

超构光栅调控衍射光场的物理及应用

邓子岚¹, 李枫竣¹, 史坦¹, 汪国平^{2*}

¹暨南大学光子技术研究院广东省光纤与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632;

²深圳大学微纳光电子学研究院, 广东 深圳 518060

摘要 基于局域表面等离激元或电介质微纳结构米氏散射的超构光栅对衍射通道的直接调制为高效率、大角度光场调控提供了优良平台。对超构光栅调控衍射光场的物理机理及应用开发进行了概述。首先, 从高衍射效率超构光栅的构建机理出发, 分别介绍了反射式、透射式、对称型、非对称型及可重构超构光栅的典型实现方式; 其次, 介绍了通过结合高衍射效率超构光栅与位移编码型相位调制机制, 实现任意大角度光波前高效调控的典型方法, 概述了高数值孔径透镜、角度可调型多功能光器件、大角度全息超构光栅等方面的研究进展; 然后, 介绍了以超构光栅作为连接自由空间光与表面波的桥梁, 自由空间光波前与表面光波前相互转化方面的集成光调控平台; 最后给出了简要小结, 并对超构光栅未来的发展趋势与应用前景进行了展望。

关键词 光学器件; 超构表面; 超构光栅; 光的衍射; 波前调控

中图分类号 TN202

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823011

Metagratings for Controlling Diffractive Optical Fields: Physics and Applications

Deng Zilan¹, Li Fengjun¹, Shi Tan¹, Wang Guoping^{2*}

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications,

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

²Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Based on the direct modulation of diffraction channels by localized surface plasmon resonances from metallic nano-structure or Mie scattering from all-dielectric micro/nano-structures, a metagrating emerges as an ideal platform for high-efficiency manipulation of wide-angle diffractive optical fields. In this paper, the physics and applications behind metagrating-based manipulation of diffractive optical fields are reviewed. First, metagratings with desirable high diffraction efficiency are introduced, including different working schemes of reflection and transmission modes as well as symmetric, asymmetric, and reconfigurable configurations. Second, by incorporating the high diffraction metagrating with displacement-coded phase modulation mechanism, arbitrary wavefront shaping with a wide-angle range can be realized, leading to their special applications in high numerical aperture metalens, angle-tunable multi-functional devices, and wide-angle hologram metagratings. Third, considering the metagrating as a bridge to connect the surface wave and free-space wave, the mutual conversion between a free-space wavefront and a surface wavefront is analyzed. Finally, we give a brief summary and the development trend and the potential applications of metagratings are prospected.

Key words optical devices; metasurfaces; metagratings; optical diffraction; wavefront control

OCIS codes 230.1950; 050.1950; 160.3918

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-29; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11734012, 62075084)、中央高校基本科研业务费专项资金(21620415)、广东省自然科学基金面上项目(2020A1515010615)、广东省重点研发计划项目(2020B010190001)

* E-mail: gpwang@szu.edu.cn

1 引 言

在微纳尺度上对衍射光波前在空间上的分布特性实施精准调控具有重要意义。超构表面 (Metasurface) 是近年来发展起来的调控光场的优良平台^[1], 具有超薄^[2]、多功能^[3]、效率高^[4]等传统衍射光学元件所不具备的优点。不同于传统衍射光学元件调控光场所利用的光程累积效应, 超构表面则是通过单层微纳散射体形貌诱导的相位突变累积, 实现对光场的有效调控, 如与散射体尺寸相关的共振相位^[5], 与转角相关的几何 Pancharatnam-Berry (PB) 相位^[6] 以及与横截面相关的波导传输相位^[7] 等。通过离散渐变亚波长尺寸基元结构的形状、大小与转角等几何参数, 超构表面能够在 0 级衍射光上实现一定空间相位分布的光波前调控, 为开发新颖光学透镜^[2, 8-10]、特殊光束整形元件^[11-18]、偏

振光学元件^[19-20]、衍射光学元件^[21]、全息元件^[22-27]等应用提供新型平台。渐变基元型超构表面[图 1 (a)、(b)]的光场调控一般依赖于独立基元结构的局域共振或散射模式, 受离散相位采样的固有限制, 往往存在空间频率与衍射效率相对较低的问题^[28], 其在大角度偏折、大数值孔径聚焦及大视角全息构建等方面的应用受到了阻碍。为了打破所调控光场空间频率的限制, 直接工作于高衍射级 (通常为正、负 1 级) 的单一基元型超构光栅应运而生^[28-31]。超构光栅对衍射光场的调控通常采用反射式金属结构与透射式全电介质结构, 通过寻找合适的共振基元结构, 可将入射光直接导向特定的衍射级方向[图 1 (c)、(d)], 不需要具有线性梯度的渐变相位分布, 为衍射光场调控提供了更为简便有效的方式。其中 $R_i, T_i (i = \dots, -1, 0, 1, \dots)$ 分别为超构光栅第 i 衍射级的透射率与反射率。

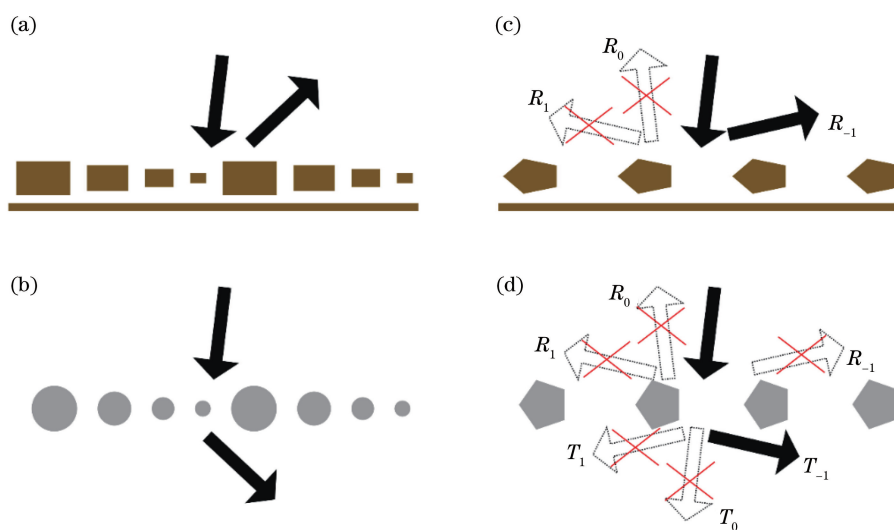


图 1 梯度相位型超构表面与单一基元型超构光栅结构的对比示意图。(a)反射式与(b)透射式渐变基元型超构表面;
(c)反射式与(d)透射式单一基元型超构光栅表面

Fig. 1 Schematic for comparison between phase-gradient metasurfaces and single unit-cell metagrating structures.

(a) Reflection and (b) transmission phase-gradient metasurfaces; (c) reflection and (d) transmission single unit-cell metagrating surfaces

超构光栅结合了超构材料基元结构的丰富共振散射特性与光栅的固有衍射性质, 将基元结构近场模式映射到多级衍射远场光的反射、透射通道上来。相比于渐变基元型超构表面, 单一基元型超构光栅具有如下特点: 1) 超构光栅基元结构对衍射光的直接操控可以打破大角度波前整形与转换效率之间的固有限制^[28]; 2) 超构光栅的衍射光与面内传播模式具有很好的耦合特性^[29], 其是连接自由空间波与表面波的桥梁, 可用于设计非局域角度色散型光场调控器件; 3) 超构光栅可实现任意光场的波前整形, 其

相位调制方式仅仅依赖于单一基元结构之间的相对位移量, 而不需要改变基元结构的几何形貌, 大大降低了纳米制备工艺的精度要求^[32]。由此可见, 超构光栅为大角度极端光场的高效调控、角度敏感可控型光场的调控等提供了优良平台, 在大数值孔径成像、大视场全息显示、大范围光束角度扫描、超灵敏角度分辨^[33]、光子轨道角动量研究^[34]等领域具有广泛的应用。

本文对超构光栅调控衍射光场的物理机理及应用进行了简要综述。第二部分系统分析了高衍

射效率超构光栅的构建机理与实现条件,着重介绍了金属表面等离激元、全电介质米氏散射对超构光栅各衍射通道光波的调制规律与完美衍射现象的发生条件,并进一步简要介绍了高衍射效率超构光栅向可重构调控器件方面的拓展。第三部分概述了在高衍射效率超构光栅中通过引入相位调制以实现大角度任意光波前调控的应用,着重介绍了大数值孔径超构光栅透镜、超构光栅消色差光器件、角度可调型多功能光器件及大视角超构光栅全息等代表性波前调控器件。第四部分介绍了超构光栅作为表面波与自由空间波的连接桥梁,在任意自由光波前与表面光波前的高效转化与调控方面的应用。第五部分对超构光栅光场调控的现状与未来发展趋势进行了总结与展望。需要说明的是,基于渐变基元超构表面构造的闪耀光栅^[35-37]以及用于控制 0 级透射、反射和吸收的光栅结构^[38-42]等不在本文的讨论范围之内。

2 高衍射效率超构光栅

超构光栅通过结合单元结构的局域共振模式与多衍射级光栅架构,可对衍射光场进行高效调控,按其工作模式,可分为反射式架构超构光栅与透射式架构超构光栅;对每一种工作模式,又可以按其单元结构类型,分为对称型结构与非对称结构。基于金属结构的反射式超构光栅一般依赖于局域表面等离激元共振模式对衍射级次的选择性增强效应,而基于全电介质结构的透射式超构光栅则主要依赖于介质微纳结构的米氏散射模式对光栅各衍射级的选择性增强效应。对于工作在斜入射情况下的对称型单元超构光栅,衍射通道限制在仅包含 0 与 -1 级衍射的情况,往往只需较少(单个或双个)局域模式的相互作用,即可达到单衍射效率的目的。而对于工作在正入射情况下的非对称单元超构光栅,1,0,-1 衍射级同时存在,为了抑制更多衍射级通道光的传播,则需要比对称型单元结构更多的局域模式参与相互作用,通过设计特定形式的相消干涉,可达到选择性增强某一级单向衍射的目的。

2.1 反射式超构光栅

在反射式超构光栅中,透射端的光场衍射通道通常由金属底面完全抑制,因此只存在反射端的衍射级。通过调节光栅周期,可将支持的空间光衍射级次控制在 0 和 ± 1 级,这些衍射级次即为基元共振结构的辐射耦合通道。为了使入射光完全沿 +1

或 -1 级方向衍射,要么打破基元结构的对称性,要么打破入射光的对称性(即采取斜入射的方式)。目前,人们已经在金属槽型反射式超构光栅^[29]、开口环阵列反射式超构光栅^[43]、金属纳米棒阵列-介质-金属底面(MIM)结构型超构光栅^[30]等对称基元型结构中,实现了斜入射情况下的完美或近完美大角度衍射现象;同时,人们在由非对称 Ω 型双各向异性共振基元结构^[43]、长短不一的双金属棒结构^[44]及三金属棒结构^[45]等构成的超构光栅中获得了正入射情况下的非对称高效衍射。反射式超构光栅结构的衍射通道数较透射式超构光栅少,仅需简单基元结构的共振模式即可实现(如在斜入射的情况下,简单的偶极共振即可)。

图 2 所示为在金属槽型阵列中率先实现的完美衍射超构光栅^[29]。当金属槽内的局域腔膜(CM)被激发时,光栅的 0 级衍射(R_0)被完全抑制,而 -1 级衍射(R_{-1})效率达到 100% [图 2(a)],这种现象被称为超常光学衍射(EOD)。利用图 2(b)所示的衍射级分布图分析超构光栅的工作波长与入射角范围。此衍射级分布图由一系列伍德反常(WA)线构成,每条伍德反常线由方程 $k_x \pm m \cdot 2\pi/p_0 = \pm k_0$ ($m=0,1,2,\dots$)确定,其中 k_x 为平行于 x 轴的波矢大小, k_0 为入射波矢大小, p_0 为结构的周期, $\pm m$ 为衍射级次。在 $\pm m$ 阶 WA 线以上,开始出现 $\pm m$ 衍射级次。因此,入射波长与入射角处在少衍射级区域(FDO) [图 2(b)]的入射光只发生 0 级与 1(或 -1)级衍射。在 FDO 中,如果局域间隙模式(Localized gap mode)被激发且满足耦合波的理论临界条件时,入射光将沿反常的 1 级(或 -1 级)衍射通道传输,而 0 级衍射通道则完全被抑制。图 2(c)为超构光栅 -1 级衍射效率 $|R_{-1}|^2$ 随入射角度(θ_0)与归一化波数($k_0/2\pi$)的变化。其中,由 ± 1 和 -2 阶伍德反常线所限定的区域即对应着图 2(b)右侧的 FDO 区域。在此区域内, $|R_{-1}|^2$ 在 $k_0/2\pi=0.85$ 处出现共振峰,并且共振峰在入射角为 $10^\circ \sim 80^\circ$ 的超宽范围内均存在。当入射角度为 $\theta_0=30^\circ$ 时 [图 2(d)],衍射效率 $|R_{-1}|^2$ 的峰值达到 100%,而对应位置处的 0 级衍射效率 $|R_0|^2$ 为 0。 R_{-1} 的共振峰与第 0 阶 CM(CM_0) 的振幅峰值重合,说明 CM_0 的激发引起了 R_{-1} 通道的超常衍射。图 2(e)是入射角为 30° 时的磁场 H_y 分布,超构光栅超常衍射角为 -30° ,反射光完全沿原路返回,即出现了完美回射现象。

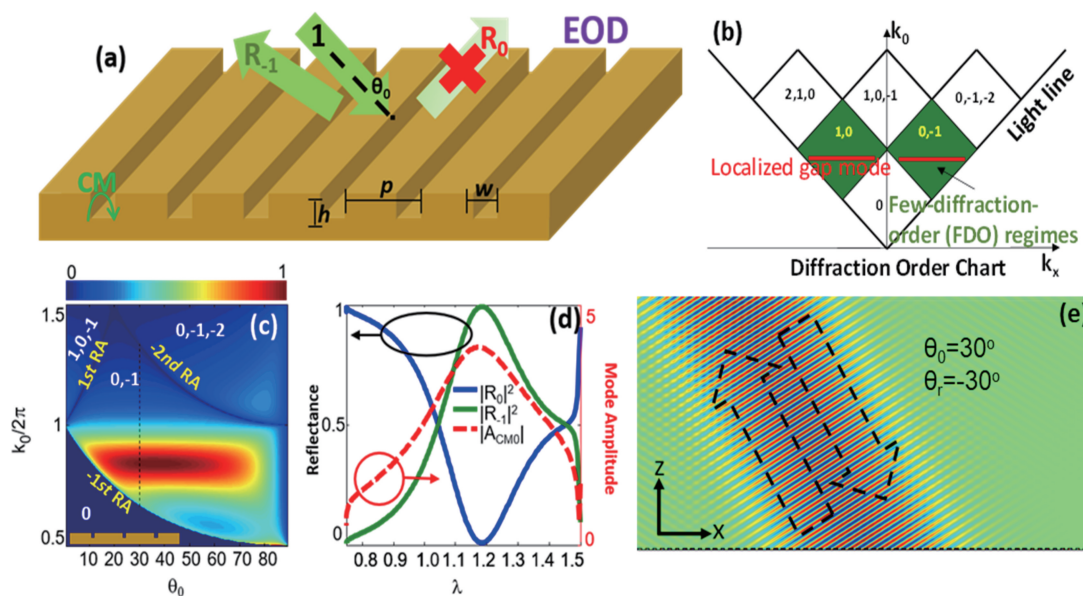


图 2 反射型对称结构超构光栅^[29]。(a)金属槽超构光栅的示意图；(b)由多条伍德异常线构成的 k 空间衍射级次图；(c) $|R_{-1}|^2$ 随入射角度和波数的变化；(d) -1 、 0 级衍射效率谱及局域模振幅谱；(e)入射角为 30° 且发生完美回射 (retro-reflection) 现象的磁场 (H_y) 分布图

Fig. 2 Symmetric reflection metagrating^[29]. (a) Schematic of metallic groove metagrating; (b) k -space diffraction order chart composed of multiple Wood anomaly lines; (c) $|R_{-1}|^2$ versus incident angle and wave number; (d) -1 th and 0 th order diffraction efficiency spectra and local mode amplitude spectra; (e) magnetic field (H_y) distribution diagram for perfect retro-reflection with incident angle of 30°

除了金属凹槽结构的局域间隙模式,其他任意形式的局域共振模式均可用于构造具有高衍射效率的反射型对称超构光栅。例如, Deng 等^[46]利用金属纳米棒构建基于 MIM 架构的反射对称型超构光栅,利用 MIM 结构的局域表面等离子共振,在可见光及近红外范围内实验实现了宽带大角度的衍射增强效应。Ra' di 等^[28]利用金属开口环阵列的磁共振,构造了微波段的超构光栅,同样获得了理论上 100% 的完美衍射。Rabinovich 等^[31, 47-48]通过研究由电容负载传输线组成的反射型超构光栅,运用电流模型推导出在无损耗情况下超构光栅实现任意角度完美衍射的条件,同时也分析了有损耗情况下的衍射公式,完善了整体的理论框架,为设计同种类超构光栅器件提供了更为便捷的计算方法。Popov 等^[49-50]同样针对电容负载传输线结构的反射型超构光栅进行了研究,证明了超构光栅衍射级次的数量等于每个超晶格中极化电流的数量,并得到相应衍射级次强度与电流关系的解析表达式,展现了这种超构光栅在实现衍射级次控制以及高效波前调控方面的功能。

非对称结构的反射型超构光栅可以在正入射的情况下实现高效的非对称衍射。如图 3 所示, Ra' di

等^[28]率先在微波波段设计了 Ω 型的双各向异性超构光栅。图 3(a)为该超构光栅发生非对称完美衍射的电磁响应示意图,当正入射的电磁波照射到超构光栅后, 0 级与 -1 级衍射完全被抑制,而出射光完全沿 1 级衍射方向传播。完美衍射发生的条件可由图 3(b)所示的相消因子谱图确定,相消因子为 0 的参数即为完美衍射发生所需的参数。图 3(c)、(d)给出了在完美衍射参数下[图 3(b)五角星标记处]的衍射效率谱及场分布图,可以直观地看到,在设计频率处, 1 级衍射效率达到完美的 100%,其他衍射级效率均为 0 ,入射电磁波完全沿 1 级衍射方向偏折。基于类似的反射式非对称超构光栅设计原理, Wong 等^[51]提出了运用两个大小不同的金属方块组成超构光栅,它可以在超宽频宽角范围内实现完美异常反射,其入射角范围为 $-22.5^\circ \sim 50^\circ$,带宽覆盖范围为 $22 \sim 28.5$ GHz。Rahmanzadeh 等^[52]利用非对称金属狭缝结构,也成功设计出了可实现完美衍射的反射型超构光栅。Popov 等^[53-54]总结了微波段非对称结构反射型超构光栅的设计步骤以及实验表征,为后续同类设计提供了完整的指导方案。

在太赫兹波段, Dong 等^[55-56]设计了一种可实现大角度衍射的低折射率电介质材料超构光栅器

件。与以往超构光栅的设计方案不同,他们采用了较低折射率($n=1.5$)的高分子聚合物作为光栅结构材料。考虑到低折射率的限制,设计者把-2 级衍射光作为设计的重点。这种超构光栅可使用通用的 3D 打印技术进行制造,大大降低了制作成本,为太赫兹波段的大面积波前调控器件提供了新的制备途径。另外,人们还尝试利用石墨烯这种二维材料构成超构光栅,实现了太赫兹波段的动态电磁波衍射级调控^[57]

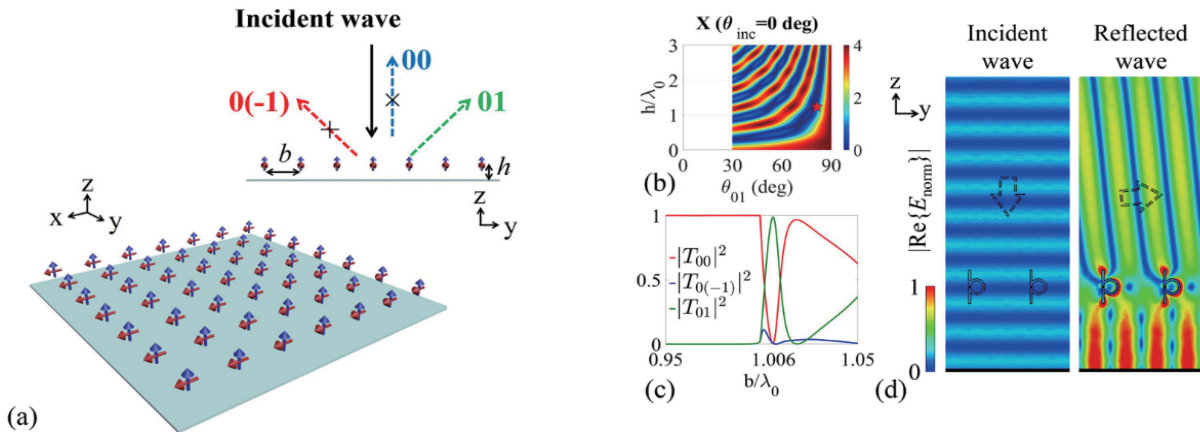


图 3 反射型非对称结构超构光栅^[28]。(a)由电共振与磁共振相互垂直的双各向异性单元结构阵列构成的超构光栅及其发生的非对称完美衍射示意图;(b)正入射情况下的相消因子参数扫描图;(c)图 3(b)五角星处归一化频率对应的各个衍射级的衍射效率;(d)入射场和反射场在设计频率处的分布

Fig. 3 Asymmetric reflection metagrating^[28]. (a) Metagrating composed of bianisotropic unit cells array with perpendicular electric resonance and magnetic resonance as well as schematic of asymmetric perfect diffraction; (b) parameter scanning image of cancellation factor under normal incidence; (c) diffraction efficiency of each diffraction order corresponding to normalized frequency denoted by red star in Fig. 3 (b); (d) distributions of incident and reflected fields at designed frequency

2.2 透射式超构光栅

透射式超构光栅在反射端和透射端都存在多衍射级的辐射模式,光栅基元结构的共振模式不但要抑制反射端的所有衍射级次,还要抑制透射端的一部分衍射级次,最终使入射光只沿 T_1 (或 T_{-1}) 方向传播。更多级次的辐射通道抑制需要通过多个共振模式的相互干涉才能实现。对于斜入射的情况,需要偶极模式与单极模式的耦合^[60];而对于正入射的情况,则需要更多局域共振模式参与复杂干涉,这样才能使远场光完全沿透射端的某一衍射级出射,同时完全抑制其他辐射通道的远场光^[61-62],这丰富了低折射率光栅的应用场景。在目前研究中,一方面,通过对称基元结构和非对称入射的方式,人们在圆柱形一维超构光栅中理论预言了高效衍射现象^[63];另一方面,在非对称基元 and 对称入射方式上,人们在非对称全电介质纳米 dimer 结构^[64]、鱼型结构^[65]、

在光学频率上,具有对称性破缺的金属纳米结构^[58]和电介质结构^[59]可以获得类似的散射响应,为构建光频段反射式非对称超构光栅提供了有效途径。Estakhri 等^[59]设计并实验验证了一种可见光范围内的背向反射超构光栅。这种超构光栅模拟了利特罗(Littrow)光栅的功能,能够有效地将可见光引导到-1 衍射级并发生回射现象。与传统光栅相比,所设计的超构光栅具有体积轻薄、设计简单等优势。

自由形态结构^[66]、电容负载传输线超晶格结构^[67]等多种结构中实现了正入射情况下的高效非对称衍射。

早在 2011 年, Du 等^[68]便报道了光束在通过高折射率介电圆柱纳米棒阵列时发生的负折射现象。这种负向传输被归因于介电纳米粒子中的偶极共振模式激发。Liu 等^[69]对该圆柱阵列超构光栅进行了系统研究,如图 4(a)、(b)所示。从图 4(b)中的散射截面谱可以看出,超构光栅的晶格耦合对圆柱结构中的电磁多极子的激发具有较大影响,能产生高度不对称散射模式,进而出现完美反射、完美透射及高效率衍射等现象。类似现象也可扩展到由球体和其他不规则形状的均质或非均质粒子构成的二维和三维超构光栅^[70]中,拓宽了超构光栅的应用范围。

基于上述理论研究结果, Wu 等^[71]在近红外波段实验验证了该圆柱阵列超构光栅的负衍射现象。

该实验利用红外摄像机成像的沟槽界面和沟槽侧壁上的散射点来显示光束的传播特性。如图 4(c) 所示,入射光束由透镜光纤引导,当入射角分别为 35°、45° 和 60° 时,入射光与纳米柱阵列相互作用,导

致其波前发生明显改变,折射光束均沿负方向传播(折射光束与入射光束位于法线的同一侧),光束偏折度接近 90°。这一奇特现象为光通信中的晶片光束控制(如转向、路由及滤波)开辟了新途径。

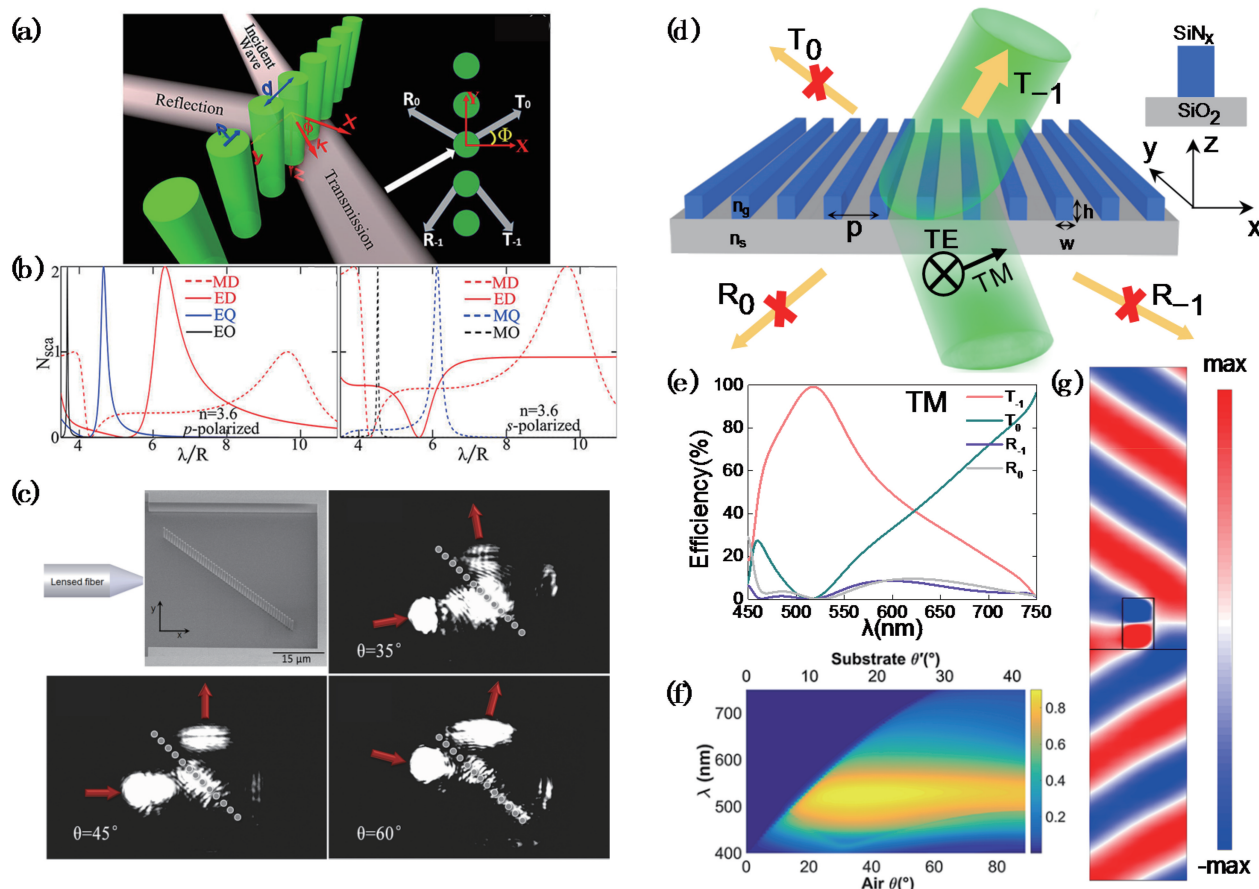


图 4 透射式对称结构超构光栅。(a)全电介质超构光栅对平面波的衍射原理示意图^[69]; (b)分别由 p 极化波和 s 极化波激发的全电介质超构光栅的电磁多极子的归一化散射谱^[69]; (c)全电介质超构光栅实现宽入射角光束偏折的实验演示^[71]; (d)透射式氮化硅超构光栅的原理图^[72]; (e)完美透射端衍射的理论效率图^[72]; (f)大角度宽带的 -1 级衍射效率图^[72]; (g)完美透射端衍射的磁场图^[72]

Fig. 4 Symmetric transmission metagrating. (a) Principle diagram of plane wave diffraction from all-dielectric metagrating^[69]; (b) normalized scattering spectra of electromagnetic multipoles excited by p-polarized wave and s-polarized wave, respectively^[69]; (c) experimental demonstration of realization of beam bending with all-dielectric metagrating^[71]; (d) schematic of transmission SiNx metagrating^[72]; (e) theoretical efficiency diagram of perfect transmission end diffraction^[72]; (f) -1th order diffraction efficiency diagram for large angle and wide bandwidth^[72]; (g) magnetic field pattern of perfect transmission end diffraction^[72]

上述圆柱阵列超构光栅虽然能实现高效负衍射,但由于结构限制,尚不能实现 100% 衍射效率的透射端完美衍射。Deng 等^[72]设计了一种矩形阵列的全电介质超构光栅[如图 4(d)所示],由于矩形结构(具有长、宽两个结构自由度)中多种电磁多级子模式调节的灵活性,该超构光栅可以获得 100% 衍射效率的透射端完美衍射。当横磁(TM)波入射光从底部斜入射该矩形超构光栅时,在 30° 入射角下,

532 nm 波长处可得到透射端的完美衍射[场分布如图 4(g)所示],即 -1 级透射衍射效率达到 100% [图 4(e)],而其他衍射通道被完全抑制。在超宽的入射角范围内,该矩形超构光栅均具有高衍射效率[图 4(f)],为实际应用提供了便利条件。Shi 等^[73]利用高折射率的硅材料设计了类似的矩形超构光栅,经过设计改进,在理论上可以实现衍射效率接近 1 的异常衍射和大角度偏折。散射矩阵法的分析结

果表明,这种特殊的光束转向是由两种最低传播波导阵列模的耦合造成的,对高衍射效率(如 90% 以上)的角度容忍度达 33° 以上,并且其宽角性能不受材料损失和色散的影响,为未来高性能波前整形的应用提供了优良平台。

在透射式非对称超构光栅研究方面, Khorasaninejad 等^[64]率先采用电介质非对称双脊波导(DRWs)作为超构光栅的相移基元结构,通过亚波长距离的波导传输来调控相位。如图 5(a)所示。通过对 DRWs 的色散响应进行设计,该超构光栅能够在 1200~1600 nm 的宽频范围内有效地对光进行定向偏折。Fan 等^[61]利用四个共振模式共存的双各向异性超构光栅实现了正入射下的透射端完美衍射,结构如图 5(b)所示。全介质超构表面通常具有相对较大的厚度,这使其自身适用于设计可支持各种复杂共振的亚波长结构。通过耦合模式分析,这些共振模提供了多个正交的电磁辐射模式,可以抑制多余的透射与反射,最后仅保留一个衍射级次。由于破坏了光栅单元结构的镜像对称性,正入射的电磁波通过近场耦合激发出两种“暗”共振模式,模式之间的相消干涉最终导致完美定向衍射的出现。图 5(c)所示为 Khaidarov 等^[65]设计的一种鱼型结构超构光栅,它克服了超高角度(80° 以上)光束弯曲的限制。这种单结构产生的高效衍射现象是通过对纳米天线的散射模式进行精确设计来实现的。结果表明,这种鱼型超构光栅在可见光波段-1 衍射级的工作效率可达到 90%(绿光波段)与 50%(蓝光波段)。图 5(d)所示为 Shi 等^[74]提出的一种接触式双纳米柱超构光栅结构,它能在可见光波段范围内实现宽角宽频高效的非对称衍射。该接触式全电介质双纳米柱单元结构可同时支持多种高阶多级子模式,这些模式之间的相互作用在可见光范围内实现了对入射光的定向散射。由这种定向散射的接触式双纳米柱周期性排列而成的超构光栅能实现带宽达到 250 nm、峰值衍射效率为 90% 的高效宽带非对称衍射现象。这种高衍射现象工作于 $0\sim 90^\circ$ 的宽入射角度范围内,对入射光偏振态不敏感,有望用于实现具有超大角度容忍度、超宽频段的多样功能光衍射器件。

以上复杂的非对称光栅单元结构设计基本是通过模式耦合理论及全波模拟进行结构分析和现象解释的,优化过程较为繁琐。近年来,随着人工智能及逆向设计等先进优化算法的兴起,关于高衍射超构光栅的逆向设计算法也受到了越来越多研究者的

青睐。例如, Sell 等^[66]采用基于伴随优化(adjoint optimization)的拓扑设计方法,构造并实现了自由形态超构光栅,并对这类超构光栅支持的光学模式进行了详细的分析^[75]。如图 5(e)所示,这些器件由不规则的纳米尺度图案组成,该结构支持大量空间重叠的光学模式。由于模式的数量多,每个模式都具有随机的空间模式分布和复杂的模式耦合过程,这为高效超构光栅器件的设计提供了足够的自由度。为了证明这种设计方法的有效性,研究者制作了能够有效将光偏转到 75° 的大角度超构光栅偏折器及波长依赖的光束转向器。通过迭代优化求解,这些光学模式设计的概念还可扩展到非周期、多波长、多功能超构光栅的设计中。

基于神经网络的深度学习同样适用于高衍射超构光栅的优化设计^[76-77],并展现出其特有的优势。图 5(f)所示为超构光栅基元结构的深度学习优化过程。在预设的入射波长及衍射角条件下,从一个随机的初始结构出发,通过神经网络训练进行不断优化,迭代出最终的收敛结构。此收敛结构即为预设条件下能达到最高衍射效率的最优超构光栅基元结构。由于这种设计方法绕开了传统的大量数值模拟以及人工优化的步骤,可以直接省时地找到符合要求的最优超构光栅基元结构,提供了衍射光学元件设计的新思路。

2.3 可重构超构光栅

可重构超构光栅是指在不改变超构光栅的几何形状下,通过外界激励介入调控的方式^[78-81]来改变超构光栅的散射特性,从而在单一器件上实现多种波前调控功能的超构光栅。可重构超构光栅可极大提高光栅器件波前操控的灵活性。

如图 6(a)所示, Alù 等^[79]率先提出了一种由两组对称的金属-石墨烯-金属夹心结构组成的新型可重构超构光栅。对一个单元结构内的两个夹心结构,分别设置不同的偏压 V_a, V_b , 通过改变两个偏压的大小,便可实现对单元结构中两个石墨烯化学势能的独立调控,进而影响两个对称结构的等效电导率,实现 1 级衍射方向的动态调控。当两偏压数值为 0 时,两组夹心结构可视为完全对称结构,入射光沿正入射或者 $T_{\pm 1}$ 级入射时,衍射光将沿原路返回。当两偏压设置为不同数值时,两组夹心结构构成非对称结构,此时超构光栅可实现非对称的异常衍射。研究者对电容负载传输线超构光栅进行了深入研究,提出了一种透射型的可重构超构光栅^[80]。这种超构光栅可以通过改变传输线的电容特性,实

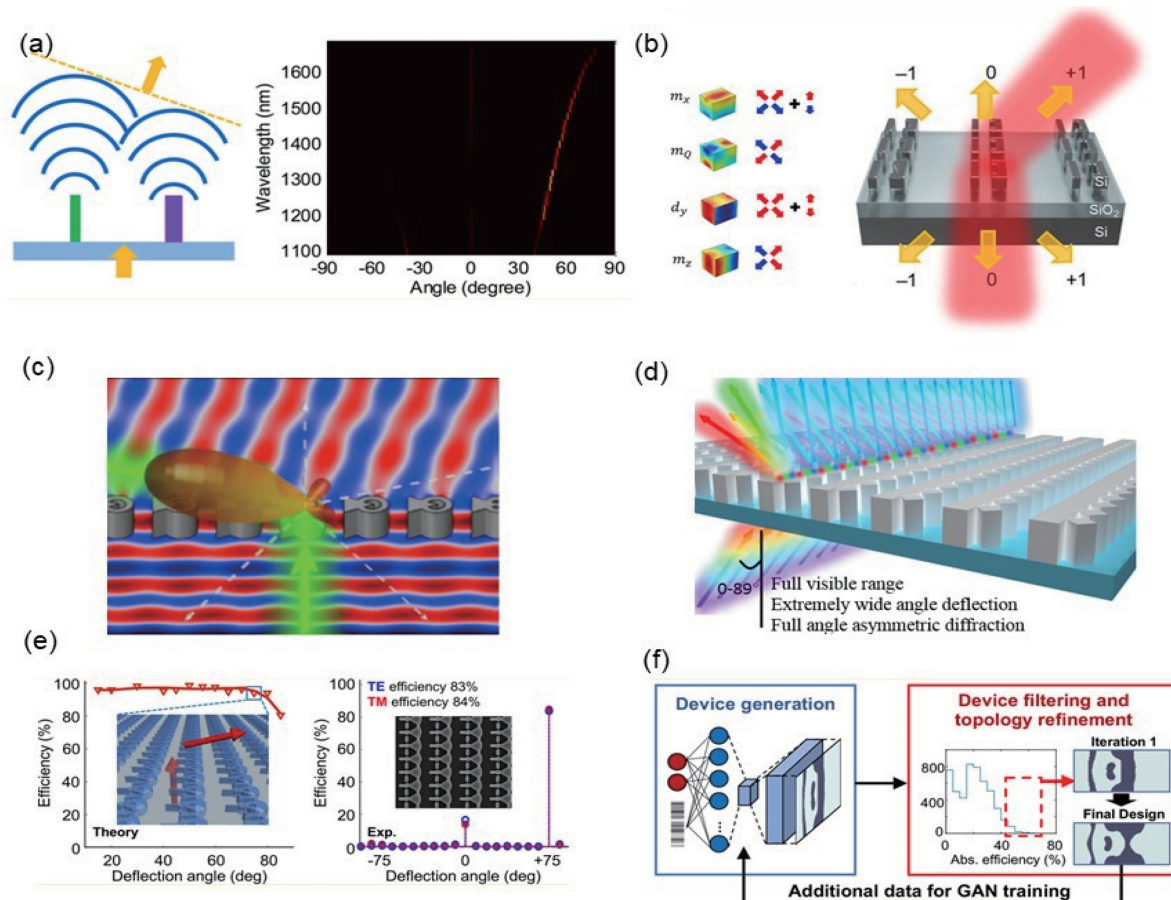


图 5 透射式非对称结构超构光栅。(a)以一定的相位差在自由空间中辐射的具有不同宽度的介质双脊波导(左)及双脊超构光栅的远场响应图(右)^[64];(b)透射式双各向异性超构光栅的异常衍射^[61];(c)鱼型结构透射式超构光栅^[65];(d)宽波段大角度非对称衍射接触式双纳米柱超构光栅^[74];(e)拓扑设计方法构造的自由形态超构光栅^[66];(f)深度学习算法生成的超构光栅^[77]

Fig. 5 Asymmetric transmission metagrating. (a) (Left) dielectric double-ridge waveguide with different widths and free-space radiation under certain phase difference and (right) far-field response image of double-ridge metagrating^[64]; (b) extraordinary diffraction of bianisotropic transmission metagrating^[61]; (c) transmission metagrating with fish-shaped structure^[65]; (d) broadband large-angle asymmetric diffraction kissing double-nanopillar metagrating^[74]; (e) freeform metagrating constructed using topological optimization^[66]; (f) metagrating constructed by deep learning^[77]

现异常反射、异常透射以及透反射通道能量的任意分配。另外,利用超构光栅还可以构建相干完美衍射^[81],实现光调制光的动态过程,即通过正反两面两束正入射光之间的相位差,实现 0 级衍射能量与 -1 级衍射光能量分配的连续变化过程。

图 6(b)所示为一种机械可调的可重构自旋锁定超构光栅^[82]。利用单元结构内两个 C 型金属环所提供的磁共振响应,在超构光栅 T_{-1} 级异常散射通道上可实现横电(TE)与 TM 两偏振态之间的相互转化。基于这种特殊的偏振转化效果,可实现对右旋或左旋圆偏振光的自旋锁定反射。由光栅方程可知,TE 和 TM 偏振光实现 T_{-1} 级异常反射的入射角不随工作频率的变化而变化,而只与光栅周期

相关。金属结构设计在一种折纸型的可拉伸材料上,可以通过拉伸实现超构光栅周期的连续变化,实现不同入射角情况下的自旋锁定反射。

3 相位调制型超构光栅对任意波前的调控

3.1 超构光栅透镜

超构光栅可对光束实现高效、大角度偏折,这种独特优势常常被用于大数值孔径超透镜的设计。对于相位梯度型超表面超透镜而言,随着数值孔径的增大,超透镜的聚焦效率会大幅降低。相反,由多个半径渐变的硅圆柱组成的超构光栅超透镜则可实现近红外波段大数值孔径聚焦的功能^[83]。这种超构

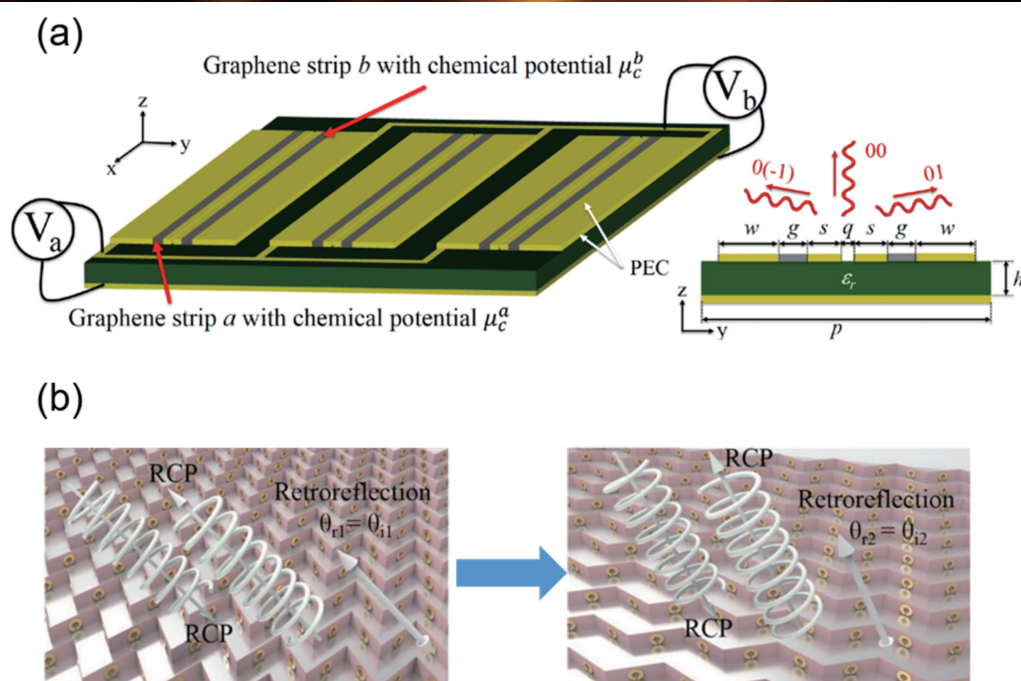


图 6 可重构超构光栅。(a)由金属-石墨烯-金属夹心结构组成的可重构超构光栅示意图^[79];

(b)可重构自旋锁定反射超构光栅在不同入射角情况下实现右旋圆偏振光的自旋锁定反射示意图^[82]

Fig. 6 Reconfigurable metagrating. (a) Schematic of reconfigurable metagrating composed of metal-graphene-metal sandwiched structure^[79]; (b) schematic of spin-locked reflection of right-handed circularly polarized beam under varying incident angles with reconfigurable spin-locked reflection metagrating^[82]

光栅透镜基于菲涅耳波带相位分布的设计[图 7(a)],要求单元结构内圆硅柱的个数随着光栅周期的减小而减小。从实验聚焦效果来看,聚焦光场的分布与艾里斑的分布十分吻合,实际的数值孔径达到了 0.935。圆柱型结构设计使得超透镜对入射光的偏振态响应不敏感,对 s 偏振态及 p 偏振态都具有很强的聚焦效果。由此可见,超构光栅为高数值孔径的超透镜设计提供了便捷高效的新途径。

另一方面,虽然相位梯度型超构表面在大角度偏折方面不具优势,但在小角度偏折方面仍优于超构光栅。结合相位梯度型超表面与超构光栅各自的优势,Kang 等^[84]提出了一种混合型大数值孔径超透镜的设计方案。如图 7(b)所示,在透镜中心区域(光束偏折角小于等于 60° 的范围内)使用相位梯度型超表面,在透镜边缘区域(光束偏折角大于 60° 的范围内)则使用超构光栅结构。对于使用短周期的超构光栅单元结构,虽然可以通过设计轻松实现光束的高效大角度偏折,但如果设计的偏折角度太小,将容易激发高级次衍射级的辐射模以及其他反向散射通道的辐射模,从而降低所需衍射级的转化效率。而相位梯度型超表面正好弥补了这一缺点。这种混合型超透镜在中心区域采用工字型金属结构,通

过改变单元结构的结构参数,获得聚焦所需的二次相位分布。透镜边缘区域则采用非对称光栅结构,也就是通过改变结构参数,获得大偏折角下的高效衍射效果。通过这种设计,可以将超透镜的数值孔径进一步提高到 0.98,同时保持 47.9% 的聚焦效率。这种混合型超透镜不仅在超薄微波成像、雷达探测等领域具有潜在应用价值,同时为太赫兹或光波段的超透镜设计提供了新的思路。

上述超透镜无论是在可见光波段还是在微波段,一般都针对一个固定波长进行聚焦。在考虑多波长聚焦或者白光聚焦时,由于材料的色散特性以及相位调控方式带来的内在色散关系,不同波长的光束经过超透镜将汇聚到不同的焦点处,即产生色差效应。由此衍生出来的色散管理设计成为目前超透镜设计中的重中之重。

Deng 等^[85]使用多个亚波长金属狭缝光栅组合的方式,设计了一种具有广角性能的离轴消色差超构光栅[如图 8 所示]。不同于同轴小角度消色差光束偏折,基于超构光栅的消色差方案能工作在离轴状态,并具有宽角消色差超表面的性能,如图 8(a)所示。对于单波长金属狭缝超构光栅,随着狭缝深度的增大,光栅周期加长,超构光栅的共振波长将向

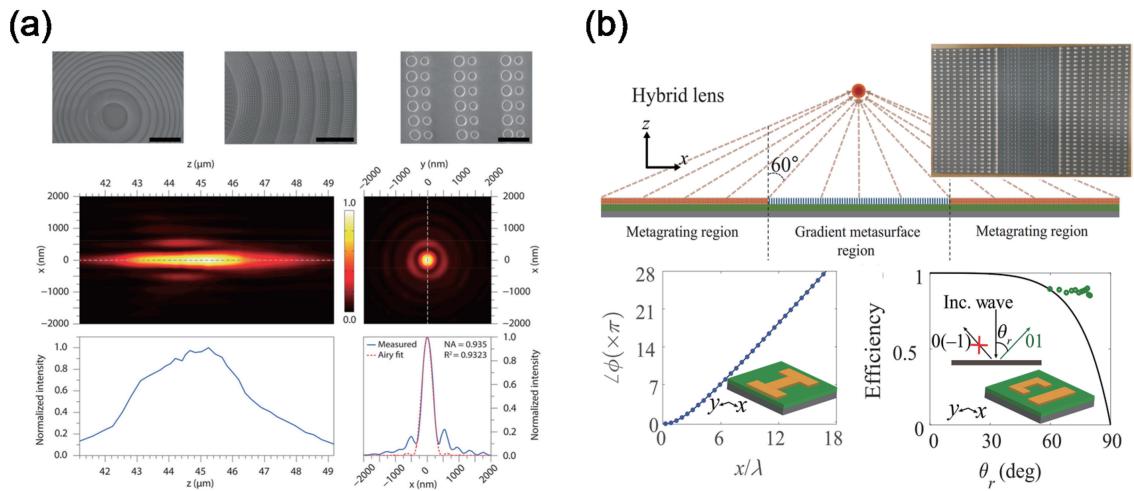


图 7 具有大数值孔径的超构光栅透镜的应用。(a)(上)电镜下展示的超透镜结构图(从左到右标尺分别为 $10\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $500\ \text{nm}$), (中)超透镜在 xz 平面、 xy 平面的聚焦光场分布图, (下)在 $x=0$ 处沿 z 方向的归一化强度图以及在 $z=45.05\ \mu\text{m}$ 处沿 x 方向的归一化强度图^[83]; (b)(上)混合型超透镜的设计示意图与实际的超透镜示意图, (下左)相位梯度型超表面区域的单元结构示意图及对应的相位分布图, (下右)实现光束大角度偏折的超构光栅单元结构示意图以及超构光栅结构在不同衍射角下的衍射效率(圆点)与相位梯度型超表面的衍射效率(实线)^[84]

Fig. 7 Applications of metagrating lenses with large numerical aperture. (a) (Upper) SEM images of metagrating lens are displayed (scale bars indicating $10\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, and $500\ \text{nm}$ from left to right), (middle) focal field distributions of metalens in xz plane and xy plane, and (down) normalized intensity map along z direction at $x=0$ and normalized intensity map along x direction at $z=45.05\ \mu\text{m}$ ^[83]; (b) (upper) design diagram of hybrid metalens and actual metalens (bottom left) phase distribution and structure diagram of phase-gradient metasurface, (bottom right) structure diagram of wide angle deflection metagrating, diffraction efficiencies of metagrating (dot) and diffraction efficiencies of phase-gradient metasurface (solid line) under different diffraction angles^[84]

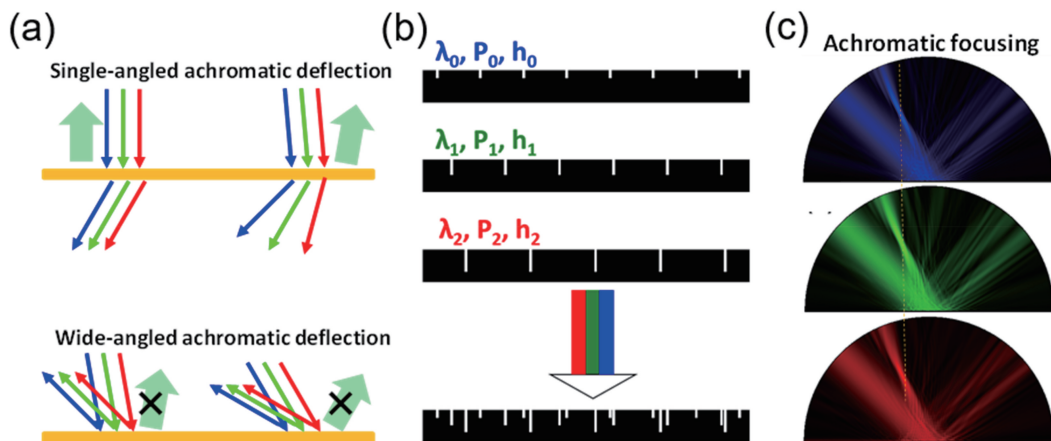


图 8 超构光栅的消色差聚焦^[85]。(a)同轴小角度消色差超表面的光束偏折与离轴宽角消色差超表面的光束偏折示意图; (b)离轴宽角消色差金属狭缝超光栅的结构示意图; (c)消色差聚焦效果图

Fig. 8 Achromatic focusing of metagrating^[85]. (a) Schematics of beam deflection of coaxial small-angle achromatic metasurface and off-axis wide-angle achromatic metasurface; (b) structural diagrams of off-axis wide-angle achromatic metal groove metagrating; (c) effect diagrams of achromatic focusing

长波方向移动。通过设计三个不同的狭缝深度与光栅周期,可在超构光栅三个不同共振波长处($440, 550, 660\ \text{nm}$)激发对应的局域等离子激元模式,如图 8(b)所示。当入射角在 $10^\circ\sim 80^\circ$ 的超宽范围内

时,由共振模式所引起的异常衍射在不同入射角情况下都能保持很高的衍射效率,这为超宽角度多波长调控器件的实现提供了条件。同时,由于三个共振波长的间距要大于各共振峰的线宽,将这三个

波长对应的超构光栅结构组合成一个超构光栅后,便可对不同波长进行独立的相位调控。而每个基本光栅的共振波长与光栅周期的比值是固定的,通过合理的相位分布设计,便可实现三个不同波长的离轴消色差聚焦的功能[如图 8(c)所示]。这种组合金属超构光栅的设计为基于超表面的超薄、便携式成像和显示器件与系统的实际应用奠定了基础。

除了超构透镜的应用之外,超构光栅对光束波前的调控远不止实现异常衍射这一种。一种能同时支持超常光学透射(EOT)、全反射(TIR)以及超常光学衍射(EOD)的多功能超表面结构[图 9(a)]展示了超构光栅波前调控的多样性与灵活性^[86]。此器件由嵌入在非对称介质环境中的亚波长金属狭缝超构光栅组成。区别于一般的金属狭缝超构光栅设

计,本设计除了反射端的散射通道外,透射端的散射态也可以被激发。通过改变入射角,便可以将金属狭缝中的共振腔模式耦合到透射端 T_0 级和反射端 R_{-1} 级的辐射模上,分别实现超常光学透射和超常光学衍射[如图 9(b)所示]。由于所设计的超构表面处于非对称的背景空间,当入射光入射超表面的角度大于临界角时,将会发生全反射。这里的全反射为超常光学透射与超常光学衍射两个辐射模式之间的过渡模式。通过对该超构光栅进行二次相位分布调制,可以在异常反射端实现光束离轴聚焦[图 9(c)],并且不影响超常光学透射以及全反射功能的实现。这一多功能超构光栅设计方案不仅丰富了超构光栅波前调控的多样性,还为开发单片多功能集成光子器件提供了便捷有效的平台。

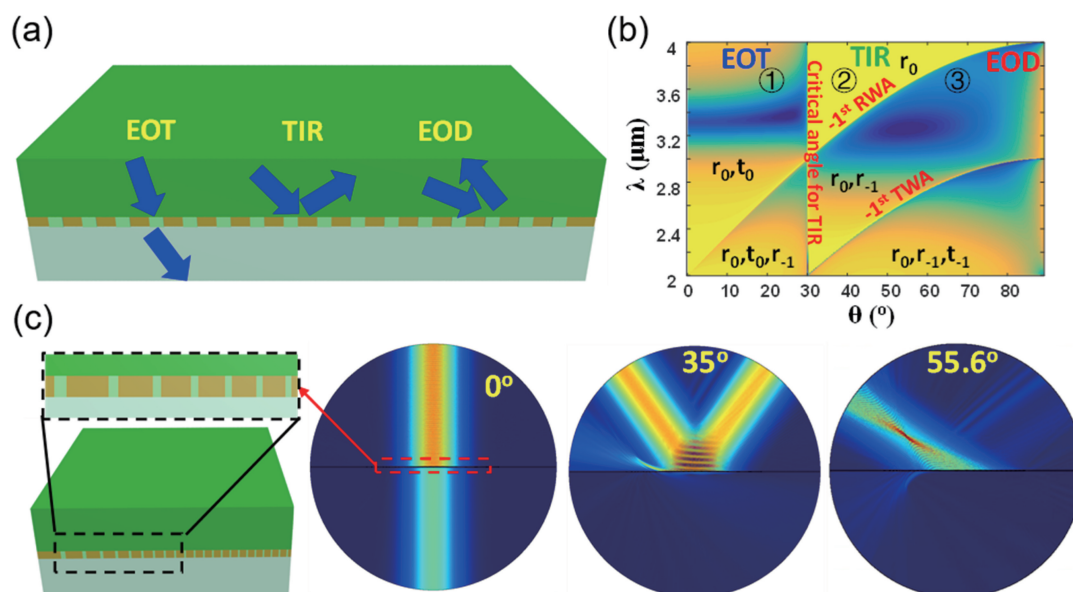


图 9 超构光栅角度选择性多功能器件^[86]。(a)多功能超表面实现异常透射、全反射以及异常衍射的过程示意图;(b)不同入射角及入射波长情况下异常透射、全反射以及异常衍射的相位分布图;(c)不同入射角情况下异常透射、全反射以及异常衍射聚焦的数值模拟图

Fig. 9 Multifunctional device with angle selectivity of metagrating^[86]. (a) Flow chart of extraordinary optical transmission (EOT), total internal reflection (TIR) and extraordinary optical diffraction (EOD) of multifunctional metasurface; (b) phase profiles of EOT, TIR and EOD at different incident angles and incident wavelengths; (c) numerical simulation results of EOT, TIR and EOD focusing at different incident angles

3.2 超构光栅全息

超构光栅对波前的灵活调控不仅可以被应用到大多数孔径透镜领域,也可应用于大角度全息显示系统。利用基于亚波长纳米超构光栅结构的超构全息,可实现传统全息术难以实现的诸多功能,包括色散管理、大视角重现像、多维度光波前调控等新型功能。利用超构光栅,Khorasaninejad 等^[32]在全电介质超构光栅中,基于迂回相位编码实现了宽带全息,

如图 10(a)所示。这种全息超表面使用电介质微结构光栅取代原本二元全息图中的狭缝设计,实现了从可见光到近红外的超宽带全息重现像。在使用迂回相位进行相位编码时,通过改变两像素单元之间的距离,可实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位调控。在纳米加工工艺中,位置的精度控制比结构形状大小的精度控制容易得多,迂回相位调制的超构光栅大大降低了加工难度与加工成本。

迂回相位调控也可运用到近完美衍射超构光栅平台上^[29]。如图 10(b)所示,利用亚波长尺寸的长方形金属棒构成超构光栅单元结构,在不改变金属纳米棒形状、大小及转角的情况下,利用迂回相位编码的调控方式,实现了光场相位的宽频段宽角度高效率连续调控。不同于传统迂回相位中通光孔径衍射效率低、存在孪生像等缺点,这种超构光栅采用精心设计的金属纳米棒替代传统的通光孔结构,金属纳米棒的局域表面等离子共振效应可以将光衍射效率增强到 90% 以上,并完全抑制 0 级光。同时,由于超构光栅具有大角度容忍度即超宽角度响应的特点,所设计的全息超表面在入射光接近掠入射(入

射角为 87°) 的情况下,仍可清晰成像,这是传统衍射全息所不具备的优势,为宽角度范围内的波前调控、全景全息等应用提供了优良平台。

图 10(c)所示为迂回相位位移编码方式在透射式完美衍射超构光栅上的应用^[72]。该超构光栅由氮化硅材料构成,这种材料在可见光波段具有很低的吸收损耗,且具有相对较高的折射率,在设计光栅单元结构时应尽可能减小光栅高度,以降低制备难度。此全电介质超构光栅全息工作于整个可光波段范围内,具有极大的角度、波长、偏振容差,大大降低了设计和制备的复杂性,在开发各种波前调控的实际应用方面展现了十足潜力^[87]。

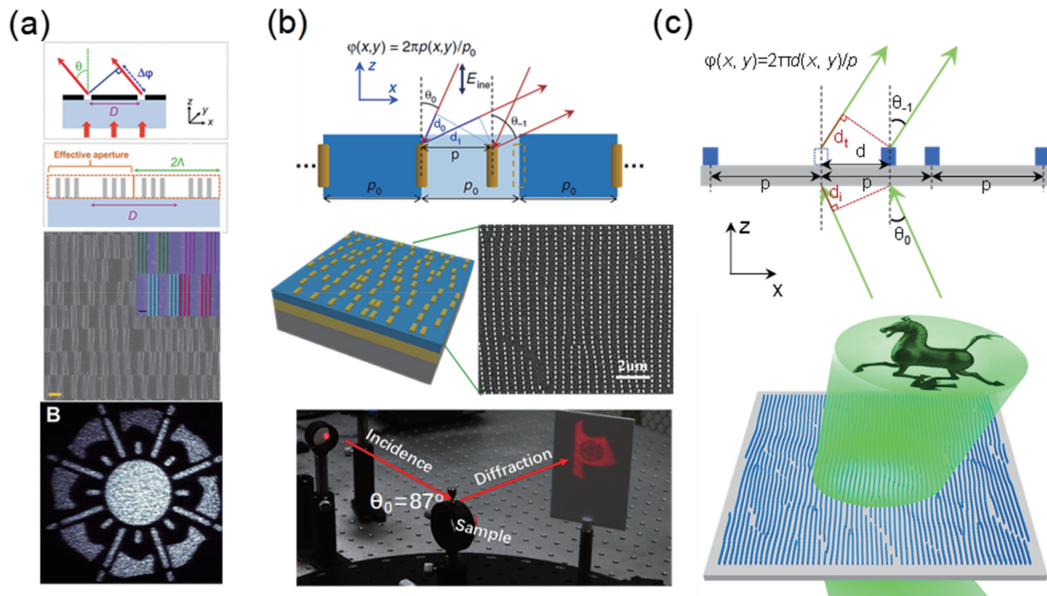


图 10 具有超大角度容忍度的超构光栅全息的应用。(a)利用亚波长电介质超构光栅和迂回相位设计的全息成像超表面器件^[32]; (b)利用亚波长金属超构光栅设计的具有大角度容忍度的全息超表面器件^[46]; (c)基于完美衍射电介质超构光栅的全息超表面器件^[72]

Fig. 10 Applications of metagrating holograms with ultra-large angle tolerance. (a) Metasurface hologram device designed by sub-wavelength dielectric metagratings and detour phase^[32]; (b) metasurface hologram device with large angle tolerance designed by subwavelength metal metagratings^[46]; (c) metasurface hologram device based on perfect diffraction dielectric metagratings^[72]

4 超构光栅调控自由空间光与表面波波前的集成应用开发

超构光栅除了可以调控自由空间参考波产生的任意表面波前外,还可以通过集成表面波调制任意自由空间波前^[88-92]。如图 11(a)所示,表面等离子超构光栅作为一个从自由空间波到表面波的耦合器,往往被用作激发表面等离子波的典型装置^[88]。当传播的表面等离子波遇到超构光栅时,它将在表面解耦,并沿超构光栅的另一个衍射级次辐射回

自由空间。通过对超构光栅的周期按一定的相位分别进行调制,便可实现表面波与自由空间波之间的任意波前转换。立方相位分布调制的超构光栅耦合器[图 11(b)]通过表面等离子波解耦,可在自由空间中发射准艾里波束^[88]。

这种独特的波前整形技术可用于设计集成在平面上的表面等离子超构光栅微型三维投影仪^[89]。如图 11(c)所示,将输入光源集成到表面器件中,使表面等离子波沿金属表面传播,通过表面结构解耦直接生成所需的三维自由空间全息图像。起解耦作用的

纳米凸点阵列的图样即为所设计的全息图,其由表面等离激元参考波与投影三维全息图像的目标波前之间的干涉图样决定。

另一方面,通过利用各向异性超构原子制备超构光栅,光的偏振状态可以被表面等离激元波源调控^[90]。

如图 11(d)所示,通过设计金属狭缝单元的方向角和相对位移,可以构造出多个不同偏振状态的自由空间全息图像。通过结合表面等离激元的传播方向和偏振选择性散射,将多路偏振复用通道的数目增加到 4 个,打破了传统偏振复用的信道数限制。

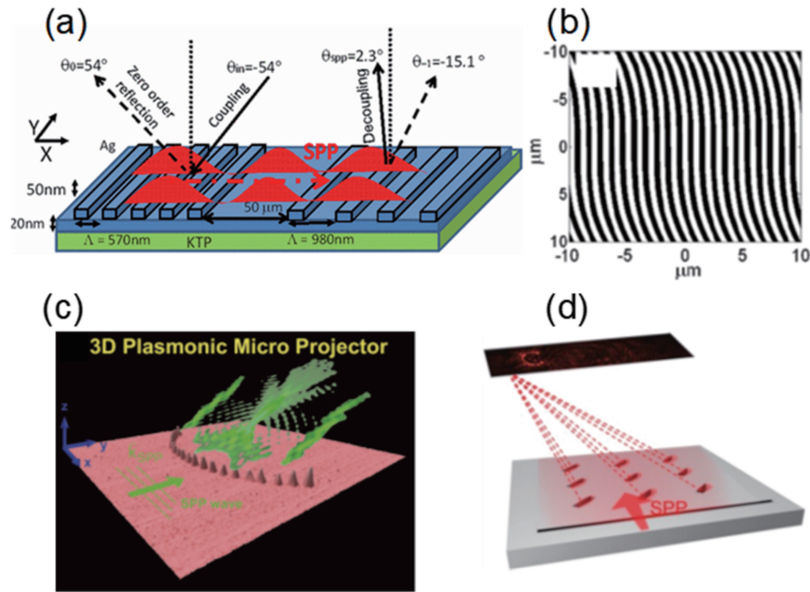


图 11 将表面等离激元(SPP)转化为任意自由光波前的表面波超构光栅。(a)通过超构光栅的衍射级次将 SPP 波转换成自由空间波的原理图^[88]; (b)利用表面等离激元波激发自由空间艾里光束的调制超构光栅^[88]; (c)用作三维等离子体微投影仪的调制金属超构光栅^[89]; (d)可将不同极化和传播方向的 SPP 波转换成自由空间中不同的全息图像的调制金属狭缝超构光栅^[90]

Fig. 11 Metagratings used for converting surface plasma polariton (SPP) into arbitrary free-space wavefront. (a) Schematic of conversion from SPP wave to free-space wave through diffraction orders of metagrating^[88]; (b) modulated metagrating for free-space Airy beam generation by SPP excitation^[88]; (c) modulated metal metagrating used for 3D plasmonic micro-projector^[89]; (d) modulated metallic slit metagrating used for conversion from SPP waves with different polarization and propagation directions to different free-space holographic images^[90]

除了耦合平面波参考光的直超构光栅外,另一类环形超构光栅可用于点源激发的柱面表面波与自由空间光波前的耦合。如图 12(a)所示,该超构光栅由穿孔的金属薄膜和孔周围的一系列圆槽组成^[91]。通过金属薄膜背面的物镜将输入的自由空间光束聚焦,可以激发柱面表面等离激元波。在金属膜的正面,激发出来的柱面表面等离激元波被这些凹槽耦合到自由空间。圆形凹槽的位置经过精心设计,在金属凹槽上方的自由空间中形成一个拉丁字母 L。柱面等离子波的相位分布为 $\varphi(x, y) = n_{spp} k_0 r$, 其中 n_{spp} 为表面等离激元的等效折射率, k_0 为真空中的波矢大小, (x, y) 为空间坐标, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。结合由 L 型图样的光源阵列发射的衍射场,计算全息图像的相位分布函数 $\varphi_{obj}(x, y)$, 圆槽的位置可由两光场间的干涉相长条件确定:

$\varphi_{obj}(x, y) + n_{spp} k_0 r = 2m\pi$, (m 是整数)。所述的调制圆槽如图 12(a)所示,由于全息图相位分布的调制,凹槽纹理可能会出现不连续现象。所设计的 L 形全息图像可直接由成像物镜采集。

这种圆形超构光栅可以进一步与电子元件集成,形成全息光电探测器^[92]。图 12(b)是由给定轨道角动量(OAM)的柱面表面等离激元波与自由空间涡旋光束的干涉图样构成的金属槽形装置。当带有预先设定的轨道角动量拓扑数的涡旋光束照射在结构上时,可以在金属表面产生柱面表面等离激元波并将入射能量聚焦到一个特定的区域。但是,如果入射光束携带的是另一个轨道角动量拓扑数,则产生的表面等离激元波会由于整个系统的总角动量不匹配而散焦。因此,这种表面等离激元波的选择性聚焦可用于灵敏的 OAM 探测。

该探测器的工作过程如下:通过入射光激发表面等离子激元聚焦区域的散射图样,并将散射图连接到光电探测器上,从而实现对 OAM 光的探测。具体来说,当入射光带有与金属圆槽超表面相匹配

的 OAM 时,入射光会产生聚焦的表面等离子激元波,其能量将被光电探测器收集,而携带任何其他 OAM 的入射光会偏离设定的散射模式,因而不会被探测到。

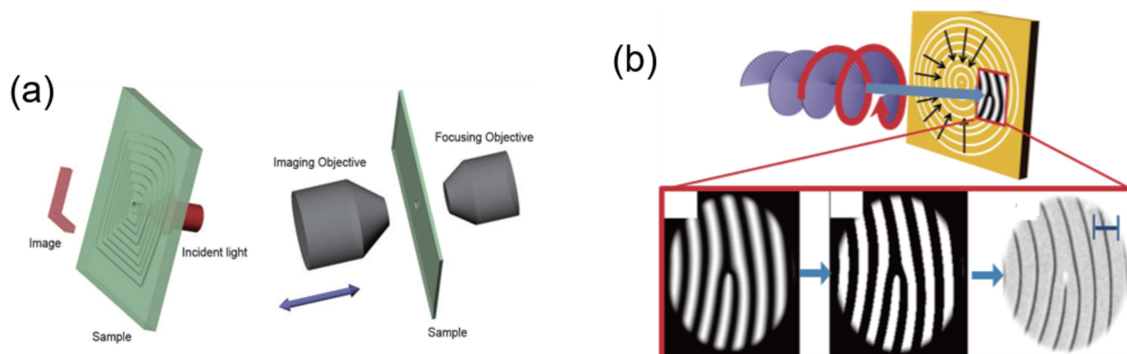


图 12 环形超构光栅用于 SPP 柱面波与任意自由空间光波前的相互转化。(a)一种中心穿孔的圆形金属槽超构光栅^[91];
(b)由 SPP 波与自由空间涡旋光束干涉形成的圆形金属狭缝超构光栅^[92]

Fig. 12 Circular metagratings used for mutual conversion between cylindrical SPP wave and arbitrary free-space wavefront.

(a) Circular metallic groove metagrating with central hole^[91]; (b) circular metallic slit metagrating formed by interference between SPP wave and free-space vortex beam^[92]

5 总结与展望

对近年来利用超构光栅调控衍射光场的研究进行了简要概述。不同种类高衍射效率超构光栅的构建机理已日趋完善,利用超构光栅调控任意形式光波前的技术也得到了长足发展。超构光栅具有调控空间频率范围大、可连续调相、制备精度容忍度大等优点,在大数值孔径成像、角度可调型光器件、大视角全息、片上集成波前调控等领域具有潜在的应用价值。在未来的超构光栅研究中,可以将单元结构近场局域共振模式调控远场多级衍射的基本理念应用到传统光栅的优化与设计过程中,为传统光栅在分光光谱测量、脉冲激光压缩等场景中的应用提供新思路。同时,超构光栅衍射光场调控形式的多样性有利于开发更多新奇的波调控器件,有望在动态光波前调控^[93]、多维度矢量光场调控^[94-98]、片上集成特殊光束激光器^[99-101]等方面发挥重要作用,并向诸如声学^[102-108]等其他领域扩展。

参 考 文 献

[1] 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.
[2] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-

limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.

- [3] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: Versatile multifunctional photonic components[J]. Science, 2017, 358(6367).
- [4] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [5] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 426-431.
- [6] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [7] 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.
- [8] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. Nature Communications, 2017, 8: 187.
- [9] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.
- [10] 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.
- [11] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [12] Wen Y, Chremmos I, Chen Y, et al. Spiral transformation for high-resolution and efficient sorting of optical vortex modes[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(19): 193904.
- [13] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, et al. Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(1): 15-21.
- [14] Guo X Y, Li P, Zhong J Z, et al. Tying polarization-switchable optical vortex knots and links via holographic all-dielectric metasurfaces [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(3): 1900366.
- [15] Guo Y H, Huang Y J, Li X, et al. Polarization-controlled broadband accelerating beams generation by single catenary-shaped metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(18): 1900503.
- [16] Henstridge M, Pfeiffer C, Wang D, et al. Accelerating light with metasurfaces [J]. *Optica*, 2018, 5(6): 678-681.
- [17] Henstridge M, Pfeiffer C, Wang D, et al. Synchrotron radiation from an accelerating light pulse[J]. *Science*, 2018, 362(6413): 439-442.
- [18] Fan Q B, Zhu W Q, Liang Y Z, et al. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1158-1165.
- [19] Yu N, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [20] Wu P C, Tsai W Y, Chen W T, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 445-452.
- [21] Ni Y B, Chen S, Wang Y J, et al. Metasurface for structured light projection over 120° field of view [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(9): 6719-6724.
- [22] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [23] Wan W W, Gao J, Yang X D. Full-color plasmonic metasurface holograms [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10671-10680.
- [24] Deng Z L, Li G X. Metasurface optical holography [J]. *Materials Today Physics*, 2017, 3:16-32.
- [25] Wang B, Dong F L, Li Q T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235-5240.
- [26] Zhao R, Sain B, Wei Q, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [27] Deng Z L, Li X P, Li G X. Metasurface holography [J]. *Synthesis Lectures on Materials and Optics*, 2020, 1(4):1-76.
- [28] Ra'di Y, Sounas D L, Alù A. Metagratings: Beyond the limits of graded metasurfaces for wave front control [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(6): 067404.
- [29] Deng Z L, Zhang S, Wang G P. A facile grating approach towards broadband, wide-angle and high-efficiency holographic metasurfaces [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(3): 1588-1594.
- [30] 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.
- [31] Rabinovich O, Epstein A. Analytical design of printed circuit board (PCB) metagratings for perfect anomalous reflection [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4086-4095.
- [32] Khorasaninejad M, Ambrosio A, Kanhaiya P, et al. Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms [J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1501258.
- [33] Yi S, Zhou M, Yu Z, et al. Subwavelength angle-sensing photodetectors inspired by directional hearing in small animals [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(12): 1143-1147.
- [34] Huang K, Liu H, Restuccia S, et al. Spiniform phase-encoded metagratings entangling arbitrary rational-order orbital angular momentum [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 17156.
- [35] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters [J]. *Optica*, 2015, 2(8): 716.
- [36] Lawrence M, Barton D R, Dionne J A. Nonreciprocal flat optics with silicon metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(2): 1104-1109.
- [37] Zhou Z P, Li J T, Su R B, et al. Efficient silicon metasurfaces for visible light [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 544-551.

- [38] Neder V, Ra' di Y, Alù A, et al. Combined metagratings for efficient broad-angle scattering metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 1010-1017.
- [39] Peng C Y, Li L, Qiao Q F, et al. Multifunctional silicon metagratings based on multiple periodicity design [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22 (4): 045103.
- [40] Uleman F, Neder V, Cordaro A, et al. Resonant metagratings for spectral and angular control of light for colored rooftop photovoltaics [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(4): 3150-3156.
- [41] Feng A, Yu Z, Sun X. Ultranarrow-band metagrating absorbers for sensing and modulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28197-28205.
- [42] Wan W Q, Luo M H, Su Y F. Ultrathin polarization-insensitive, broadband visible absorber based rectangular metagratings [J]. *Optics Communications*, 2020, 458:124857.
- [43] Ra' di Y, Sounas D L, Alù A. Metagratings: Beyond the limits of graded metasurfaces for wave front control [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(6): 067404.
- [44] Wong A M, Christian P, Eleftheriades G V. Binary Huygens' metasurfaces: Experimental demonstration of simple and efficient near-grazing retroreflectors for TE and TM polarizations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2892 - 2903.
- [45] Asadchy V S, Wickberg A, Díaz-Rubio A, et al. Eliminating scattering loss in anomalously reflecting optical metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4 (5): 1264-1270.
- [46] Deng Z L, Deng J, Zhuang X, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance[J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 78.
- [47] Epstein A, Rabinovich O. Unveiling the properties of metagratings via a detailed analytical model for synthesis and analysis[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(5): 054037.
- [48] Rabinovich O, Kaplon I, Reis J, et al. Experimental demonstration and in-depth investigation of analytically designed anomalous reflection metagratings [J]. *Physical Review B*, 2019, 99(12): 125101.
- [49] Popov V, Boust F, Burokur S N. Controlling diffraction patterns with metagratings[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 011002.
- [50] Popov V, Yakovleva M, Boust F, et al. Designing metagratings via local periodic approximation: From microwaves to infrared [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044054.
- [51] Wong A M, Eleftheriades G V. Perfect anomalous reflection with a bipartite Huygens' metasurface[J]. *Physical Review X*, 2018, 8(1): 011036.
- [52] Rahmzadeh M, Khavasi A. Perfect anomalous reflection using a compound metallic metagrating [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16439-16452.
- [53] Popov V, Boust F, Burokur S N. Beamforming with metagratings at microwave frequencies: Design procedure and experimental demonstration [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1533-1541.
- [54] Popov V, Boust F, Burokur S N. Constructing the near field and far field with reactive metagratings: Study on the degrees of freedom [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(2): 024074.
- [55] Dong X P, Cheng J R, Fan F, et al. Extremely large-angle beam deflection based on low-index sparse dielectric metagratings[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(24): 245101.
- [56] Dong X P, Cheng J R, Fan F, et al. Low-index second-order metagratings for large-angle anomalous reflection[J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (4): 939-942.
- [57] Behroozinia S, Rajabalipanah H, Abdolali A. Real-time terahertz wave channeling via multifunctional metagratings: A sparse array of all-graphene scatterers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (4): 795-798.
- [58] Alaei R, Albooyeh M, Yazdi M, et al. Magnetolectric coupling in nonidentical plasmonic nanoparticles: Theory and applications[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(11): 115119.
- [59] Estakhri N M, Neder V, Knight M W, et al. Visible light, wide-angle graded metasurface for back reflection [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4 (2): 228-235.
- [60] Du J J, Lin Z F, Chui S T, et al. Nearly total omnidirectional reflection by a single layer of nanorods[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110 (16): 163902.
- [61] Fan Z Y, Shcherbakov M R, Allen M, et al. Perfect diffraction with multiresonant bianisotropic metagratings[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5 (11): 4303-4311.
- [62] Dong X P, Cheng J R, Fan F, et al. Efficient wide-band large-angle refraction and splitting of a terahertz beam by low-index 3D-printed bilayer metagratings[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014064.

- [63] Gan W F, Li W, Du J J, et al. Steering and tuning of on-chip optical beams [C] //2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), August 16-23, 2014, Beijing, China. New York: IEEE, 2014:14693481.
- [64] Khorasaninejad M, Capasso F. Broadband multifunctional efficient meta-gratings based on dielectric waveguide phase shifters [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6709-6715.
- [65] Khaidarov E, Hao H F, Paniagua-Domínguez R, et al. Asymmetric nanoantennas for ultrahigh angle broadband visible light bending [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6267-6272.
- [66] Sell D, Yang J J, Doshay S, et al. Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3752-3757.
- [67] Rabinovich O, Epstein A. Arbitrary diffraction engineering with multilayered multielement metagratings [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1553-1568.
- [68] Du J J, Lin Z F, Chui S T, et al. Optical beam steering based on the symmetry of resonant modes of nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(20): 203903.
- [69] Liu W, Miroschnichenko A E. Beam steering with dielectric metalattices [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1733-1741.
- [70] Panagiotidis E, Almpanis E, Stefanou N, et al. Multipolar interactions in Si sphere metagratings [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(9): 093103.
- [71] Wu A, Li H, Du J, et al. Experimental demonstration of in-plane negative-angle refraction with an array of silicon nanoposts [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 2055-2060.
- [72] Deng Z L, Ye X, Qiu H Y, et al. Transmissive metagrating for arbitrary wavefront shaping over the full visible spectrum [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(40): 20604-20609.
- [73] Shi W Y, Deng W M, Liu W N, et al. Rectangular dielectric metagrating for high-efficiency diffraction with large-angle deflection [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7): 073601.
- [74] Shi T, Wang Y J, Deng Z L, et al. All-dielectric kissing-dimer metagratings for asymmetric high diffraction [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(24): 1901389.
- [75] Yang J J, Sell D, Fan J A. Freeform metagratings based on complex light scattering dynamics for extreme, high efficiency beam steering [J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(1): 1700302.
- [76] Inampudi S, Mosallaei H. Neural network based design of metagratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(24): 241102.
- [77] Jiang J, Sell D, Hoyer S, et al. Free-form diffractive metagrating design based on generative adversarial networks [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8): 8872-8878.
- [78] Tan Z Y, Fan F, Dong X P, et al. Nonreciprocal terahertz beam steering based on magneto-optic metagratings [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 20210.
- [79] Ra'di Y, Alù A. Reconfigurable metagratings [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1779-1785.
- [80] Casolaro A, Toscano A, Alù A, et al. Dynamic beam steering with reconfigurable metagratings [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1542-1552.
- [81] Zhang Z Y, Kang M, Zhang X Q, et al. Coherent perfect diffraction in metagratings [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(36): 2002341.
- [82] Li M, Jing L Q, Lin X, et al. Angular-adaptive spin-locked retroreflector based on reconfigurable magnetic metagrating [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(13): 1900151.
- [83] Paniagua-Domínguez R, Yu Y F, Khaidarov E, et al. A metalens with a near-unity numerical aperture [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(3): 2124-2132.
- [84] Kang M, Ra' Di Y, Farfan D, et al. Efficient focusing with large numerical aperture using a hybrid metalens [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(4): 044016.
- [85] Deng Z L, Zhang S, Wang G P. Wide-angled off-axis achromatic metasurfaces for visible light [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23118-23128.
- [86] Deng Z L, Cao Y Y, Li X P, et al. Multifunctional metasurface: From extraordinary optical transmission to extraordinary optical diffraction in a single structure [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): 443-450.
- [87] Wan W Q, Qiao W, Pu D L, et al. Holographic sampling display based on metagratings [J]. *iScience*, 2020, 23(1):100773.
- [88] Dolev I, Epstein I, Arie A. Surface-plasmon holographic beam shaping [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(20): 203903.
- [89] Chang C M, Tseng M L, Cheng B H, et al. Three-dimensional plasmonic micro projector for light manipulation [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(8): 1118-1123.
- [90] Chen J, Li T, Wang S M, et al. Multiplexed

- holograms by surface plasmon propagation and polarized scattering [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 5051-5055.
- [91] Chen Y H, Huang L, Gan L, et al. Wavefront shaping of infrared light through a subwavelength hole[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(8): e26.
- [92] Genevet P, Lin J, Kats M A, et al. Holographic detection of the orbital angular momentum of light with plasmonic photodiodes [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1278.
- [93] Li S Q, Xu X W, Maruthiyodan Veetil R, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [94] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [95] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Coherent pixel design of metasurfaces for multidimensional optical control of multiple printing-image switching and encoding[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(51): 1805306.
- [96] Bao Y J, Yu Y, Xu H F, et al. Full-colour nanoprint-hologram synchronous metasurface with arbitrary hue-saturation-brightness control [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-10.
- [97] Deng Z L, Jin M K, Ye X, et al. Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(21): 1910610.
- [98] Bao Y J, Ni J C, Qiu C W. A minimalist single-layer metasurface for arbitrary and full control of vector vortex beams[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(6): 1905659.
- [99] Xie Y Y, Ni P N, Wang Q H, et al. Metasurface-integrated vertical cavity surface-emitting lasers for programmable directional lasing emissions [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 125-130.
- [100] Sroor H, Huang Y W, Sephton B, et al. High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(8): 498-503.
- [101] Huang C, Zhang C, Xiao S M, et al. Ultrafast control of vortex microlasers [J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018-1021.
- [102] Fu Y Y, Shen C, Cao Y Y, et al. Reversal of transmission and reflection based on acoustic metagratings with integer parity design[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2326.
- [103] Quan L, Ra' di Y, Sounas D L, et al. Maximum Willis coupling in acoustic scatterers [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(25): 254301.
- [104] Ni H Q, Fang X S, Hou Z L, et al. High-efficiency anomalous splitter by acoustic meta-grating [J]. *Physical Review B*, 2019, 100(10): 104104.
- [105] Hou Z L, Fang X S, Li Y, et al. Highly efficient acoustic metagrating with strongly coupled surface grooves [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034021.
- [106] Chiang Y K, Oberst S, Melnikov A, et al. Reconfigurable acoustic metagrating for high-efficiency anomalous reflection[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(6): 064067.
- [107] Wang Y H, Cheng Y, Liu X J. Modulation of acoustic waves by a broadband metagrating [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7271.
- [108] Fu Y Y, Cao Y Y, Xu Y D. Multifunctional reflection in acoustic metagratings with simplified design[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(5): 053502.