并以此登上了当期 *Science* 的封面,该团队设计了 8 个以  $\pi/4$  为间隔不断递增可完全覆盖  $2\pi$  的相位调制 V 型天线,其结构示意图及仿真结果如图 7(a)所示。2012年该团队的 Aieta 等<sup>[9]</sup>将光学相位不连续性的概念应用于无像差的超透镜设计中,该透镜由 V 型金纳米天线构成,其天线结构及透镜整体结构如图 7(b)、7(c)所示,通过在波截面上施加双曲面相位分布,实现了无球面像差的高数值孔径聚焦,但其聚焦效率较差。2012年复旦大学的周磊等<sup>[10]</sup>提出一种 H 型天线和蘑菇结构使得表面波和传播波可以互相转化,其转换效率可用于制造表面等离子体耦合器。2013年 Ni 等<sup>[11]</sup>根据 Babinet 原理反向设计了超透镜结构单元,即使用一组类似形状的纳米空洞来代替金属纳米天线,这些空洞在金属薄膜中铣削而成,其结构单元与仿真结果如图 7(d)所示,相比于传统天线结构信噪比提高了 20 倍,但该透镜的色散较为严重,当入射波长从 676 nm 切换到 476 nm 时,焦距将从 7 mm 偏移至 10 mm。由于 SPP 产生的微电流无法避免会产生欧姆损耗,这导致大部分能量被超透镜吸收的效率很低,为解决这一

狭缝阵列实现入射光聚焦,其结构及仿真结果如图 6(d)所示,但由于狭缝结构不能提供  $0\sim 2\pi$  的相位变化,所以不能实现全波控制,同时还有制造工艺复杂的问题。

问题,2013年 Pors 等<sup>[12]</sup>提出了基于金属-绝缘体-金属结构(MIM)的反射式超透镜单元结构,如图 7(e)所示,这种结构可以在金属层和金属天线之间的绝缘体层产生强磁场,增强近场耦合效应,同时底层金属层对透射光进行二次共振可以有效抑制透射,该团队研究的超透镜聚焦效率达到了 27%。2018年 Zhang 等<sup>[13]</sup>在  $4.6\ \mu\text{m}$  的近红外波段使用 MIM 结构,在  $45^\circ$  入射角的情况下成功实现了聚焦效率高达 80% 的反射式超透镜。

### 3.1.3 几何相位调制

几何相位是一种较容易实现  $2\pi$  相位完全覆盖的相位调制方法,当圆偏振光经过具有空间变化快轴的各向异性单元可以输出两种分量:第一种分量为旋向与入射光相同的圆偏振光且没有相位延迟;第二种分量为旋向与入射光相反的圆偏振光同时附加了两倍各向异性单元旋转角大小的几何相位延迟。通过对各向异性单元旋转  $180^\circ$  即可实现  $2\pi$  相位覆盖,几何相位调制具有独立于单元的尺寸和共振等特性,所以几何相位调制可以与其他相位调制方法相结合共同实现  $2\pi$  的相位调制。2012年 Kang 等<sup>[14]</sup>使用 U 型孔径如图 8(a)所示作为结构单元从理论上证明了利用几何相位实现相位调控的可行性,同年 Chen 等<sup>[15]</sup>利用金矩形天线单元结构如图 8(b)所示制成了几何相位调制的聚焦超透镜。2015年 Pu 等<sup>[16]</sup>利用类似于自然悬链线结构阵列以产生携带轨道角动量(OAM)的光束,其整体结构与悬链线结构如图 8(c)、8(d)所示,由于其几何相位产生的本质是由于自旋轨道转换的结果,所以该结

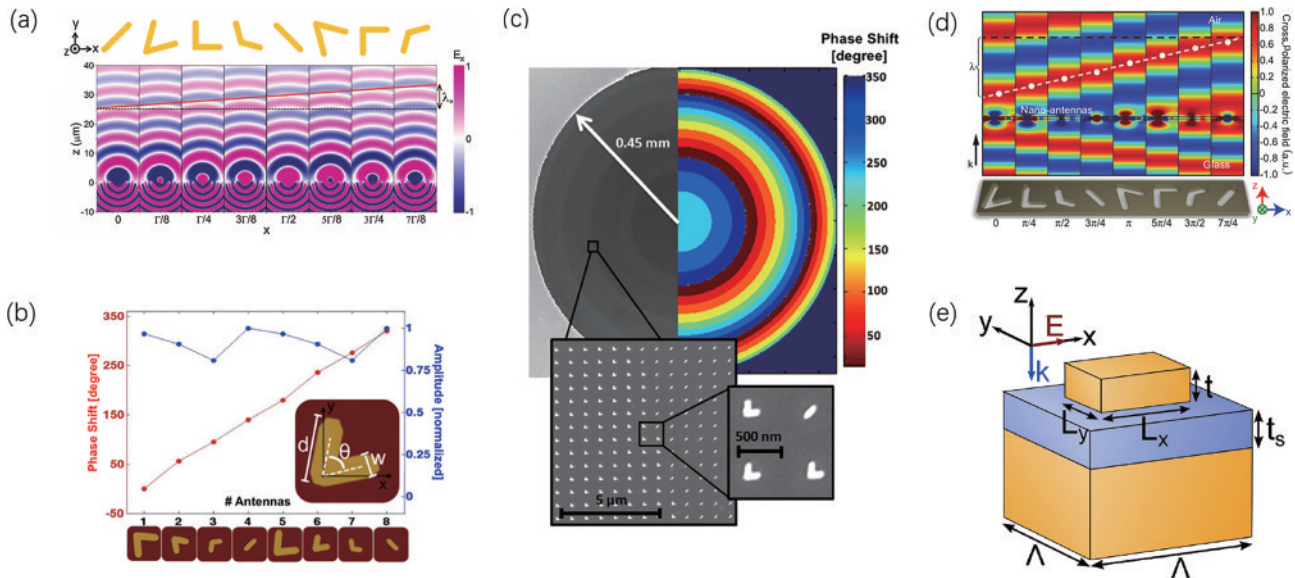


图 7 等离子激元型共振相位超透镜。(a) 组成阵列的各个天线散射电场的 FDTD 模拟<sup>[2]</sup>；(b) 超透镜中使用的八种天线的相移和交叉极化散射振幅的 FDTD 模拟仿真结果<sup>[9]</sup>；(c) 超透镜的扫描电镜 (SEM) 图<sup>[9]</sup>；(d) Babinet 反纳米天线的原理图设计和全波模拟结果<sup>[11]</sup>；(e) MIM 单元结构示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 7 Plasmonic metalens based on resonance phase. (a) Finite-difference time-domain (FDTD) simulations of scattered electric field for individual antennas composing array<sup>[2]</sup>; (b) FDTD simulation results of phase shifts and scattering amplitudes in cross-polarization for eight elements used in metalens<sup>[9]</sup>; (c) scanning electron microscope (SEM) image of metalens<sup>[9]</sup>; (d) schematic designs and results of full-wave simulations of Babinet-inverted nano-antennas<sup>[11]</sup>; (e) schematic of MIM unit structure<sup>[12]</sup>

构与波长相关性很低,可以实现宽光谱无色差聚焦。

表 1 汇总了等离子激元型超透镜的参数,由表 1 数据可知,等离子激元型超透镜由于欧姆损耗,导致其聚焦效率通常情况下低于 10%,使用 MIM 结构可以将聚焦效率提高至 30% 左右,在中红外波段甚至能提高到

80%。但由于介质型超透镜在聚焦效率上比等离子激元型超透镜有无法弥补的优势,所以近年来等离子激元型超透镜研究的重点在于功能性和集成性,例如,如何充分利用其高数值孔径和大视场角的特性,以及偏振选择、波长选择、宽带性等功能的集成上。

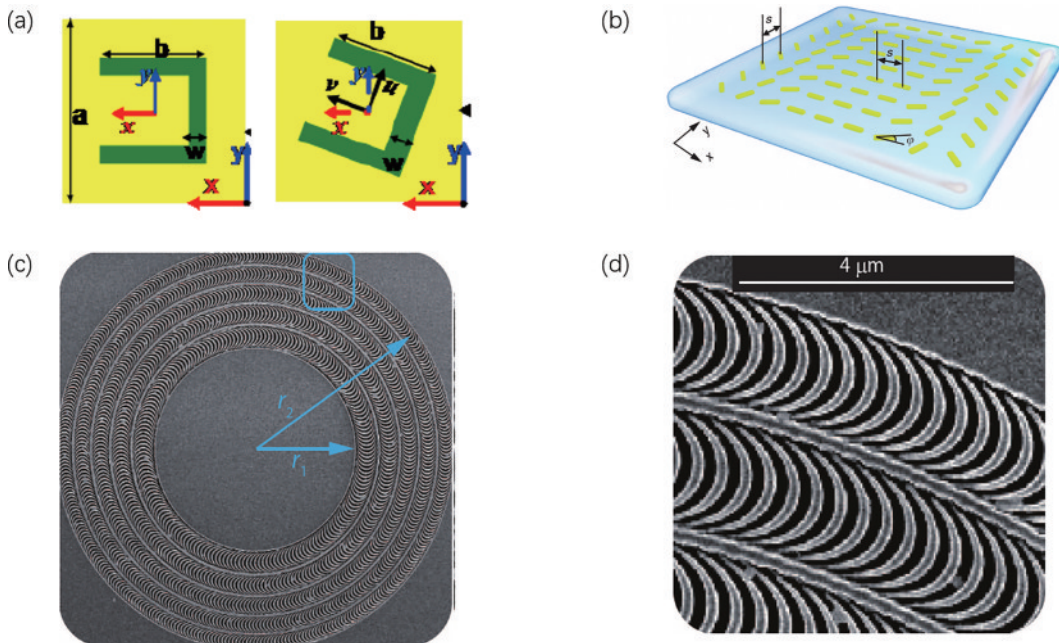


图 8 等离子激元型几何相位超透镜。(a) U 型孔径天线示意图<sup>[14]</sup>；(b) 矩形天线示意图<sup>[15]</sup>；(c) 悬链线阵列超透镜的 SEM 图<sup>[16]</sup>；(d) 图(c)中矩形区域放大视图<sup>[16]</sup>

Fig. 8 Plasmonic metalens based on geometric phase. (a) Schematic of U-shaped aperture antenna<sup>[14]</sup>; (b) schematic of rectangular antenna<sup>[15]</sup>; (c) SEM images of catenary arrays for metalens<sup>[16]</sup>; (d) scaled view of rectangular region in (c)<sup>[16]</sup>

表 1 等离激元型超透镜参数特性

Table 1 Parameter characteristics of plasmonic metalenses

Structure	Material	Wavelength /nm	Phase mode	Numerical aperture (NA)	Efficiency /%	Reference
Nanoslit	Ag	650	Propagation phase	—	—	[4]
Nanoslit	Ag	650	Propagation phase	0.95	60.28	[5]
Nanoslit	Au	850	Propagation phase	0.35	—	[6]
Antenna	Au	1550	Resonance phase	0.015	10	[9]
Inverted antenna	Au	676	Resonance phase	0.075	10	[9]
MIM	Au	750-950	Resonance phase	0.57	—	[11]
MIM	Au	4600	Resonance phase	0.73	27	[12]
MIM	Au	4600	Resonance phase	0.02	80	[13]
Antenna	Au	740	Geometric phase	—	—	[15]
Catenary	Au	532-780	Geometric phase	—	50	[16]

### 3.2 介质型超透镜

#### 3.2.1 传播相位调制

介质型超透镜单元结构的高度与波长近似时,其结构可被视为介质波导,如图 9(a)所示,当光沿不同的介质波导传播将积累不同的相位产生相位调制<sup>[17]</sup>。基于此原理,2005年 Arbabi 等<sup>[18]</sup>设计了如图 9(b)所示的六边形柱体单元结构,每个天线都被视为两侧截断的波导,波导的椭圆截面将使沿椭圆两个长短轴方向偏振的波导模式有效折射率产生差值,这将导致每个柱体结构对透射光施加和偏振状态相关的相位调制,该团队基于此单元结构设计了如透镜、波片、偏振器、分束器等透射光学器件。2016年 Khorasaninejad 等<sup>[19]</sup>以二氧化钛圆柱作为波导单元结构,通过调节圆柱体

的直径实现  $2\pi$  相位覆盖,如图 9(c)所示,超透镜在可见光谱中具有高聚焦效率和高数值孔径的偏振不敏感超透镜,能够将光线聚焦达到衍射极限的光斑,在成像时还具有很高的分辨率,其传输模式示意图如图 9(d)所示。2020年 Chen 等<sup>[20]</sup>将显示器与超透镜集成在一起,通过单个设备可以实现双重功能,通过调整光的偏振自由度,可以动态改变显示器以形成动画,但在超透镜和显示结构的影响以及衍射的影响双重作用下,该器件的工作效率仅为 25%。2022年孙晓红等<sup>[21]</sup>提出了一种直角梯形超透镜结构单元,可以同时在线偏光和圆偏振光进行聚焦。

#### 3.2.2 共振相位调制

共振相位调制分为两种共振模式<sup>[22]</sup>,即 Mie 共振

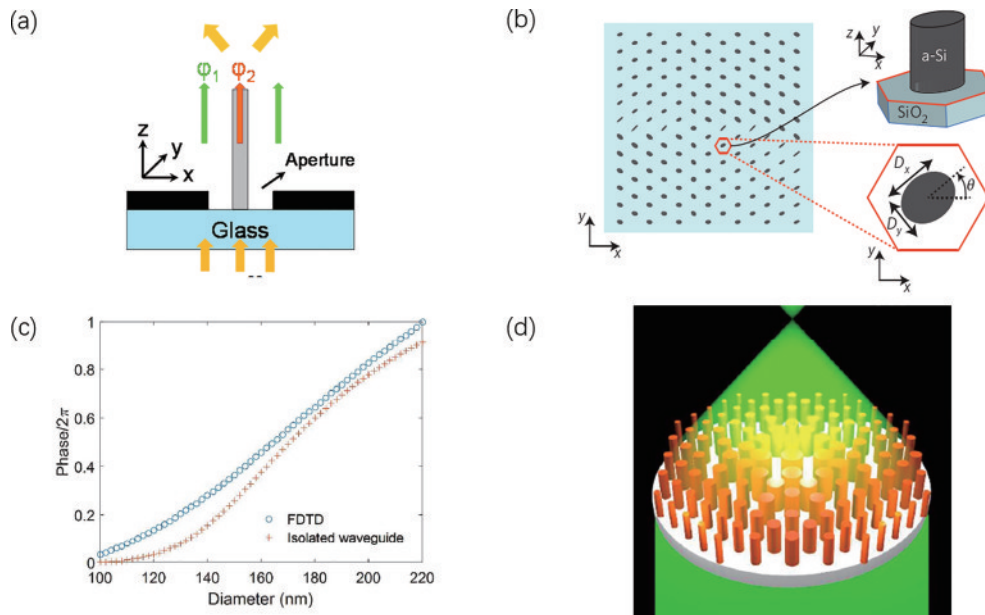


图 9 介质型传播相位超透镜。(a)介质波导相位调制原理图<sup>[17]</sup>; (b)非晶硅柱的三维示意图及其放大俯视图<sup>[18]</sup>; (c)圆柱直径与相位调制的函数关系<sup>[19]</sup>; (d)超透镜在传输模式下的示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 9 Dielectric metalens based on propagation phase. (a) Schematic of dielectric waveguide phase modulation<sup>[17]</sup>; (b) schematic three-dimensional view of an amorphous silicon post and its magnified top view<sup>[18]</sup>; (c) functional relation of cylinder diameter and phase modulation<sup>[19]</sup>; (d) schematic of a metalens operating in transmission mode<sup>[19]</sup>

和法布里-珀罗(F-P)共振。Mie共振模式通过使用低宽高比纳米柱(可视为惠更斯源纳米天线)进行相位控制,2015年Decker等<sup>[23]</sup>提出具有高折射率的介电材料制成的纳米单元结构可激发出强电偶极子和磁偶极子Mie型共振场分布,如图10(a)所示,电偶极子和磁偶极子共振都会分别引起最多 $\pi$ 的相位偏移,当两个共振光谱重叠时,将覆盖整个 $2\pi$ 相位范围。2017年

Zheng等<sup>[24]</sup>实验证明了惠更斯超透镜可以在透射模式下实现衍射受限聚焦和成像,超透镜SEM结构如图10(b)所示。然而,有几个因素阻碍了其实际发展,惠更斯亚表面仅在相对较窄的带宽内实现完全的 $2\pi$ 相位覆盖,相邻纳米结构之间存在相当大的共振模式耦合,由于边缘附近存在较大的相位梯度,因此在高数值孔径(NA)下会显著降低透镜的性能<sup>[25]</sup>。

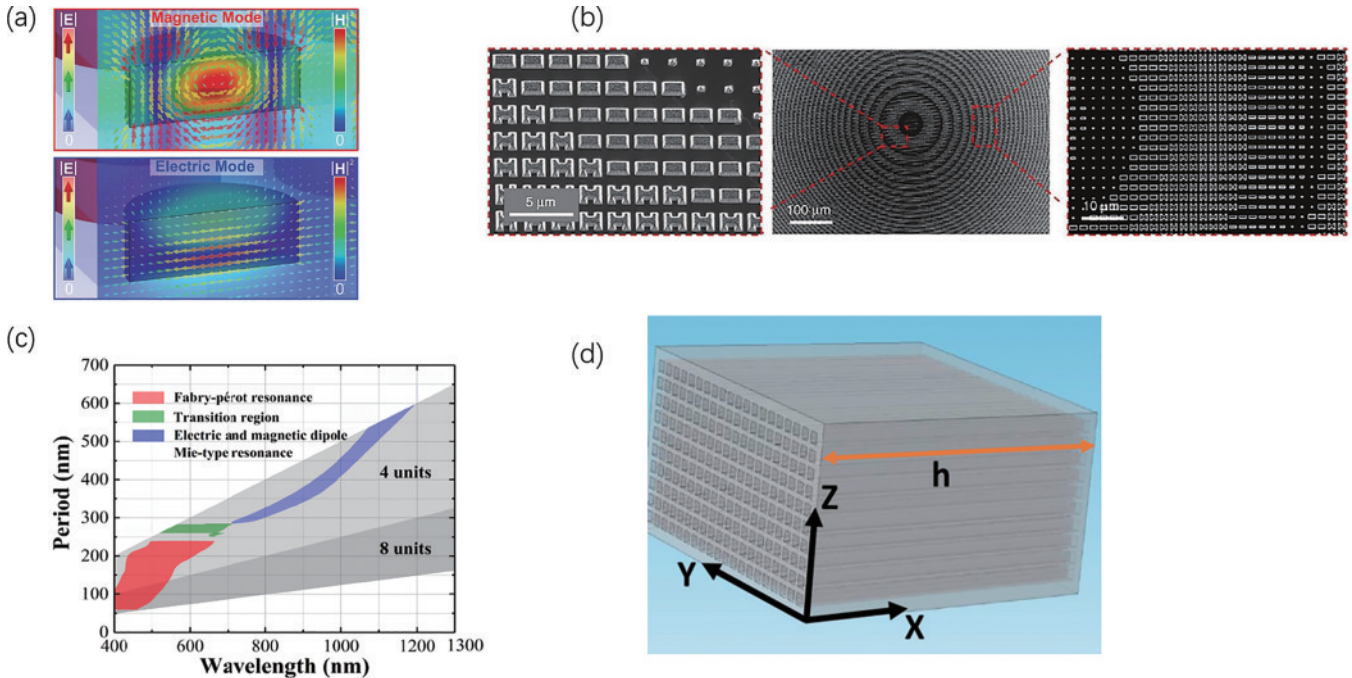


图10 介电型共振相位超透镜。(a)电偶极子和磁偶极子的场分布<sup>[23]</sup>;(b)中红外惠更斯超透镜结构的SEM俯视图<sup>[24]</sup>;(c)波长和相位响应周期的函数关系用以实现 $2\pi$ 相移的机制<sup>[22]</sup>;(d)基于F-P共振的方形孔透镜<sup>[26]</sup>

Fig. 10 Dielectric metasurfaces based on resonance phase. (a) Field distributions for electric and magnetic dipoles<sup>[23]</sup>; (b) SEM images of top view of a mid-infrared Huygens metasurface structure<sup>[24]</sup>; (c) mechanisms for realizing a  $2\pi$  phase shift by functional relationship between wavelength and phase response period<sup>[22]</sup>; (d) F-P resonance based lens with square-shaped holes<sup>[26]</sup>

F-P共振通过使用高宽高比纳米天线实现 $2\pi$ 相位覆盖,这些天线支持不同有效折射率的模式,可以被视为低品质因数F-P谐振器构成的截断波导<sup>[22]</sup>。2019年Li等<sup>[22]</sup>研究了介质超表面相移的机制,该团队模拟了波长范围从400 nm到1300 nm的相位响应随圆柱直径的变化,如图10(c)所示,当增加超表面的周期时,将会导致F-P共振转换为Mie共振并发生波长红移现象。2020年Anzan-Uz-Zaman等<sup>[26]</sup>推导了传输方程来解释F-P共振现象,并设计了一种隧穿效应的超透镜实现了超分辨率成像,其结构如图10(d)所示。

### 3.2.3 几何相位调制

当圆偏光经过各向异性的结构单元时,会产生2倍结构单元旋转角的相反旋向偏振的相移,这种额外的相移起源于几何相位,也称为Pancharatnam-Berry(PB)相位<sup>[27-28]</sup>。几何相位是由庞加莱球体上一点到另一点的路径引起的额外相位差,因此它仅取决于庞加莱球体上各向异性元原子相关拓扑的旋转方向,这种性质使几何相位可以与传播或共振相位调制共同存在

实现同时调制<sup>[29]</sup>。通过调整结构单元的旋转角度和尺寸即可实现 $2\pi$ 的相位覆盖<sup>[30-33]</sup>。2017年Chen等<sup>[30]</sup>基于几何相位设计了三种单独的氮化镓超透镜,在可见光下具有极高的工作效率(蓝光、绿光和红光效率分别为87.0%、91.6%和50.6%)。2017年Balthasar Mueller等<sup>[31]</sup>将基于传播相位和几何相位的单元结构混合构造成超透镜,实现了任意正交偏振态的相位轮廓构造,其思路示意图如图11(a)所示。2018年Li等<sup>[32]</sup>结合PB相位和动态相位的相互作用,实现了不同自旋态光子的纵向聚焦和横向移动,获得对称和非对称的横向自旋相关分裂可用于自旋光子的多维灵活操作,并基于此原理构造了聚焦效率达到58%的超透镜,其基于光子自旋霍尔效应的多维操纵原理如图11(b)所示。

表2汇总了介电型超透镜的参数,如单元结构的形状、所使用的材料、工作波长、相位调制模式、数值孔径、聚焦效率。由表2数据可知,介电型超透镜的聚焦效率普遍要优于等离子激元型超透镜,同时可以兼容当前的

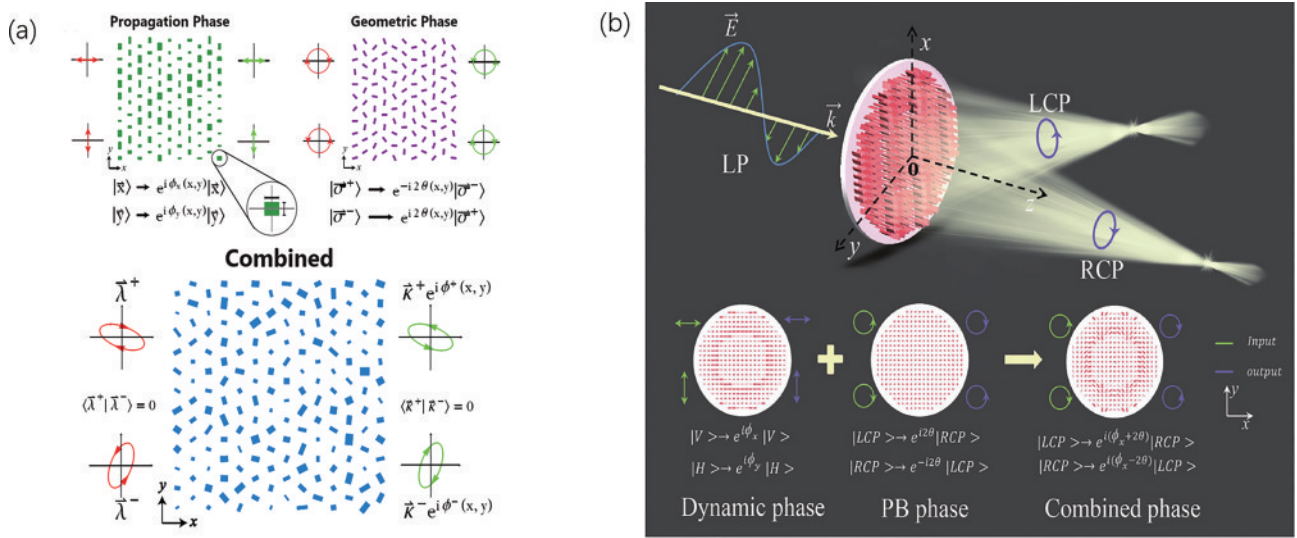


图 11 介质型几何相位超透镜。(a)超透镜构造示意图<sup>[31]</sup>;(b)基于光子自旋霍尔效应的多维操纵原理图<sup>[32]</sup>  
 Fig. 11 Dielectric metalens based on geometric phase. (a) Schematic of metalens structure<sup>[31]</sup>; (b) illustration of multidimensional manipulation based on photonic spin Hall effect<sup>[32]</sup>

表 2 介质型超透镜参数特性  
 Table 2 Parameter characteristics of dielectric metalenses

Structure	Material	Wavelength /nm	Phase mode	NA	Efficiency / %	Reference
Elliptic column	a-Si	915	Propagation phase	—	80	[18]
		660				
Column	TiO2	532	Propagation phase	0.85	60	[19]
		405		0.60	90	
Column	Si	1550	Propagation phase	—	25	[20]
Square column	PbTe	5100–5290	Resonance phase	0.71	80	[24]
Square column	SI	980	Geometric phase	—	58	[32]
		430			87	
Square column	GaN	532	Geometric phase	0.22	91.6	[33]
		633			50.6	

半导体纳米工艺技术,其未来在通信、量子光学、成像、热光子学等很多领域都有非常广阔的应用前景。

## 4 基于功能分类的超透镜应用及研究进展

### 4.1 可变焦型超透镜

可变焦距是超透镜一个值得关注的方向。近些年,可变焦距和结构单元可调谐的超表面在荧光光学领域引起了极大关注<sup>[34]</sup>。可变焦超透镜实现的基本原理可以归总为通过外部手段调节构成二维超表面的纳米结构单元参数,使这些微型结构对光相位的调制做动态变化,从而实现动态调节焦距的功能。根据对纳米结构调制机制的不同,可以将其分为热调制、电调制和机械调制三类。

第一类是热调制,通过温度变化使超透镜纳米结构的折射率发生变化,从而改变其对光相位的调制实现焦距变化。Iyer等<sup>[35]</sup>提出基于温度变化从而实现焦距变化的超透镜,Afridi等<sup>[36]</sup>通过给嵌入热光聚合物

中的金制螺旋电阻加热器施加不同电压,来动态控制金属硅的折射率从而实现焦距变化,其结构如图12(a)所示。此外,Berto等<sup>[37]</sup>提出了一种利用平面热光模块确定相位前沿整形的方法,并设计了微加热器来局部整形折射率分布,该团队还提出了结合遗传算法优化可产生自由形式的光学波前修正像差。

第二类是电调制,通常依靠外置电压驱动器件内部离子分布导致相位调制发生变化从而改变焦距。Thyagarajan等<sup>[38]</sup>设计一种基于电调制的等离子超透镜,在外置毫伏级电压的作用下,银离子通过氧化铝电介质传输,在氧化铟锡ITO电极中诱导银纳米颗粒成核生长,其示意图如图12(b)所示,提出了半导体的复介电常数随载流子浓度线性增加导致场效应光相位调制作用的原理。Shirmanesh等<sup>[39]</sup>通过调节施加到单个超表面元件上的栅极电压,实现了1.5、2、3 μm的焦距变化,但当入射光垂直于天线偏振入射时则无法聚焦,因为在该偏振状态下无法实现相位调制。Fan等<sup>[40]</sup>提出在外加电场的影响下,液晶(LC)分子在不同有序的



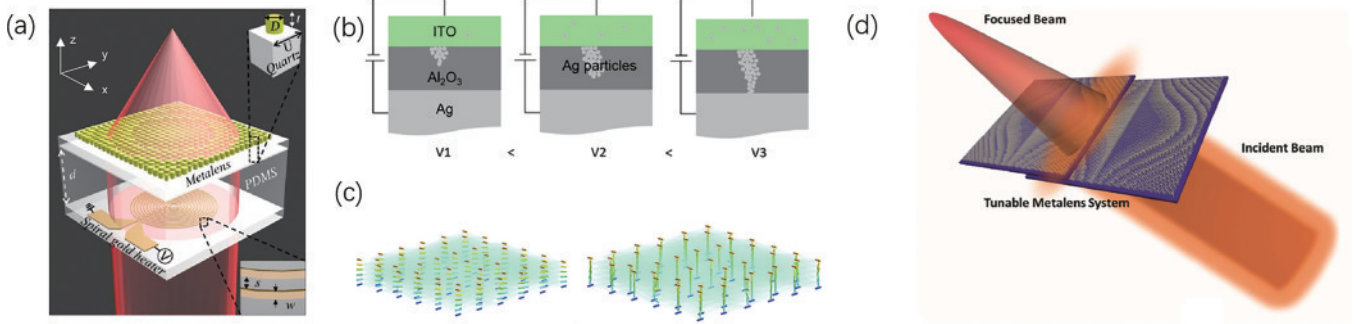


图 12 可变焦型超透镜。(a)可变焦超透镜的概念示意图<sup>[36]</sup>;(b)银离子的迁移和银丝的形成示意图<sup>[38]</sup>;(c)液晶处于无电压和有电压时的状态示意图<sup>[40]</sup>;(d)可变焦型超透镜系统示意图<sup>[41]</sup>

Fig. 12 Tunable metalens. (a) Schematic of concept of tunable metalens<sup>[36]</sup>; (b) schematic of migration of silver ions and formation of silver filaments<sup>[38]</sup>; (c) schematic of liquid crystals in off-state and on-state<sup>[40]</sup>; (d) schematic of tunable metalens system<sup>[41]</sup>

分子构型之间进行精确控制的重新排列,图 12(c)左右两图分别显示了电压处于关闭状态和开启状态时液晶的剖面示意图。当液晶两端未施加电压时,它们是扭曲形态的,当光以平行于底部指向器的偏振进入透镜时,光的线性偏振跟随指向器的旋转,透射光在 y 方向上偏振。当施加电压时,外部电场迫使液晶变得均匀且平行于传播方向,光的偏振状态不发生变化,通过此原理控制光的偏振状态使超透镜聚焦于不同的点。

第三类是机械调制,通过机械方法对超透镜的微纳物理结构参数进行调节进而影响焦点的位置、形状、大小。这些机械方法包括横向位移、旋转、拉伸等。Colburn 等<sup>[41]</sup>从 Alvarez 透镜得到灵感提出了横向位移驱动两个亚超透镜从而实现焦距的非线性变化,其结构如图 12(d)所示,该透镜具有极大的变焦距离,达到厘米量级。Fu 等<sup>[42]</sup>提出基于正交偏振方向设计不同焦距的亚超透镜,并通过翻转入射光偏振态控制焦距

的变化。Cui<sup>[43]</sup>和 Wei<sup>[44]</sup>通过沿光轴旋转两个偏振依赖的几何亚超透镜实现焦距的连续变化,这种方法具有操作简单、响应速度快的优势。Wei 等<sup>[45]</sup>通过横向拉伸石墨烯超透镜实现同时连续调谐不同波长的焦距,该方法不会对透镜带来像差和失真,因此可以实现高精度成像。Arbabi 等<sup>[46]</sup>提出基于微机电系统(MEMS)的变焦距超表面双透镜组,通过静电驱动改变两个超透镜间距离使得焦距大幅度变化,实现了在光学系统中高速电聚焦和成像距离扫描功能,该透镜理论上可以实现 2 μm 的较强分辨率且可以根据实际应用将孔径设计为亚毫米或厘米量级。

表 3 总结了可变焦型超透镜热点研究的相关数据,通过热调谐改变折射率从而达到焦距变化是最容易实现的,但其响应速度和热稳定性制约其性能,电调制通过改变相位调制分布实现焦距变化具有极强的鲁棒性和可逆性,同时也是耗能较低的方法,而机械调制

表 3 可变焦型超透镜参数特性  
Table 3 Parameter characteristics of tunable metalenses

Modulation mode	Wavelength /nm	Focal length /μm	Focusing efficiency /%	Reference
Heat modulation	9000	110–1000	60	[35]
Heat modulation	632	600–690	76	[36]
Electric modulation	1500	1.5, 2, 3	—	[39]
Electric modulation	650	10, 20, 25	40	[40]
Electric modulation	650	10, 37.41	70	[40]
Electric modulation	650	10, 45.68	—	[40]
Mechanical modulation	1550	3.75×10 <sup>6</sup> –15×10 <sup>6</sup>	57	[41]
Mechanical modulation	658	40, 80	23.0–35.1	[42]
Mechanical modulation	633	37.9, 94.8	32.92	[43]
Mechanical modulation	1550	3000–54000	54	[44]
Mechanical modulation	450	212–257	—	[45]
Mechanical modulation	550	252–306	—	[45]
Mechanical modulation	650	310–376	—	[45]
Mechanical modulation	915	565–629	40	[46]

通常需要较为精密的机械结构使得透镜位移或形变等操作可以在保证精度的情况下调节焦距,该方法通常操作较为简单,并且相比于其他调制方法可制作大型透镜,这也使得它所产生的变焦范围也较大。

### 4.2 像差消除型超透镜

像差校正是光学透镜设计中的一个经典而又重要的组成部分,与第一代传统光学透镜和第二代菲涅耳衍射透镜相比<sup>[47-49]</sup>,超透镜的工作原理更加多样化,因此对于校正像差的方式也同样多样化,像差主要分为两种:一种为单色像差;另一种为色像差。利用超透镜可以分别校正两种像差,甚至还可以同时校正两种像差,本节的像差校正透镜重点为单色像差,其校正可参考宽带无色散型超透镜章节。

单色像差大致分为五类:球差、慧差、像散、场曲和畸变。通过应用双曲相位分布可消除正常入射时的球差<sup>[9]</sup>。当光线斜入射时,双曲相位分布不会产生球面波前,但会出现严重的离轴像差,入射角越大离轴像差就越严重,而高数值孔径的透镜需要大视场,也即需要大入射角。为了解决这一矛盾,2015年 Kalvach 等<sup>[50]</sup>提出了一种由光圈光阑和将正弦相位曲线叠加在双曲相位分布上的改进型相位分布平面超透镜设计,使入射角在 $-40^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内的入射光会聚到焦平面的点上,其光路如图 13(a)所示。采用双层超透镜结构也同样可以对斜入射的光进行单色像差校正。2016年

Arbabi 等<sup>[51]</sup>设计了由两个亚超表面构成的超透镜组,亚表面由不同直径的非晶硅纳米柱的六角形阵列组成,如图 13(b)所示,使用两层亚表面构成的透镜组提供了更小的 $f$ 值和更好的单色像差校正,从而获得更高分辨率的更亮图像,但这将导致较大的色差(即窄带宽)。2012年 Aieta 等<sup>[9]</sup>制作了两个焦距分别为 3 cm 和 6 cm 的平面透镜,以及一个角度 $\beta=0.5^{\circ}$ 的平面轴棱锥(相当于一个基角为 $1^{\circ}$ 的玻璃平凸轴棱锥),其相位波前如图 13(c)所示,可以实现在高 NA 下也没有单色像差,不过由于使用金属材料导致损耗过高,聚焦效率只有 10%。2013年 Aieta 等<sup>[52]</sup>提出了一种在弯曲衬底上附加纳米谐振器实现无彗差和球面像差聚焦的平面超透镜设计,其结构示意图如图 13(d)所示,但是在曲面上加工纳米结构是比较有难度的,这限制了该研究的实际应用能力。2020年 Kim 等<sup>[53]</sup>提出基于新双透镜的多波长定向校正透镜和滤色功能的几何相位透镜系统,透射单元由硅纳米实心圆柱和空心圆柱构成,在衬底的一侧使用多波长超透镜,在另一侧使用宽带几何相位超透镜,前者校正了后者的色差,后者滤除了不必要的光谱范围的透射,该系统可以同时校正三种主要可见光颜色的纵向色差和四种单色像差,包括球差、彗差、像散和场曲。2021年 Sawant 等<sup>[54]</sup>提出了一种厘米量级混合超透镜补偿色散和校正单色像差的透镜系统,将传统光学透镜和超透镜结

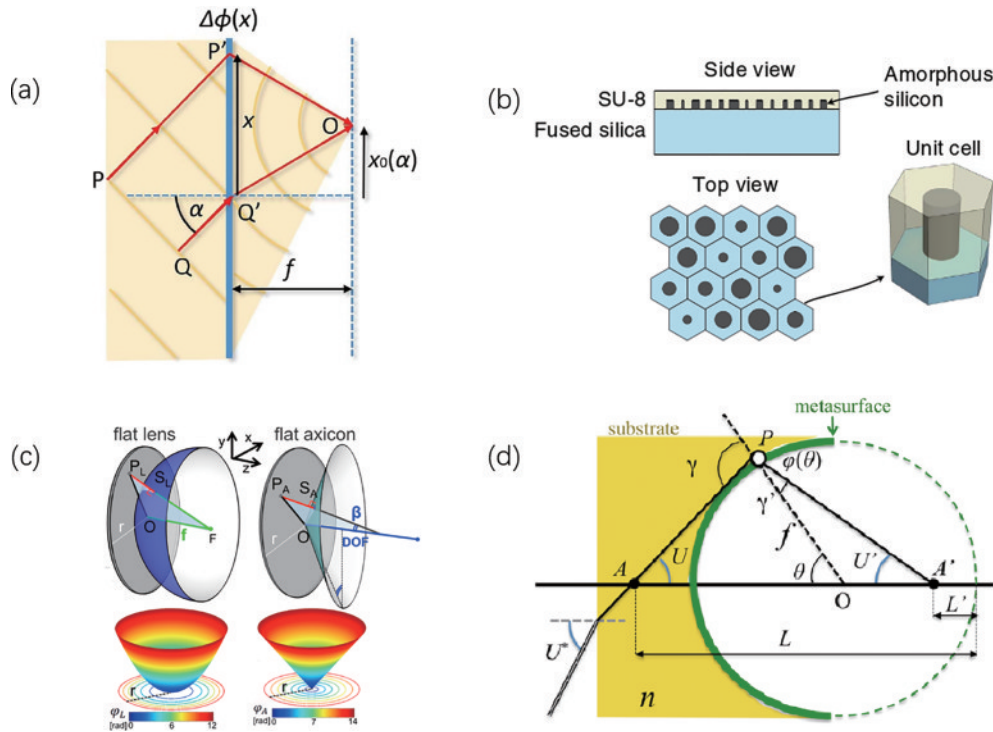


图 13 单色像差消除型超透镜。(a)完美平面透镜将任意入射角的平面波转换成球面波,会聚到焦平面上的焦点<sup>[50]</sup>; (b)超透镜结构示意图<sup>[51]</sup>; (c)平面超透镜和轴棱锥设计示意图<sup>[9]</sup>; (d)球面超透镜示意图<sup>[52]</sup>

Fig. 13 Monochromatic aberration cancellation metalens. (a) Perfect flat lens transforms plane waves with any angle of incidence into spherical waves, which converge to a focal point on focal plane<sup>[50]</sup>; (b) schematic of metalens structure<sup>[51]</sup>; (c) schematic of design of flat metalenses and axicons<sup>[9]</sup>; (d) schematic of metalens patterned on a spherical interface<sup>[52]</sup>

合矫正了 80% 的色差和 70% 的球差,其成像效果优于标准折射透镜,避免了折射光学系统和衍射光学系统结合的混合器件的衍射效率随着元件孔径上的偏转角而降低的问题。

表 4 总结了像差消除型超透镜热点研究的参数,

表 4 像差消除型超透镜参数特性

Table 4 Parameter characteristics of monochromatic aberration cancellation metalenses

Wavelength / $\mu\text{m}$	NA	Focal length	Focusing efficiency /%	Reference
30000	0.45	—	—	[50]
0.85	—	717 $\mu\text{m}$	70	[51]
1.55	—	3 cm	10	[9]
1.55	0.5	6 cm	—	[52]
1.35–1.95	—	Transmission 22 $\mu\text{m}$ Reflection 11 $\mu\text{m}$	16–61	[53]

### 4.3 宽带无色散型超透镜

近年来,超表面已成为波前整形的多功能平台,由于其相位由厚度在波长尺度的亚波长结构精确控制,许多基于亚表面的紧凑型光学器件已有报道。然而,尽管这些器件是由弱色散材料组成的,但它们的色度仍然很高,在聚焦和成像的过程中会导致明显的色散效应。这可归因于两个独立的因素:一是周期晶格对不同波长产生不同的响应造成的色散;二是不同波长通过自由空间中的光传播而产生的不同相位积累产生的色散。色散效应会显著降低全色光学应用的性能。为了消除色散效应需要多个光学元件组合而成,这会难以避免地让透镜组的整体结构变得冗余复杂,同时极大地提高了透镜组的优化和制作成本。所以,利用超透镜实现宽带范围的无色散对于光学系统轻量化、集成化具有非常大的作用,同时对于推广超透镜在各个领域中替代传统透镜也具有非常大的意义。

全光无色差成像是超材料应用于光学成像系统的最终目标。起初,一些研究仅能在一些离散波长或窄波段实现无色差,这显然是无法满足成像系统对于宽带无色差的需求的。2017年 Wang 等<sup>[55]</sup>通过利用集成共振单元并结合几何相位来控制色散相位实现了大带宽无色散聚焦,结构如图 14(a)所示,但其反射式成像及偏振依赖限制了其应用。2018年 Chen 等<sup>[56]</sup>使用各向异性二氧化钛纳米结构,如图 14(b)所示,通过同时控制相位、群延迟和群延迟色散从而获得可以控制基于频率相关的相位剖面能力,实现了可见光范围内的大连续带宽上透射式成像,但由于其设计基于几何相位原理,该透镜只可在左手圆偏振光入射的情况下工作。2019年 Chen 等<sup>[57]</sup>在上述研究的基础上提出将每个各向异性纳米结构的旋转角度限制在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内来避免了引入不需要的偏振灵敏度,并根据此理论设计了一种宽带无色散超透镜,在波长为 460~700 nm 的几乎整个可见光光谱范围内,使超透镜无色

该类透镜校正单色像差的同时可以兼容广角入射的校正,但通常具备窄带特性,且各参数在设计中无法兼顾需要取舍(聚焦效率、数值孔径、器件体积等),在近几年的研究中,将单色像差校正和宽带无色散校正相结合以及简化器件结构复杂程度是其研究热点。

散且具有偏振不敏感性的同时,还能保持衍射极限的成像性能,其结构如图 14(c)所示。除了可见光谱范围,还有在近红外以及太赫兹光谱范围中的研究,如 2018年 Shrestha 等<sup>[58]</sup>设计了十余种孔、柱构成的多种几何图案超表面微纳单元,分析了各个微纳单元的相位调制作用并制成数据库,实现在 1200~1650 nm 大带宽范围内的无色散成像,在保持透射成像的前提下实现了偏振不敏感,但由于控制相位色散需要综合透镜各参数进行权衡(包括透镜直径、数值孔径和带宽等),因此设计上需要一定的取舍。2019年 Cheng 等<sup>[59]</sup>设计了一种 C 型谐振单元结构的超透镜使其可以在 0.3~0.8 THz 范围内工作,其在中心频率内的带宽覆盖高达 91%,聚焦效率达到 68%。2015年, Pu 等<sup>[16]</sup>发现了一种新的超透镜散射结构名为悬链线,它是一种自由悬挂链在其自身质量下呈现的曲线,该团队发现,光学悬链线散射单元可以产生基于几何相位的连续和线性的 $2\pi$ 相移覆盖,由于其几何相位产生的本质是由于自旋轨道转换的结果,所以该结构与波长相关性很低,可以实现宽光谱无色差聚焦。2021年 Zhang 等<sup>[60]</sup>基于悬链线散射单元设计了一种同时具有红外波段宽光谱工作、超大视场( $178^\circ$ )、高聚焦效率的超透镜,通过他们所提出的等相流线优化方法,使各个单元的结构抑制寄生衍射级,使最大衍射效率接近 100%。

通过使用微纳结构和其他光学元件或成像计算方法相结合,还可以更进一步提高光学系统的性能。2018年 Chen 等<sup>[61]</sup>通过结合可谐相位和人工色散的方法设计了一种超矫正器,可以校正大型球面平凸透镜中的球面相差和色差,此方法避免了常规无色散超表面透镜需要的较大群延迟,进而避免了常规无色散超透镜直径小于 100  $\mu\text{m}$  的限制,该超矫正器可以将目前最先进的浸入式物镜(包括 14 个透镜和 7 个特种玻璃)的带宽从紫外波长大幅增加到近红外波长,其整体光学结构如图 14(d)所示。2019年 Lin 等<sup>[62]</sup>结合氮化

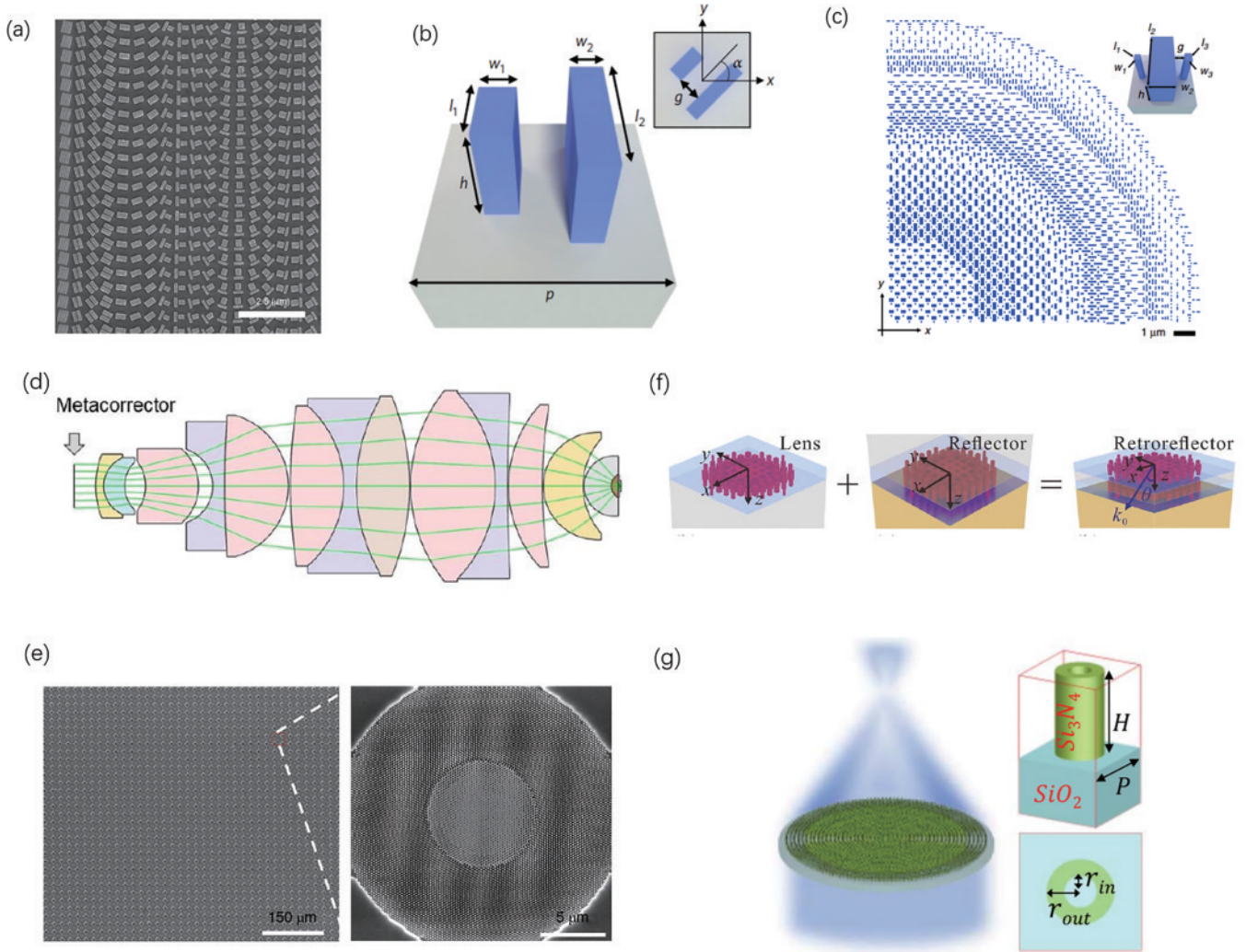


图 14 宽带无色散型超透镜。(a)超透镜的 SEM 图<sup>[55]</sup>;(b)超透镜单元示意图<sup>[56]</sup>;(c)超透镜四分之一示意图<sup>[57]</sup>;(d)超校正器整体光学结构示意图<sup>[61]</sup>;(e)无色散超透镜阵列的 SEM 图(左)与方框内单个超透镜的放大 SEM 图(右)<sup>[62]</sup>;(f)后向反射器的构成原理<sup>[65]</sup>;(g)超透镜整体结构与单元结构示意图<sup>[66]</sup>

Fig. 14 Broadband achromatic metalens. (a) SEM image of metalens<sup>[55]</sup>; (b) schematic of a metalens element<sup>[56]</sup>; (c) layout of a quadrant of metalens<sup>[57]</sup>; (d) schematic of overall optical structure of metacorrector<sup>[61]</sup>; (e) SEM image of achromatic metalens array (left) and zoomed-in SEM image of a single metalens in square (right)<sup>[62]</sup>; (f) composition principle of retroreflector<sup>[65]</sup>; (g) schematic of overall structure and unit structure of metalens<sup>[66]</sup>

镱纳米天线制成的微透镜阵列和数字图像处理方法,规避了单个消色差超透镜不能同时实现大同口径和大数值孔径的局限,该团队将  $60 \times 60$  个直径为  $21.65 \mu\text{m}$  的超表面透镜组成阵列,如图 14(e)所示,利用多个镜头的视差计算深度,即不同镜头像面上物体的平移关系<sup>[63]</sup>。该系统具有评估多个彩色物体深度的能力,理论上甚至可以得到具有极大景深的消色差光场图像,解决了传统光场相机无法实现宽带连续消色差的问题<sup>[64]</sup>。近几年的研究显示,将多个不同功能的超透镜级联起来实现宽带无色散成像是一个新的研究方向,这大大减少了超透镜设计自由度的限制。如 2021 年 Deng 等<sup>[65]</sup>提出了一种采用双层消色差梯度超表面的反射器,如图 14(f)所示,可以在宽带光谱范围内实现连续入射角范围的反射,第一个超表面用作透

射式消色差超透镜,执行宽带空间傅里叶变换及其逆变换,第二个超表面用作反射式消色差超透镜,用来控制波长和位置相关的色散。2022 年 Sun 等<sup>[66]</sup>提出了一种孔径共享分割协同操作方法,设计了由两个同心超透镜组成的高效宽带无色散超透镜,结构如图 14(g)所示,该透镜的空芯纳米柱状  $\text{SiN}_4$  介电元结构可以根据不同波长相移补偿和相位误差进行校正。

表 5 总结了宽带无色散型超透镜热点研究的参数,相比于衍射透镜与传统透镜,超透镜由于其独特的相位调制机制具有更好的设计自由度,使其在解决光的色散问题上更有优势。通过利用几何相位原理可以在一定的带宽范围内控制相位,但这种相位调制的方法会限制入射光的偏振态。近年来一些研究团队利用矩形耦合结构单元来进行相位补偿,实现了可

表 5 宽带无色散型超透镜参数特性

Table 5 Parameter characteristics of broadband achromatic metalenses

Wavelength /nm	NA	Focal length / $\mu\text{m}$	Focusing efficiency /%	Reference
1200-1680	0.268	100	12	[55]
470-670	0.2	63	20	[56]
1300-1650	0.24	200		
1200-1650	0.13	800	50	[58]
1200-1400	0.88	30		
460-700	0.075	9.96	35	[61]
460-700	0.2	60	30	[57]
400-660	0.2157	49	39.1	[62]
$3.8 \times 10^5 - 1 \times 10^6$	0.385	12000	68	[59]
1350-1950	—	22	—	[65]
450-1400	0.107	46	70	[66]

见光及近红外波段的消色差,但这种方法对结构优化的工作量相当大,且只能应用一维非周期结构。随着同时控制相位、群延迟和群延迟色散理论的提出<sup>[58]</sup>,可以实现在可见光区域的大连续带宽上传输的色散,这代表着超表面技术水平的重大进步。此外,通过结合可调谐相位和人工色散可以实现色差校正能力,可以与传统透镜组结合从而大幅延长其带宽。宽带无色散型超透镜在光学成像等领域有着极大的应用潜力,这些消色差和色散定制的光学器件可以在工业和科学研究中找到许多应用场合,例如在无人机视觉、显微镜、内窥镜、虚拟现实和增强现实等多种领域中。

## 5 结 论

本文回顾了三代透镜的发展历程,介绍了二维超材料构成的超透镜的基本原理,并将其分为等离激元型、介质型、可变焦型、单色像差消除型、宽带无色散型和其他功能型,总结了各类型超透镜的关键发展节点,将相关研究参数进行了制表汇总,归纳了其发展路线,总结了近期超透镜的商业化进程,并结合最新研究展望了其限制及发展方向。

超透镜作为第三代光学透镜元件,由于其亚波长的厚度和超轻的特点且可对光波波前实现任意的参数控制等优点,展示出了很好的发展前景。在过去的十余年中,领域内对超透镜的研究一直没有放缓,许多公司都以超透镜为核心基于其优势开发各种应用。如 Tunoptix 公司研发了基于超透镜的卫星成像,韩国集成纳米结构物理中心与伯明翰大学合作开发了石墨烯和金孔结构的微型光学元件可用于振幅调制和动态全息等功能。2022 年 Metalenz 公司进行了手机应用照明智能元器件垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的展示,证明了使用超透镜可使支持手机摄像头 3D 场景照明的光学元件数量减半。丹麦一家光学解决方案公司 NILT 近年来利用超透镜技术实现了超薄、超轻的光学解决方案,使元器件尺寸和复杂性大幅降低,同时该

公司的超光学元件 MOE 具有创造纪录的 94% 的绝对效率。

超透镜的主要限制包括成本问题、色散问题及设计难度问题。其成本问题尤其在厘米量级元件上使其精度与纳米量级元件对标难度极高,需要极高的花费,且超透镜相关材料的加工对现有的工业加工基础也提出了进一步的需求和挑战,例如较常见的电子束刻蚀和原子层沉积,虽然可以达到纳米量级的加工精度需求,但加工区域只有毫米量级且成本很高,随着新的制作工艺技术(如纳米压印、干涉光刻、树脂固化等)的发展和进步,相信能够实现大尺寸高性能且可工业流水线制备的超透镜技术会在不久的将来被研发。此外,由于超透镜是衍射型的成像元件,色散问题仍旧是阻碍其实际使用的一大难关,对于全彩色成像等应用,这是一个重大缺陷,研发更大带宽的超透镜是未来的研究趋势之一。虽然超透镜具有广泛的应用前景,但是其设计所需要储备的专业知识涉及到各个学科,如庞加莱球上电磁波的偏振态与几何相位的关系、工程电磁学、电动力学、固体物理等,所以开发易上手的半自动化设计软件可以极大程度地减少超透镜的设计难度,如 2022 年唐烽团队<sup>[67]</sup>通过 Matlab 和 FDTD 法的混合编程,研究了不依赖于预设物理模型的超透镜的设计过程,实现了介质超透镜的自动化设计,设计流程及软件能极大地方便非专业人员进行超透镜的设计。

综上所述,超透镜需要更高的效率、更大的数值孔径、更强大的像差消除能力(色像差和单色像差)、更简易更廉价的加工工艺、更大的宽带工作能力等,才能满足微型摄像、集成光学、机器视觉、遥感、医学诊断等不同情况下实际成像应用以及商业化的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.

- [2] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [3] Xu T, Wang C T, Du C L, et al. Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4753-4759.
- [4] Sun Z J, Kim H K. Refractive transmission of light and beam shaping with metallic nano-optic lenses[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(4): 642-644.
- [5] Shi H F, Wang C T, Du C L, et al. Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths[J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6815-6820.
- [6] Verslegers L, Catrysse P B, Yu Z F, et al. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 235-238.
- [7] Kats M A, Yu N F, Genevet P, et al. Effect of radiation damping on the spectral response of plasmonic components [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21748-21753.
- [8] Jackson J D. *Classical electrodynamics*[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 1998.
- [9] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [10] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [11] Ni X J, Ishii S, Kildishev A V, et al. Ultra-thin, planar, babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(4): e72.
- [12] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [13] Zhang S Y, Kim M H, Aieta F, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on metasurface reflectarrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18024-18034.
- [14] Kang M, Feng T H, Wang H T, et al. Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15882-15890.
- [15] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [16] Pu M B, Li X, Ma X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [17] Khorasaninejad M, Capasso F. Broadband multifunctional efficient meta-gratings based on dielectric waveguide phase shifters[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6709-6715.
- [18] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [19] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [20] Chen R, Zhou Y, Chen W J, et al. Multifunctional metasurface: coplanar embedded design for metalens and nanoprinted display[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(5): 1171-1177.
- [21] 刘慧敏, 陈德利, 孙晓红. 基于梯形结构的超表面透镜特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1722003.
- Liu H M, Chen D L, Sun X H. Research on characteristics of metasurface lens based on the trapezoid structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1722003.
- [22] Li J, Wu T S, Xu W B, et al. Mechanisms of  $2\pi$  phase control in dielectric metasurface and transmission enhancement effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23186-23196.
- [23] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [24] Zhang L, Ding J, Zheng H Y, et al. Ultra-thin, high-efficiency mid-infrared transmissive Huygens meta-optics [J]. *Nature communications*, 2018, 9: 1481.
- [25] Yu Y F, Zhu A Y, Paniagua-Domínguez R, et al. High-transmission dielectric metasurface with  $2\pi$  phase control at visible wavelengths[J]. *Laser & Photonics Review*, 2015, 9(4): 412-418.
- [26] Anzan-Uz-Zaman M, Song K, Lee D G, et al. A novel approach to Fabry-Pérot-resonance-based lens and demonstrating deep-subwavelength imaging[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-10.
- [27] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, 1956, 44(6): 398-417.
- [28] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [29] Chen C, Gao S L, Song W G, et al. Metasurfaces with planar chiral meta-atoms for spin light manipulation[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(4): 1815-1821.
- [30] Yuan Y Y, Sun S, Chen Y, et al. A fully phase-modulated metasurface as an energy-controllable circular polarization router[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(18): 2001437.
- [31] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [32] Li S Q, Li X Y, Wang G X, et al. Multidimensional manipulation of photonic spin Hall effect with a single-layer dielectric metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(5): 1801365.
- [33] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [34] Kim I, Ansari M A, Mehmood M Q, et al. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(50): 2004664.
- [35] Iyer P P, DeCrescent R A, Lewi T, et al. Uniform

- thermo-optic tunability of dielectric metalenses[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(4): 044029.
- [36] Afridi A, Canet-Ferrer J, Philippet L, et al. Electrically driven varifocal silicon metalens[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4497-4503.
- [37] Berto P, Philippet L, Osmond J, et al. Tunable and free-form planar optics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(9): 649-656.
- [38] Thyagarajan K, Sokhoyan R, Zornberg L, et al. Millivolt modulation of plasmonic metasurface optical response via ionic conductance[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(31): 1701044.
- [39] Shirmanesh G K, Sokhoyan R, Wu P C, et al. Electro-optically tunable multifunctional metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 6912-6920.
- [40] Fan C Y, Chuang T J, Wu K H, et al. Electrically modulated varifocal metalens combined with twisted nematic liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10609-10617.
- [41] Colburn S, Zhan A L, Majumdar A. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 825-831.
- [42] Fu R, Li Z L, Zheng G X, et al. Reconfigurable step-zoom metalens without optical and mechanical compensations[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12221-12230.
- [43] Cui Y, Zheng G X, Chen M, et al. Reconfigurable continuous-zoom metalens in visible band[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111603.
- [44] Wei Y X, Wang Y X, Feng X, et al. Compact optical polarization-insensitive zoom metalens doublet[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13): 2000142.
- [45] Wei S B, Cao G Y, Lin H, et al. A varifocal graphene metalens for broadband zoom imaging covering the entire visible region[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 4769-4776.
- [46] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [47] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(5): 1143-1156.
- [48] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P, et al. Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5358-5362.
- [49] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [50] Kalvach A, Szabó Z. Aberration-free flat lens design for a wide range of incident angles[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(2): A66-A71.
- [51] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13682.
- [52] Aieta F, Genevet P, Kats M, et al. Aberrations of flat lenses and aplanatic metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31530-31539.
- [53] Kim C, Kim S J, Lee B. Doublet metalens design for high numerical aperture and simultaneous correction of chromatic and monochromatic aberrations[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18059-18076.
- [54] Sawant R, Andr en D, Martins R J, et al. Aberration-corrected large-scale hybrid metalenses[J]. *Optica*, 2021, 8(11): 1405-1411.
- [55] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [56] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [57] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 355.
- [58] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [59] Cheng Q Q, Ma M L, Yu D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(20): 1525-1531.
- [60] Zhang F, Pu M, Li X, et al. Extreme-Angle Silicon Infrared Optics Enabled by Streamlined Surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(11): 2008157.
- [61] Chen W T, Zhu A Y, Sisler J, et al. Broadband achromatic metasurface-refractive optics[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7801-7808.
- [62] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [63] 倪一博, 闻顺, 沈子程, 等. 基于超构表面的多维光场感知[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918003.
- Ni Y B, Wen S, Shen Z C, et al. Multidimensional light field sensing based on metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918003.
- [64] 莫昊燃, 纪子韬, 郑义栋, 等. 超表面透镜的宽带消色差成像(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(1): 20211005.
- Mo H R, Ji Z T, Zheng Y D, et al. Broadband achromatic imaging with metalens (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20211005.
- [65] Deng M, Ren T X, Wang J, et al. Doublet achromatic metalens for broadband optical retroreflector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(2): 023601.
- [66] Sun P, Zhang M D, Dong F L, et al. Broadband achromatic polarization insensitive metalens over 950 nm bandwidth in the visible and near-infrared[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 013601.
- [67] 巴鹏飞, 李青芝, 伍景军, 等. 介质超透镜自动设计技术及软件研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0722001.
- Ba P F, Li Q Z, Wu J J, et al. Automatic design technology and software of dielectric metalens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0722001.