

原子层厚度超表面光场调控原理及应用

李昊 胡德骄 秦飞 李向平

Principle and application of metasurface optical field modulation of atomic layer thickness

LI Hao, HU De-jiao, QIN Fei, LI Xiang-ping

引用本文:

李昊, 胡德骄, 秦飞, 李向平. 原子层厚度超表面光场调控原理及应用[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 851–866. doi: 10.37188/CO.2021–0069

LI Hao, HU De-jiao, QIN Fei, LI Xiang-ping. Principle and application of metasurface optical field modulation of atomic layer thickness[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 851-866. doi: 10.37188/CO.2021-0069

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展

Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers

中国光学. 2018, 11(1): 18 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0018>

超颖表面原理与研究进展

The principle and research progress of metasurfaces

中国光学. 2017, 10(5): 523 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0523>

电磁编码超材料的理论与应用

Theory and application of coding metamaterials

中国光学. 2017, 10(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0001>

二维电子气等离子体元太赫兹波器件

Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas

中国光学. 2017, 10(1): 51 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0051>

电环形谐振腔表面几何参数对太赫兹超材料吸收体性能的影响

Influence of the geometric parameters of the electrical ring resonator metasurface on the performance of metamaterial absorbers for terahertz applications

中国光学. 2018, 11(1): 47 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0047>

偏光全息研究历程与展望

Review and prospect of polarization holography

中国光学. 2017, 10(5): 588 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0588>

原子层厚度超表面光场调控原理及应用

李昊¹, 胡德骄², 秦飞¹, 李向平^{1*}

(1. 暨南大学光子技术研究院 广东省光纤传感与通信重点实验室, 广州 511443;
2. 广东紫晶信息存储技术股份有限公司, 广州 511443)

摘要:超表面由亚波长尺度二维人工微结构构成, 可以实现对光场振幅、相位、偏振等多参量进行调控, 为光场调控提供了优良平台。二维材料作为一种新型层状结构材料, 相对于三维体材料有着十分独特的光学和电学特性, 其与超表面结合为纳米尺度平面光学器件的发展提供了新的可能。本文综述了基于原子层厚度的二维材料超表面发展, 介绍了多种二维材料超表面光场调控机制、制备以及应用, 最后对原子层厚度超表面发展面临的挑战和潜在应用进行展望。

关键词:超表面; 光场调控; 二维材料; 全息

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0069

Principle and application of metasurface optical field modulation of atomic layer thickness

LI Hao¹, HU De-jiao², QIN Fei¹, LI Xiang-ping^{1*}

(1. Institute of Photonic Technology, Jinan University, Key Laboratory of Fiber Optic Sensing and Communication in Guangdong Province, Guangzhou 511443, China;

2. Guangdong Amethystum Storage Technology Co., Ltd., Guangzhou 511443, China)

* Corresponding author, E-mail: xiangpingli@jnu.edu.cn

Abstract: Metasurfaces, composed of subwavelength-scale artificial nanostructures, can realize the versatile modulation of multiple attributes of light such as amplitude, phase and polarization, providing an excellent platform for nanophotonic devices. As a new type of layered material, 2D materials manifest peculiar optical and electrical properties compared to 3D bulk materials. The combination of 2D materials with metasurfaces offers new possibilities for the development of nanoscale planar optical devices. This paper reviews the development of metasurfaces based on 2D materials with atomic thicknesses, introduces the mechanism of light field modulation of various 2D material metasurfaces. An outlook on the challenges and potential applications for the development of atomic layer thickness metasurfaces are provided finally.

Key words: metasurface; light field modulation; two-dimensional materials; holography

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2018YFB1107200); 国家自然科学基金项目(No. 61705084); 广东省创新创业项目(No. 2016ZT06D081)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1107200); National Natural Science Foundation of China (No. 61705084); Innovation and Entrepreneurship Project of Guangdong Province (No. 2016ZT06D081)

1 引言

伴随着研究对象从宏观到微观的转变,光学的发展经历了从被动利用自然界材料来控制光场传播到通过人工合成自然界并不存在的新型超材料^[1-3]来实现对光场的操纵。对于传统光学调制器件来说,实现高度集成化、小型化的光学系统十分困难。人工超材料正是利用微观尺度的光学共振实现对有效介电常数和有效磁导率的人为操控,进而调控光波的电场分量和磁场分量,从而影响光波的传播行为。随着微纳加工技术和集成光子学的发展,利用纳米共振结构实现光场的近场和远场调控成为研究的热点。由于三维超材料结构复杂,纳米加工难度大,光学损耗高,很难将其付诸于实际应用。将共振结构制备到平整材料表面可构成能对光的振幅、相位、偏振等参量进行调控的结构化功能表面,也被称作超表面(metasurface)^[4-7]。这种调控光的方式较易加工且能实现丰富的光调控能力,为推进超材料的应用与发展铺平了道路。

近年来,基于超表面的研究成果一直层出不穷。2011年,哈佛大学 Capasso 团队利用 V 型金纳米结构序列首次实现了超表面设计后^[8],超表面在实现光场调控方面的技术飞速发展。在偏振调控^[9-12],全息成像^[13-18],超透镜^[19-22]和表面波耦合器^[23-25]等方面有着广泛的应用。当前超表面对波前相位调控的机制可以归纳为如下几类,例如 Pancharatnam-Berry(PB)相位^[26-28]、共振相位^[16, 29]、传输相位^[30-31]及迂回相位^[32-34]调制方式。Pancharatnam^[35]和 Berry^[36]相继发现了几何相位的关系,当圆偏振光入射到结构上时,会产生与入射光旋向相反的交叉圆偏振光,而通过适当的结构设计可以达到旋转光轴的效果,光轴与坐标轴的夹角会发生改变,从而交叉圆偏振光的相位就得到了调控。在此之后, Lin 等利用 PB 相位原理设计了 Si 纳米天线的光栅式超表面,演示了透镜的聚焦^[37]。PB 相位超表面器件的效率依赖于圆偏振光的交叉转换效率,通常与纳米结构支持的局域模式相关,此类超表面器件的厚度通常在数十纳米至百纳米量级^[38]。此外,还可以利用共振结构相位调控特性对光场的波前进行调控进而控制光束在界面处的折射、反射和衍射等特性。其中一种显著特性就是能够对光波幅进行调控,体现在

光谱上对不同波长出现选择性地反射或者透射,使得某些成分的光在光谱里占据更多的比例。这种谱线调制的直观体现就是纳米结构显色特性,利用这一特性可以将纳米结构制成彩色像素,从而实现超高分辨率的显示。该类超表面器件微纳结构的厚度通常在数十纳米至百纳米量级,以支持模式共振^[7, 39]。传输相位型调控是通过操纵电磁波波前在传输过程中产生的光程差来实现相位调控,目前常用构建传输相位型超表面的方法可分为两类:一类基于表面等离子体波导理论中传播常数随介质宽度变化的特性^[40-41],另一类基于介质等效折射率理论中利用两种或多种介质在单元结构内的比例差,实现结构对光波前的调制^[42-43]。全电介质高折射率材料的高效率以及不同几何形貌所支持的传输相位调控能力,使得全电介质超表面被广泛应用于全息及超透镜等光场调控器件^[31, 37, 44]。然而为了实现大的相位调制,全电介质超表面的厚度通常在数百纳米接近波长的量级。迂回相位最初由 Lord 等人用于研究具有周期误差的衍射光栅是如何通过调制波前影响干涉图样的,后由 Brown 等人用到相位全息图中^[45],对于一个二维阵列结构,可以通过改变狭缝在每个周期的位置偏移量来实现 $0-2\pi$ 相位。与纳米天线结构相结合, Deng 等人开发了具有偏振和相位独立调控自由度的双原子迂回相位超表面,其厚度为数十个纳米^[33]。

然而,上述几类超表面光场调控机制让进一步压缩超表面器件厚度,实现纳米级超薄平面光场调控器件面临巨大的挑战。自 2004 年石墨烯^[46]首次被剥离出来,引发了人们对原子级超薄材料在电子学和光电子学方面独特性能的浓厚兴趣,过渡金属二卤化物^[47-48](TMDs)、六方氮化硼(hBN)^[49-50]和黑磷^[51]等陆续被发现并迅速发展。单层的二维纳米材料是一种由原子或分子构成的二维晶格,其厚度一般在亚纳米尺度。层内由较强的共价键或离子键连接,单层二维材料之间由作用力较弱的范德瓦耳斯力结合,构成了多层的二维材料。由于其纵向尺寸远小于横向尺寸的这种量子限制效应,这些二维材料展示出与其对应的体材料截然不同的性质,有着十分独特的光学和电学特性,例如高度可调的带隙^[52]、能谷-光子自旋耦合^[53]、较强的光-物质相互作用^[54]、超高的电荷载流子迁移率^[55],优良的导热性^[56]。由于 TMDs 具有带隙连续可调^[52],高折射率^[57]等

优势, 已成为二维材料研究领域中的重点研究对象。尤其原子层厚度的二维材料与超表面光场调控相结合衍生的新颖光场调控平面光学器件取得了快速发展。

本文围绕近年来快速发展起来的基于二维材料超表面光场调控器件, 从不同类超表面构型的光场调控物理机制出发, 综述了二维材料超表面光场调控的原理、制备及主要应用, 并且对未来发展的新方向和面临的挑战进行了预测和展望。

2 多层二维材料全电介质光场调控

由于过渡金属二硫化物(TMDCs)具有高折射率的特性, 可以作为全电介质材料用于先进光学和电子功能的激子平台。这种特性开辟了利用

它们构建亚波长尺寸形貌相关的米氏模式(Mie)共振纳米天线的可能。查尔姆斯理工大学 Mikael Käll 研究团队引入 TMDC 纳米天线的概念^[58], 利用多层 WS₂ 的高折射率特性所支持的 Mie 共振和 anapole 状态, 如图 1 所示。在可见光范围内多层 WS₂ 面内介电常数实部大于 16, 面外只有 7 左右(图 1(a)), 他们首先模拟了 WS₂ 纳米盘的散射特性, 发现在纳米圆盘高度为 200 nm 时, 散射强度与纳米圆盘半径在 700 nm 波长以上呈线性增强关系, 在 940 nm 的共振峰处支持由有循环感应电流激发的磁偶极子共振, 并且在 715 nm 可以支持 anapole 模式-由电偶极子和环形偶极子耦合形成的无辐射模式(图 1(b))。实验中研究团队使用电子束曝光和干法蚀刻剥离多层 WS₂ 制成的高度为 95 nm, 半径分别为 110、150、200 nm

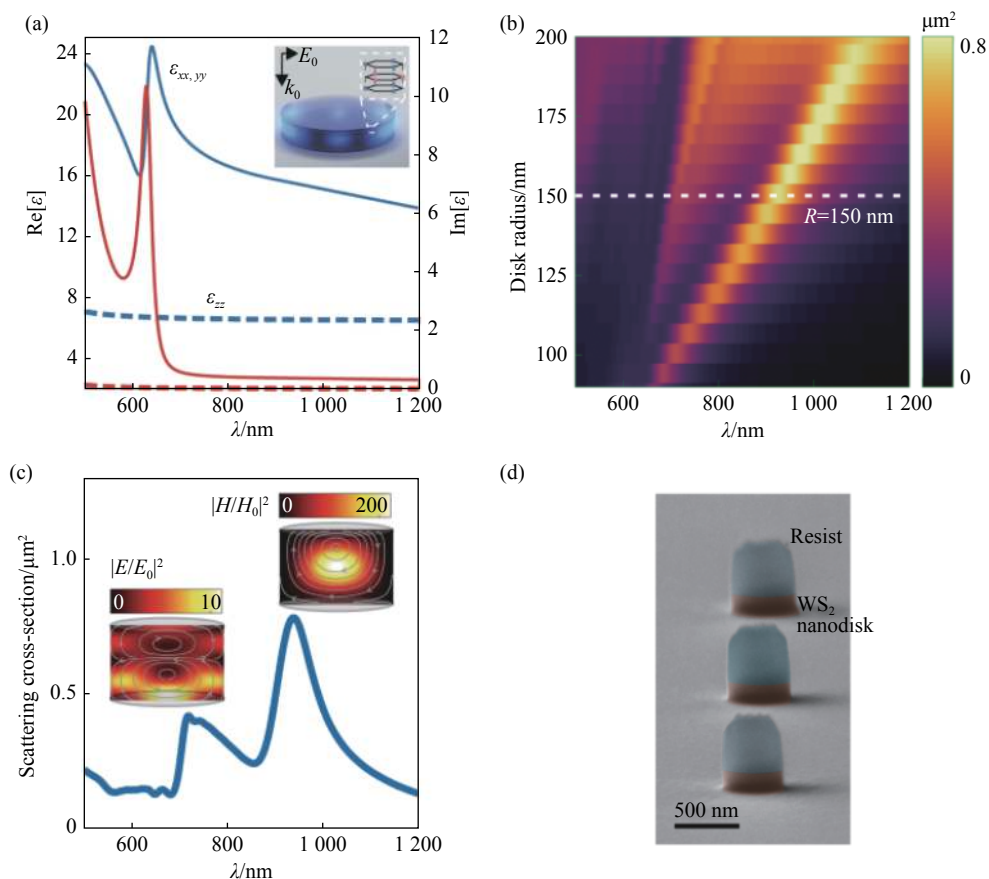


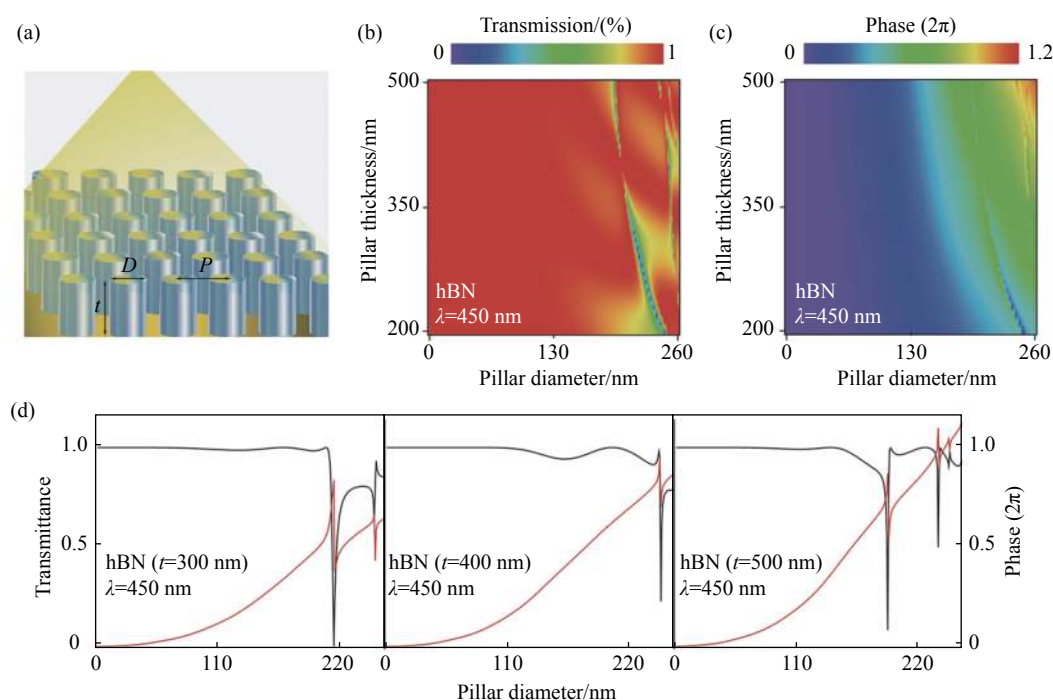
图 1 (a)WS₂ 在面内和面外的介电常数。(b)模拟 $h=200$ nm 的多层 WS₂ 散射截面的散射与盘半径和波长的对应关系。(c)模拟了 $h=200$ nm 和 $R=150$ nm 的多层 WS₂ 纳米盘在真空中的散射截面。(d)制备的多层 WS₂ 全电介质纳米盘的伪彩色侧视扫描电子显微镜 (SEM) 图像^[58]

Fig. 1 (a) The in-plane and out-of-plane dielectric constants of WS₂. (b) Simulated scattering cross sections of multilayer WS₂ at $h=200$ nm as a function of disk radius and wavelengths. (c) Simulated scattering cross sections of multilayer WS₂ nanodisk at $h=200$ nm and $R=150$ nm in vacuum. (d) False color side-view Scanning Electron Microscope (SEM) image of the prepared multilayer WS₂ all-dielectric nanodisk^[58]

的 3 个纳米盘(图 1(d)),用暗场光谱法测量了它们的散射特性,实验和模拟结果吻合良好,并且两者均显示出由多个峰和谷组成的复杂共振特征,这些峰和谷随盘大小分散。在同一纳米结构中存在激子带和色散几何偶极子表明这些共振特征可以相互耦合和杂交。他们引入人工各向同性的介电函数,当关闭了 A 激子跃迁后,发现 anapole 模式,其散射几乎为零。相反只使用包含 A 激子响应的人工介电常数,在激子波长处出现散射峰。当同时开启的时候,谱线发生分裂,在 580 nm 和 680 nm 处出现两个散射谷(图 1(c))。该工作通过一个简单的纳米加工步骤,将多层 TMDC 纳米天线中的米氏共振和 anapole 模式(以及它们与激子的强耦合)引入了强光-物质相互作用的平台。

利用二维材料的高折射率特性和不完全相位调制, Liu 等人使用多层 vdW 材料制造出了亚波长尺度的超透镜^[59],演示了接近衍射极限的聚焦和成像,并利用它们的分层性质将制造的超透镜转移到柔性基板上,展示了应变诱导的可调聚焦。为光学元件的进一步缩小尺寸和超表面光学在超小型光电系统中的集成提供了机会。如图 2(a)所示,使用放于晶格周期为 260 nm 的石英衬底的宽带隙 h-BN(折射率为 2.17)的圆柱,通过改变圆柱的几何尺寸(厚度 t 和直径 D),并利用耦合波理论分析其透射特性。在圆柱结构厚度大于 450 nm 处,可以实现完整的 2π 相位控制。为了

减小散射体的厚度并减轻其性能下降,他们采用了不完全相位调制设计^[60]。即最大相位偏移小于 2π (图 2(b)~2(d)),实现的相位函数可以通过饱和失配模型与寻址的 $0\sim 2\pi$ 相位关联。即使没有覆盖整个 2π 相移,也能实现相对较高效率的聚焦功能。通过使用不同相移范围,以及使用线性插值或饱和失配设计的 4 种透镜对比试验发现,使用饱和失配模型时,在具有相同相位调制的情况下,聚焦效率可以提高约 1.5 倍。最后研究人员利用多层 MoS₂ 材料与不完全相位调制设计相结合,成功设计了厚度为 190 nm,焦距为 300 μm ,直径为 100 μm 的超透镜。在 1310 nm 波长处利用饱和失配模型实现 $0\sim 0.7\pi$ 相移,并成功实现近衍射极限的聚焦效果(FWHM=5 μm)。该结果展现了紧凑型红外成像系统的可行性。鉴于二维材料优良的机械力学特性,通过在石英衬底上将 120 nm 厚的多层 h-BN 全电介质薄膜制成焦距为 250 μm 的超透镜,利用它们的层状性质将所制备的超透镜转移到柔性衬底上,发现除了在 F 焦距处的焦点外,还可以在沿着轴向 F/N 处观察到多个高强度热点,其中 N 是整数(图 2(e))。在施加径向应变(ϵ)时,测得的焦点会偏离初始焦平面。这种调谐行为与 $(1+\epsilon)^2$ (图 2(f))成线性比例。该结构验证了可以实现应变诱导的可调谐聚焦效应。基于多层二维材料全电介质相位调制机制的平面光学结构在光学传感、成像、偏光测量、焦距调节和能量收集等领域展现了巨大应用潜力。



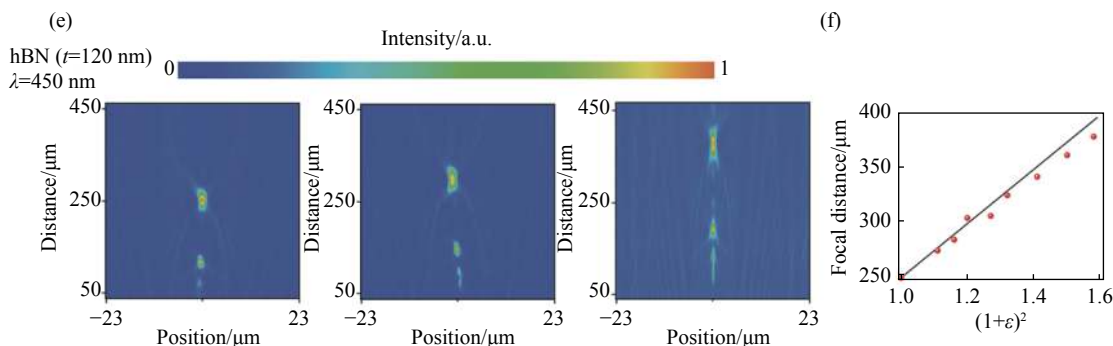


图2 (a)多层 vdW 全电介质纳米柱阵列示意图。模拟计算在改变纳米柱尺寸时通过阵列后波前振幅(b)和相位(c)的变化。(d)从左到右: 纳米柱的厚度分别固定为 300、400 和 500 nm 时, 柱直径与透射波前的幅度(黑色)和相位(红色)的对应关系。这些模拟曲线是从图(c)和(d)中对应提取。(e)集成在 PDMS 柔性基板上的多层 h-BN 全电介质超透镜的轴向焦场强度分布图。(f)应变诱导的可调谐聚焦效应。数据图是在不同应变值下测得的(圆形符号)和分析预测的(实线)焦距^[59]

Fig. 2 (a) Schematic diagram of multi-layer vdW all-dielectric nanopillar arrays. The color maps show RCWA providing the change in the (b) amplitude and (c) phase of a wavefront after passing through the array when varying the dimensions of the nanopillars. (d) From left to right: correspondence of nanopillar diameter to the amplitude (black) and phase (red) of the transmitted wavefront when the thickness of the nanopillar is fixed at 300, 400 and 500 nm, respectively. These simulated curves are extracted from Figures (c) and (d), (e), Axial focal field intensity distribution of multi-layer h-BN all-dielectric metalens integrated on PDMS flexible substrate. (f) Strain induced tunable focusing effect. Measured (round symbols) and analytically predicted (solid line) focal lengths under different strain values^[59]

3 少层二维材料及原子层厚度超表面

上述多层二维材料超表面依然沿袭传统光场调控机制, 仅仅利用了其全电介质高折射率的特性, 有效光场调控厚度依然停留在百纳米量级。随着对二维材料超表面研究的深入, 少层甚至原子层厚度超表面光场调控得到了充分发展。具有超薄厚度, 高折射率和非凡光学特性的石墨烯和其他二维(2D)材料的出现, 促使人们产生实现原子级平面光学的概念和思想^[61-62]。例如, 在宽带具有大且可调折射率的单层石墨烯实现了波导集成偏振器的演示^[63], 以及红外和太赫兹频率区域的可调制器^[64]; 利用 Heaviside 相位调制实现超表面光场调控^[65] 以及从单层到双层的宽带相位调节机制^[66]; 利用振幅调制机制实现高性能平面透镜^[67] 和激彩色图像打印技术^[68]; 以及利用激子共振调制实现了超薄的 WS₂ 单层平板透镜演示^[69]。

3.1 Heaviside 相位跳变

当光强度消失时, 通常伴随产生光学奇点(singularity)现象, 如常见的光学相位奇点和偏振

奇点。光学相位奇点的拓扑行为往往会引起许多有趣的物理现象, 如跨越奇点附近的 Heaviside 相位突变和奇点附近的光场超灵敏特性。在光场调控应用中, 通过合理设计超表面构建光学反射奇点能够实现典型的 Heaviside 型光学相位突变, 从而使跨越奇点的结构单元表现出显著的相位延迟。Wang 等人^[65] 基于光学反射奇点诱导的相位突变行为实现了原子层厚度即波长的百分之一的超构表面光场调控。通过合理设计 PtSe₂-SiO₂-Si 多层膜结构(图 3(a)), 利用少层二维材料强吸收损耗特性, 在 PtSe₂-SiO₂-Si 区域和 SiO₂-Si 区域之间, 可以在共振波长实现接近零反射的“拓扑光学奇点”(图 3(b))。光学奇点现象一般出现在单端口共振系统中, 其与自由波之间只通过单个端口进行能量交换, 在平面波照射下只有反射场的光学共振结构即为单端口共振系统。单端口系统的反射系数可以由耦合模式理论唯象地表示为^[70]

$$r = -1 + \frac{1/Q_r}{-i(\omega/\omega_0 - 1) + (1/Q_r + 1/Q_a)/2}, \quad (1)$$

其中, 共振系统的共振频率为 ω_0 , Q_r 与 Q_a 分别是与衬底结构辐射损耗 γ_r 及少层二维材料吸收损耗

γ_a 相关的物理量, 它们之间的关系为 $\gamma_r = \omega_0 / (2Q_r)$ 与 $\gamma_a = \omega_0 / (2Q_a)$, ω 则为入射光的频率。分析该公式可以得出, 当 $Q_r/Q_a < 1$ 时, 吸收损耗较弱, 共振系统处于过耦合状态, 反射系数的相位覆盖 2π 范围; 相反地, 当 $Q_r/Q_a > 1$ 时, 吸收损耗较强, 共振系统处于欠耦合状态, 反射系数的相位只能覆盖小于 π 的范围; 而 $Q_r/Q_a = 1$ 的临界状态即为光学奇点

状态, 在该情况下, 共振频率下的反射系数振幅消失, 其相位为不确定值 (图 3(c))。PtSe₂-SiO₂-Si 结构即为一种单端口光学共振系统, 研究表明, 可以通过改变 PtSe₂ 层的厚度调节该系统的吸收损耗, 从而可实现对该系统的共振状态在过耦合和欠耦合之间切换, 以实现巨大的相位跳变调控。

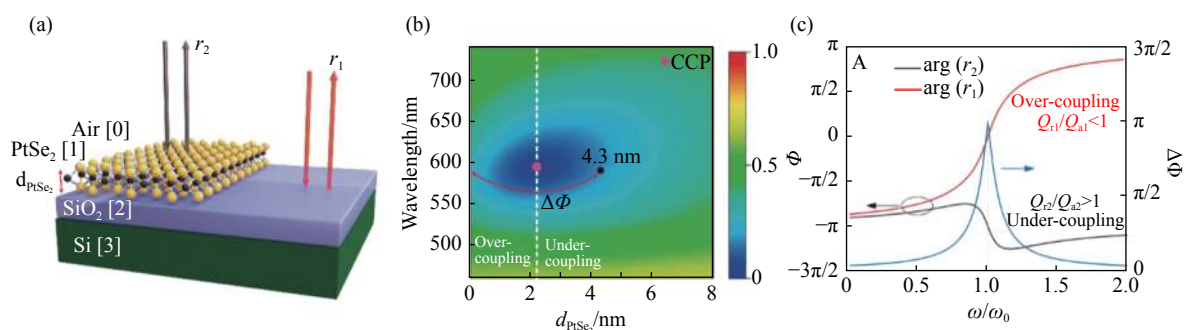


图 3 (a)原子层厚度二元超表面实现 Heaviside 光学相位调制示意图。(b)PtSe₂-SiO₂-Si 多层膜的反射率与 PtSe₂ 厚度和入射波长的关系。(c)过耦合和欠耦合情况下的反射相位谱^[65]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of Heaviside optical phase modulation realized by atomic layer thickness binary metasurface. (b) Reflectance of PtSe₂-SiO₂-Si multilayers as a function of the PtSe₂ thickness and the incident wavelength. (c) Spectra of reflection phase for over- and under-coupling cases^[65]

由于少层二维材料 PtSe₂ 吸收损耗大, 当 PtSe₂-SiO₂-Si 系统在共振频率产生临界耦合点时, 理论上顶层二维材料临界厚度仅需 2.2 nm, 对应 5 个原子层左右 (如图 3(b))。实验设计的两种超构单元 PtSe₂(4.3 nm) 和 PtSe₂(0 nm) 产生的耦合模式刚好跨越临界耦合点, 在共振频率处两种超构单元的反射相位可以有效实现接近 π 的显著相位突变。结合激光直写技术, 通过激光烧蚀形成顶层 PtSe₂ 薄膜制备二元结构。利用不同超构单元 PtSe₂(4.3 nm) 和 PtSe₂(0 nm) 之间反射相位的 Heaviside 跳变, 构建二元超表面器件。像素化二元超表面全息演示器件顶层二维材料厚度起伏仅为 4.3 nm, 实验中测量获得的最大相位调制能力接近 0.8π 。在共振波长 590 nm 处, 全息成像衍射效率达到 4.1%, 全息重构图像表现出优异的保真度 ($>70\%$) (图 4(a)~4(i))。同时, 利用二元相位调控能力, 研究团队演示了在可见光波段上原子层厚度的光学菲涅耳波带片 (FZP) 透镜 (图 4(l)~4(n))。由于奇点相位的拓扑保护特性, 超表面器件同时展现出优异的角度鲁棒性 ($\pm 20^\circ$)。通过扫描二维材料的折射率实部 (n) 和虚部 (k) 可

以找到所有使得共振系统处于临界状态的 n 和 k 值, 这些值在以 n, k 为横纵坐标的坐标系里形成一条轨迹曲线; 同时将 PtSe₂ 的色散曲线绘入图中, 其与临界点轨迹相交, 则表明 PtSe₂ 可使得该共振系统处于临界共振状态。此时若改变入射光角度, 则会发现临界点轨迹逐渐移动, 在较小角度 (20°) 以内, 其移动缓慢, 与 PtSe₂ 的色散曲线一直保持相交, 意味着在小角度附近的相位跳变特性具有较高的鲁棒性 (图 4(j))。研究发现, 这种鲁棒性使得衍射效率随入射角在 20° 以内的变化较小, 很好地保证了超表面器件的有效角度范围 (图 4(k))。作为原子层厚度的超表面光场调控技术有望进一步促进平面光学器件的集成度和微型化, 将在全息成像、超构透镜、光学存储等领域具有广阔的应用潜力。

过渡金属卤化物二维材料的显著优势在于当其厚度从体材料体系过渡到单层材料体系时, 其能带结构将从间接带隙过渡到直接带隙, 同时其能带宽度处于可见光和近红外波段。这就为后续构建集成光学系统提供了显著优势。基于单层过渡金属卤化物二维材料的发光器件和光电响应器

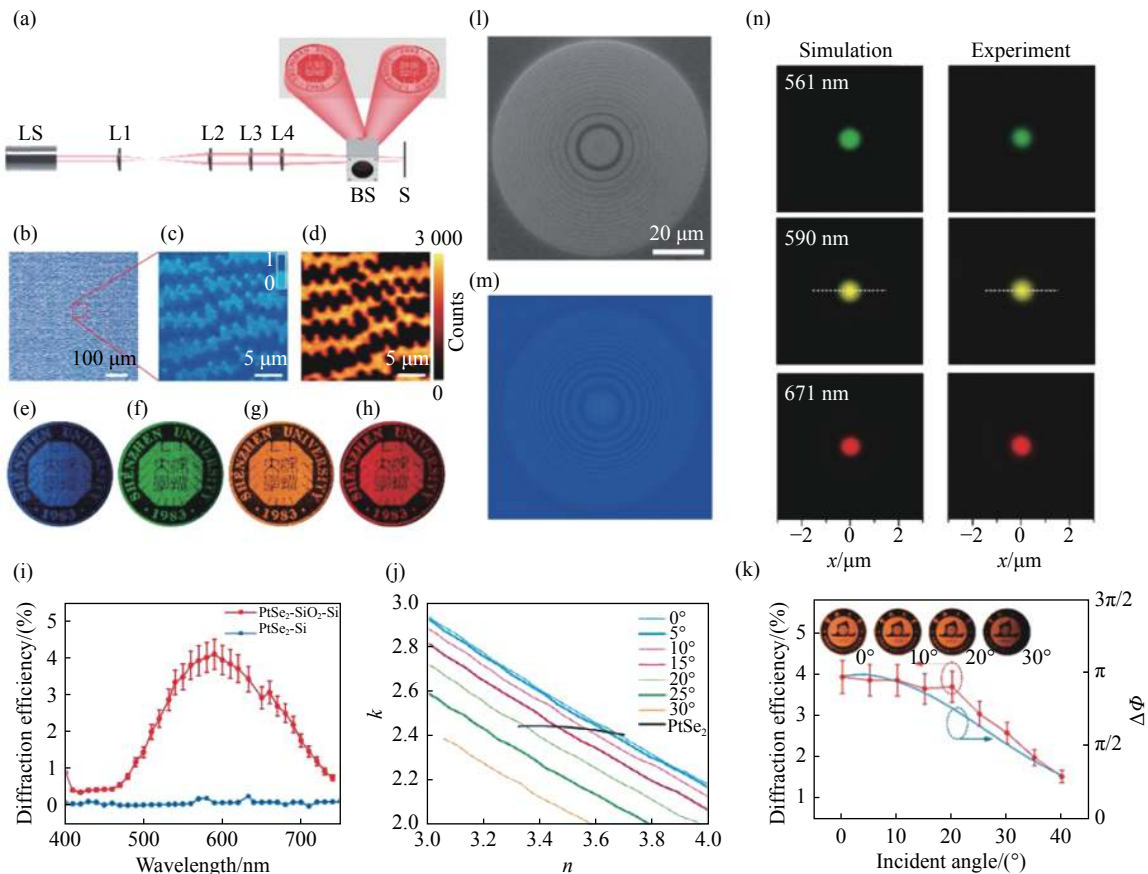


图 4 原子层厚度二元超表面全息成像和超透镜实验效果。(a)构建全息图像的实验装置,(b)激光直写技术制备的二元超表面光学显微镜图像。正方形标记区域的光学图像(c)以及拉曼图像(d)。(e-h)在照明波长分别为 473, 561, 590 和 671 nm 的全息重构图像。(i)比较有和没有 290 nm 厚硅衬底层样品的实测衍射效率。(j)在不同入射角(0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°)下, PtSe₂ 薄膜在 (n-k) 图中的最小反射轨迹和色散情况。(k)测量衍射效率(红色散射)和计算相位差(蓝色曲线)与入射角的关系。菲涅耳波带片平面超透镜的电镜(l)和对应光学(m)图像。(n)3 种不同波长聚焦强度分布的模拟结果与实验结果的比较^[65]

Fig. 4 Demonstration of atomically thin meta-holograms and Fresnel zone plate (FZP) lenses. (a) Experimental configuration for reconstructing holographic images. (b) Optical microscope image of scribed meta-optics pixel arrays by Direct Laser Writing (DLW). The optical image (c) of the square marked area and the Raman image (d). (e-h) Holographic images captured at illumination wavelengths of 473, 561, 590, and 671 nm, respectively. (i) Comparison of measured diffraction efficiencies for the samples with and without the 290-nm thick silica substrate. (j) Minimum reflection trajectories and dispersion of PtSe₂ films in (n-k) figures at different incident angles (0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°). (k) Measured diffraction efficiencies (red scatters) and calculated phase difference (blue curve) as a function of the incident angle. SEM (l) and corresponding optical images (m) of Fresnel zone plate plane metalens. (n) Cross section of the simulated and experimental intensity distribution of the focal spot at the wavelength of 561, 590, 671 nm^[65]

件已经被广泛研究^[71-73]。在单层二维材料体系中实现有效的光学相位调控,对于全光集成系统的构建具有重要意义。然而,受限于材料物理极限的厚度,在传统的相位调控机理下,利用单层二维材料实现有效的光学相位调制面临挑战。近期, Qin 等人^[66]基于单层二硫化钼-透明介电层-硅衬底的多层膜结构体系,在临界耦合点附近利用跨越光学奇点产生的 Heaviside 相位跳变机制,成功

实现了对可见光的高调控能力。如图 5 所示,他们利用透明介电层-硅衬底上的单层二硫化钼组成的复合结构(图 5(a)),与前述工作改变上层二维材料厚度来调控吸收损耗不同,该工作中研究团队通过调整介电层的折射率(n)和厚度(t),控制单原子层吸收损耗和衬底辐射损耗之间的竞争关系,在跨越临界耦合点两侧,可以实现反射光的 Heaviside 相位跳变。理论研究发现,在介电层

参数 $n=1.98$ 和 $t=65$ nm 的最佳组合下, 在 535 nm 的波长处, 利用厚度仅为 0.67 nm 的单原子层 MoS₂ 便能够实现反射光 π 的显著相移(图 5(b))。实验测得单原子层 MoS₂ 的反射相移为 0.88π 。利用 PECVD 的 MoS₂ 薄膜生长技术, 结合飞秒激光直写加工手段, 他们加工制备了单原子层厚度的二元环带结构平面超临界透镜, 通过反相环带结构来调控不同角频入射光在焦场内实现相干相消。正是利用了相邻环带结构之间的反相调控, 他们实现了远场的超衍射极限聚焦效应, 焦斑尺寸得以突破光学衍射极限, 实现 0.7 艾里 (AU) 光斑尺寸。此外, 二硫化钼具有独特的色散特性, 当

改变顶层二维材料厚度从单层变为双原子层, 可以获得从 435 nm 蓝光到 585 nm 黄光的 150 nm 宽带, 实现了大于 $\pi/2$ 的相位调节能力, 并使二元相位调制超临界透镜在整个有效带宽波段能够表现出恒定的 0.7 倍艾里斑尺度超衍射限制聚焦能力(图 5(c))。该工作通过将结构压缩到单层材料厚度, 结合过渡金属卤化物半导体材料直接带隙特性, 为基于二维材料体系的集成光电系统的开发提供了可能。类似的原理也可以应用于阶梯厚度变化的少层 MoS₂ (小于 6.3 nm) 多阶相位调控光学透镜以及衍射光栅^[74]。

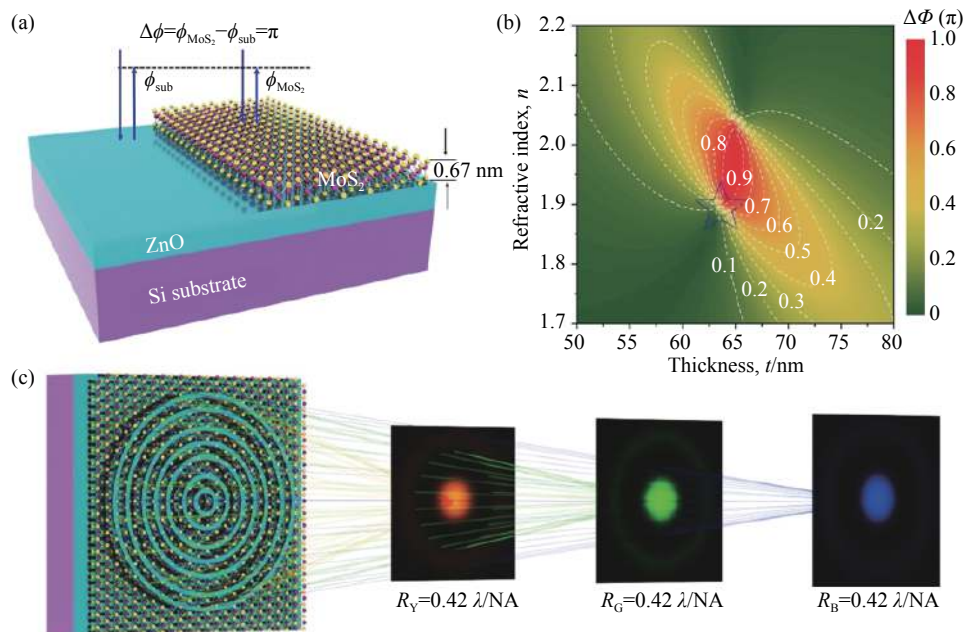


图 5 (a) 二硫化钼片和硅衬底之间的反射相移示意图。(b) 基于吸收损耗与辐射损耗竞争产生临界耦合条件下的 Heaviside 相位调制与介质层厚度 (t) 和折射率 (n) 的关系。(c) 原子层厚度平面超临界透镜及其宽谱超衍射极限聚焦特性^[66]

Fig. 5 (a) Schematic illustration of the reflected phase shift between MoS₂ sheets and silicon substrates. (b) Relation between Heaviside phase modulation and dielectric layer thickness (t) and refractive index (n) under the condition of critical coupling based on the competition between absorption losses and radiation losses. (c) Planar supercritical lens with atomic layer thickness and its wide-spectrum sub-diffraction limited focusing characteristics^[66]

3.2 振幅调制

尽管传统光学器件设计中吸收损耗通常是要规避的负效应, 然而最近的研究发现单原子层二维材料较大的折射率虚部能够引起非平凡界面相移效应, 尤其是二维材料放置在金属衬底上的多层膜结构, 可用于超表面光学器件。近期, Hu 等人揭示了纳米级厚度的连续 MoS₂ 薄膜涂敷的金

属衬底结构具有优异的层厚灵敏光谱调制特性^[68]。利用材料虚部引入的非平凡界面相移^[75], 纳米级 MoS₂ 材料的奇异色散为超灵敏光场调控方案提供了可能(如图 6)。根据 FP 腔薄膜干涉共振理论, 谐振的产生主要由材料折射率和厚度相关的传输相位累积和两个界面处的总界面相移决定, 可以表示为^[68]:

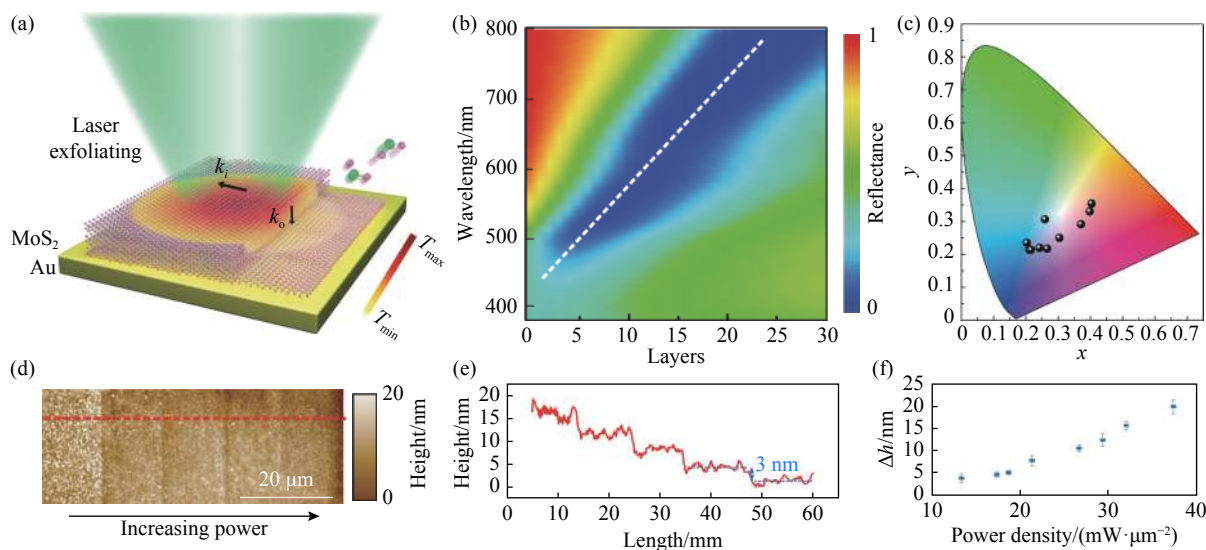


图6 (a)基于非平凡界面相移的激光削薄少层 MoS₂ 薄膜实现谐振波长调控示意图。(b)模拟显示 MoS₂ 薄膜涂敷的金属衬底结构反射光谱与 MoS₂ 原子层数对应关系。(c)通过不同功率激光削薄实验得到的反射光谱颜色坐标图。(d)不同功率下得到的激光削薄区域的原子力显微镜图(AFM)。(e)红色虚线对应的高度变化。(f)提取不同功率下由拉曼光谱推算的厚度变化^[68]

Fig. 6 (a) Schematic illustration of tightly focused laser beams for exfoliating multilayer MoS₂ with atomic thickness precisions. (b) The calculated reflectance spectra of the MoS₂ thin films on the Au substrate with different numbers of layers. (c) Experimentally obtained reflection color palettes and color coordinate diagram through laser exfoliating at variant powers. (d) The AFM image of laser thinned regions obtained at different laser doses. (e) The height change corresponding to the red dotted line. (f) Extracted thickness variation calculated by Raman spectrum under different powers^[68]

$$\lambda = \frac{2n}{m - \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2\pi}\right)} h, \quad (2)$$

其中 λ 为谐振波长, n 、 h 分别为 FP 腔介质折射率实部及厚度, $\varphi_1 + \varphi_2$ 为上下界面处由于介质折射率虚部引起的总界面相移, m 为共振阶数。而传统薄膜干涉共振腔通常基于高折射率和低吸收损耗的透明介质,其谐振波长依赖于 FP 腔厚度的变化产生相位累积满足的共振条件,因而薄膜厚度通常为四分之一谐振波长的整数倍。然而少层 MoS₂ 材料具有大的折射率虚部可以在金属衬底界面引起巨大的非平凡界面相移,使得在界面的非平凡相移可以主导超薄多层膜中的传输相位累积,当非平凡的总界面相移接近 2π 时,1 阶谐振波长对薄膜腔厚度变化变得尤其敏感。在少层 MoS₂ 薄膜涂敷的金属衬底结构上,仅是从 30 层到单层的厚度变化(小于 20 nm),反射谐振波长移动即可以覆盖整个可见光的从 800 nm 到 430 nm 近 400 nm 的调节范围。

基于层状 MoS₂ 薄膜的层间范德华相互作用和各向异性热导率的材料特性,通过精确操控连

续激光紧聚焦条件,可控制产生垂直于界面的接近 80 °C/nm 的超高温梯度,建立标准化的激光剥落配方,这为以原子层精度进行可靠的厚度控制提供了基础。图 6(d)~6(f),对激光削薄后的色块进行原子力显微镜测量,实验结果实现对纳米级厚度的 MoS₂ 原子层削薄,最小剥离厚度达到 3 nm。利用金属-MoS₂ 结构对纳米级厚度变化展现出超灵敏响应的光学共振,研究团队实现了在全可见光范围内产生鲜艳的反光色彩,还带来了较大的反射振幅调制(图 6(c))。基于上述原理,研究团队演示了高分辨率的全彩色图像打印(图 7(a)~7(f)),激光打印像素最小尺寸为 400 nm,分辨率可以高达 58000 dpi。结合激光加工的灵活和大尺度特性,研究团队演示了实现大尺度 cm 级彩色图像的快速打印。同时,不同厚度的相邻打印结构具有高的振幅调制,利用激光打印微光栅结构可以为其振幅调制带来高效衍射效应,进一步开发了基于光栅衍射角度色散效应的多角度立体图像三维视觉。在激光加工后少层二维材料表面厚度起伏仅为 10 nm 时,实验测量获得在 560 nm 波长 1 级衍射效率接近 36%。他们通过

激光加工制备了周期分别为 1800 nm 和 1200 nm 的两套振幅光栅结构,通过交叉排布方式组合成单元像素,将固定方向的斜入射光波分别衍射到

不同角度,从而可以从不同角度上接收不同图像信息,证实了双目视差立体图像图像的可行性(图 7(g)~7(i))。

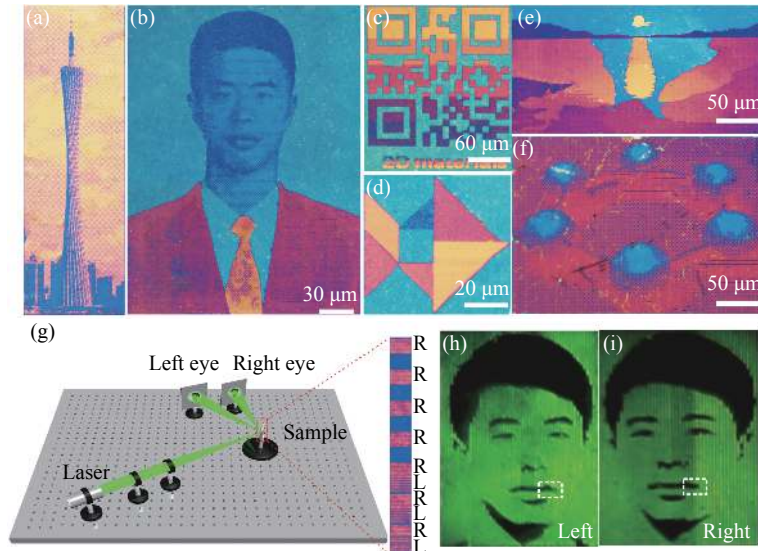


图 7 (a-f)激光打印高分辨率彩色图片。(g)双目立体成像示意图。(h-i)分别为左右眼从不同角度获得的图像^[68]

Fig. 7 (a-f) Laser printing of high-fidelity color images. (g) Schematic diagram of binocular stereoscopic imaging; (h-i) images obtained from different angles for the left and right eyes respectively^[68]

不仅二维材料的折射率虚部可以用来产生奇点相位突变以及非平凡界面相移,激光加工二维材料溅射形成的颗粒因具有高的折射率还可以实现对光场的散射和振幅调制。Jia 等人基于单层 TMDC 单晶材料演示了高性能平面透镜^[67],通过激光加工局部具有强烈散射的纳米粒子,以获得所需的振幅和相位调制,同时展示了基于 TMDC 材料的透镜衍射受限成像能力。聚焦的飞秒激光照射在厚度仅为 0.7 nm 的单层过渡金属二卤化物 WSe₂ 材料上,在 633 nm 波长下 WSe₂ 材料具有高达 5.5 的折射率实部,在紧聚焦飞秒激光 GW·m⁻² 量级的高峰值功率作用下单层 WSe₂ 被强电离产生 W⁴⁺ 离子并与空气中的氧气发生氧化反应,从而溅射生成高度为 20 nm 横向尺寸分布在 50~150 nm 之间的 WO₂ 纳米颗粒(图 8)。产生的 WO₂ 纳米颗粒对光有很强的散射作用,可以实现对光的振幅和位相调制。该尺度下的 WO₂ 纳米颗粒满足瑞利散射条件,可以获得对入射光接近 85% 的振幅调控以及 0.1 π 的相位延迟。利用激光加工烧蚀和溅射单层 WSe₂ 形成同心环组成的菲涅耳波带片平面超透镜结构,能够对光进行聚焦和对物体进行成像。

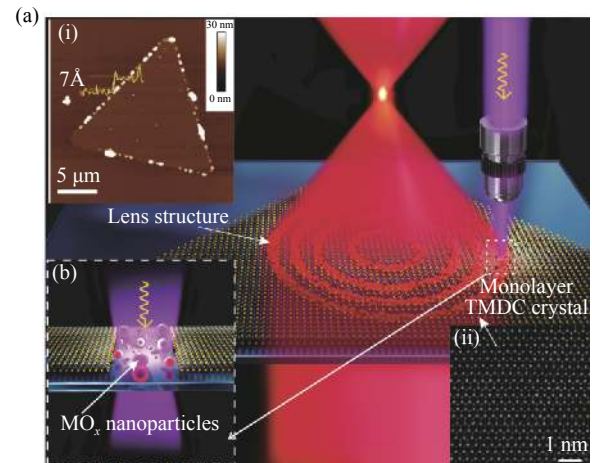


图 8 (a)飞秒激光制造单层 TMDC 透镜的示意图。插图 (i) 单层 TMDC(此处为 WSe₂)单晶的 AFM 图像,以及 (ii) 单层 TMDC(此处为 WSe₂)单晶的 STEM 图像。(b)飞秒激光诱导生成 MO_x 纳米颗粒的示意图^[67]

Fig. 8 (a) Schematic of femtosecond laser fabrication of a monolayer TMDC lens. Inset: (i) AFM image of a monolayer TMDC (WSe₂ in this case) single crystal, and (ii) STEM image of the monolayer TMDC (WSe₂ in this case) single crystal. (b) Schematic of femtosecond laser-induced generation of MO_x nanoparticles^[67]

利用飞秒激光加工出的一个平面透镜的光学显微图片如图9所示。该透镜由不等间距的同心圆环构成。飞秒激光照射的区域由于产生了纳米颗粒对光形成很强的散射,因此变暗。其聚焦的焦点在 xy 平面和 xz 平面内的光强分布如图9(b)所示,其在 xy 平面内实现了亚波长的分辨率,在 xz 平面内实现了波长级的分辨率。其聚焦效率可以高达31%,远大于目前的亚纳米厚度的平面透镜。该激光加工方法可以在任意的单层过渡金属二卤化物材料中获得相似的光场调制能力,实现很好的聚焦效果。作为应用演示,他们在单原子层 PtS_2 薄膜中通过激光加工制备了口径为 $300\ \mu\text{m}$ 的大面积平面透镜,并演示了单原子层材料透镜的高分辨率成像,其结果如图9(c)所示。该透镜成像了字母F和一个美国空军标准板,其中最小间距为 $1.1\ \mu\text{m}$ 的两条平行线可以在其一级焦点成像面中清晰分辨。由于该透镜同时还存在高阶衍射现象,因此在透镜后方可以同时实现正一级和正二级的多个焦点和多个像平面,由于一级和二级相平面具有不同的焦距,因此还可以有效利用该效应实现具有不同放大倍率的可变焦透镜。

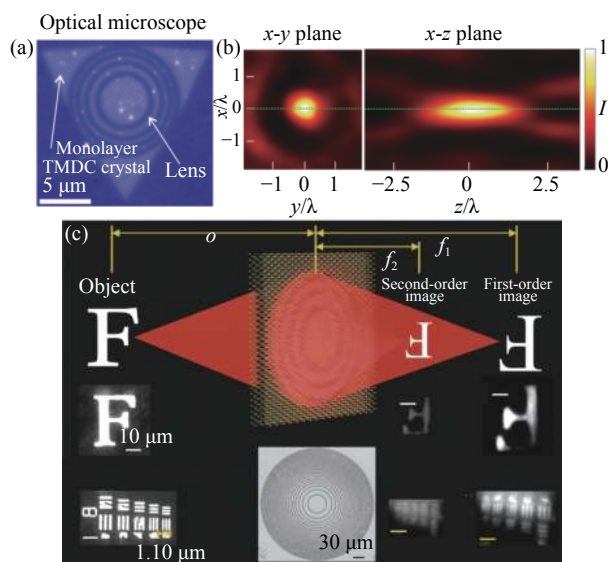


图9 (a)单原子层 WSe_2 平面透镜的光学显微图像。(b)实验获得的焦点强度在 xy 和 xz 平面内的横截面图像。(c)使用单原子层 PtS_2 平面透镜的衍射极限成像的示意图^[67]

Fig. 9 (a) Optical microscope image of a single atomic layer WSe_2 planar lens. (b) Experimentally obtained cross-sectional images of the focal intensity in the xy and xz planes. (c) Schematic illustrating diffraction-limited imaging using a monolayer PtS_2 lens^[67]

此外,利用少层TMDC材料的强吸收特性,研究人员开发和制备了振幅调制的光过滤器及光衍射器件。Zeng Wang等人^[76]在 $10\ \text{nm}$ 厚的 MoS_2 薄膜中利用C激子共振强吸收特性实现对透射光接近80%的振幅抑制,通过在连续 MoS_2 膜中制备具有高透射率的纳米孔结构,从而产生振幅的二元调制,进而制备了少层 MoS_2 光子筛全息图。实验获得的衍射效率约为22%,其衍射效率为金属光子筛结构的11倍。同时,他们也演示了具有亚衍射极限的聚焦效果和纳米成像能力的振幅调制超临界透镜。

3.3 激子共振调制

基于超表面平面光学器件原理,依靠对纳米谐振天线的散射特性的高度可控特性设计实现激子共振调制。通常天线的选择仅限于支持等离激元或米氏共振的金属和高折射率全电介质纳米结构。这些谐振元件具有很强的光-物质相互作用,并且可以很好地控制散射相位和幅度,但缺乏主动调节的可行性。随着纳米光学的发展,人们对动态可调的光电器件提出了更高的要求。结合二维材料优良的光电可调特性,Jorik等人演示了利用原子层厚度半导体中的激子共振作为第三种共振来创建可调谐的平面光学器件^[69]。单层二硫化钨(WS_2)在可见光谱范围内显示出强烈的激子共振,他们通过施加外电压等方式主动调节二维材料的激子共振,实现了共振可调的光-物质相互作用。通过对二维材料的结构化和图案化制备出相应的器件结构,发展了由二维激子材料制成的主动可调超表面。

首先,研究团队设计了一种单原子厚度的 WS_2 超薄平面透镜,如图10所示。其结构为典型的菲涅耳波带片,通过用离子液体电门施加控制电压,对来自 WS_2 不同环带的衍射光在焦场内的相长干涉实现聚焦。将环形 WS_2 看做由入射平面波驱动的散射场源,局部产生的散射场与 WS_2 材料的极化成正比。在激子共振处,复数电极化率(表示为 χ)最大,表现为激子共振附近的散射最强。通过电压门控改变 WS_2 材料的激子共振能力来调节镜头聚焦效率。通过施加电压前后消除激子共振,从而产生了最大的磁化率变化,即光场散射调制。相对于等离子共振和米氏共振的难以调节,这种激子共振抑制机制具有完全可逆和高度可再现特性。

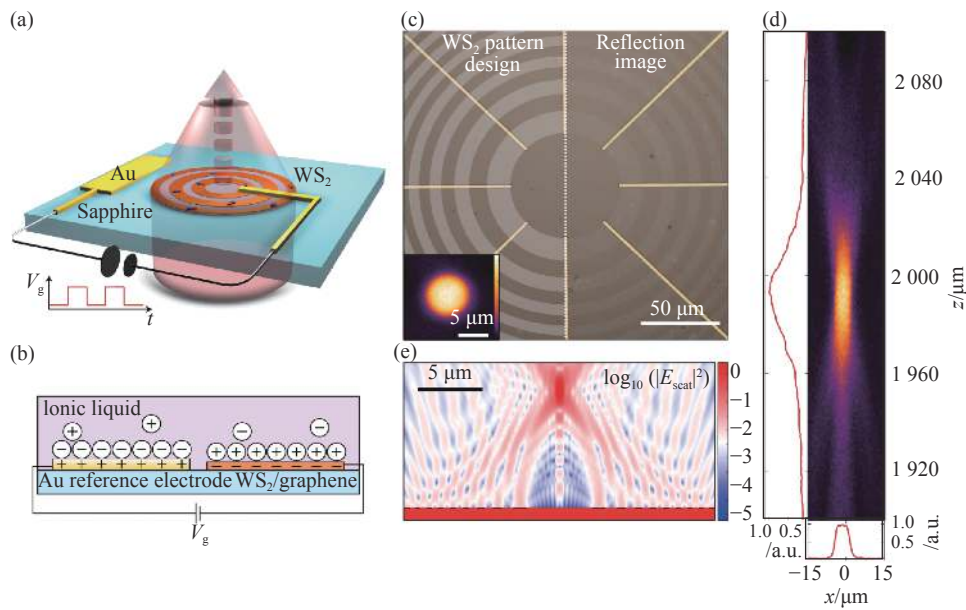


图 10 (a)基于激子共振的可调谐 WS₂ 菲涅耳带片平面透镜示意图。时变的离子-液体栅极电压通过猝灭激子共振而实现聚焦效率的主动调制。(b)离子-液体门控工作原理示意图。(c)加工制作的平面透镜光学显微镜图像(右)和设计的 WS₂ 平面透镜图(左)对比。(d)聚焦光束($\lambda=620$ nm)的 x - z 面内强度分布图。(e)直径为 20 μm 的菲涅耳带片平面透镜的散射场强度分布图($\lambda=620$ nm), 焦距 $f=10$ μm ^[69]

Fig. 10 (a) Schematic diagram of a Fresnel zone plate tunable WS₂ lens based on exciton resonance. Active modulation of focusing efficiency is achieved by quenching exciton resonance through time-varying ion-liquid gate voltage. (b) Schematic diagram of working principle of ion-liquid gating. (c) Comparison between the designed WS₂ planar lens (left) and optical microscope image (right) of the fabricated planar lens. (d) Focused beam ($\lambda = 620$ nm) intensity distribution in the $x z$ plane. (e) Scattering field intensity distribution of Fresnel zone plate lens with a diameter of 20 μm ($\lambda=620$ nm), focal length $f = 10$ μm ^[69]

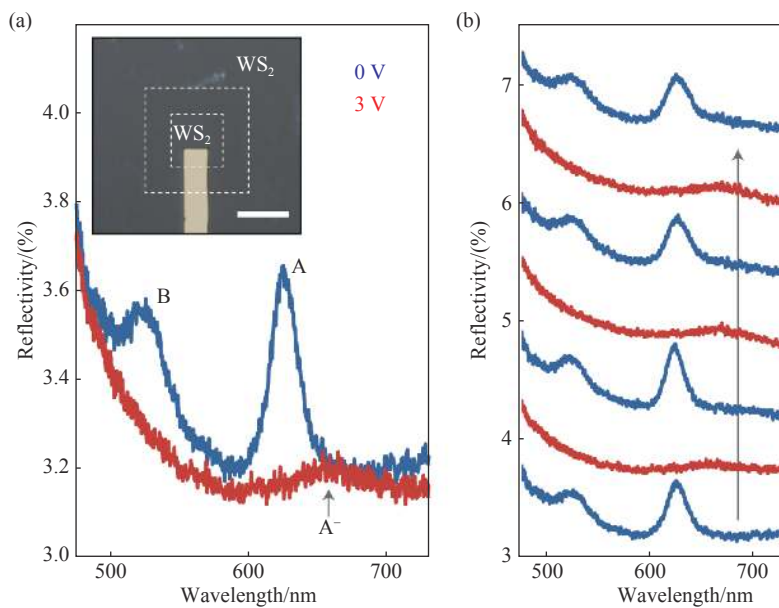


图 11 (a)20 $\mu\text{m} \times 20$ μm 的单原子层 WS₂ 在 V_g 为 0 V 和 3 V (蓝色和红色) 的反射谱。(b)激子共振的可重复调节性。在激子共振态 (蓝色) 和激子共振淬灭态 (红色) 之间循环时的反射率光谱^[69]

Fig. 11 (a) Reflectivity spectra of a 20 $\mu\text{m} \times 20$ μm isolated patch of WS₂ for $V_g = 0$ V (blue) and gated at $V_g = 3$ V (n-doping, red). (b) Reproducible modulation of exciton resonance. The reflectivity spectrum of cycles between the exciton resonant state (blue) and the exciton resonance-quenched state (red)^[69]

由此,利用激子共振的可调谐性来调制平面透镜的聚焦焦点强度。如图 11 所示,对 WS_2 /石墨烯异质结构施加偏置电压来抑制激子共振。在不施加电压时,单原子层 WS_2 在 520 nm 及 620 nm 附近分别展现出强烈的 b 激子和 α 激子共振(图 11(a), 蓝色),施加电压会导致 α 激子的抑制和右移以及 b 激子抑制(图 11(a), 红色)。当不对称激子线被完全抑制会产生大的极化对比度,实现结构对散射光调制。同时,激子共振调制具有高度可逆性,通过施加和去除电压可以切换到恢复共振状态。利用激子共振主动控制,在单原子层 WS_2 波带片透镜的焦点处演示了动态光强度调制(图 11(b))。在激子共振的状态($V_g=0$ V)和激子共振猝灭状态($V_g=3$ V)之间可重现的切换使得能够主动控制激子光散射幅度及透镜的聚焦效果。在对应的激子共振波长 625 nm 下,观察到的最大调制深度约为 33%。在激子共振状态和激子猝灭状态之间切换,以实现激子光散射幅度的主动控制,证实了二维材料超表面动态光场调控的可行性。

4 展 望

作为超材料的二维对应物出现的超表面,能够实现空间变化的光学响应(例如,散射、幅度、相位和偏振),将光波前塑造成可以随意设计的形状,可以有效降低系统的复杂度,提高光学系统的可靠性,促进集成光学系统和微纳光学系统的发展。随着具有优异的光学和电学特性的二维材料发展,二维材料与超表面光学的结合,为纳米尺度

的光学器件发展带来了新的机遇。尽管二维材料超表面其工作介质厚度仅仅为数个原子层,通过光学结构的设计开发新颖的光场调控机制,可有效控制透射或反射模式下光的相位,幅度和偏振等多自由度,相关研究为微纳光学领域光学器件未来的研究、设计和发展提供了无限的可能性。

文中围绕基于二维材料超表面的光场调节机制,综述了原子层厚度超表面取得的研究进展,分别介绍了多层二维材料全电介质相位调制,少层和原子层厚度二维材料 Heaviside 相位突变调制,激子共振调制,以及振幅调制等光场调控机制,并介绍了二维材料超薄超表面光场调控的应用。原子层厚度超表面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,为超轻型器件以及用于动态光场操纵的有源组件的开发提供了巨大潜力。但是还面临着很多问题和挑战。例如光场单一参量的调控局限了其进一步的应用,由于超表面的超薄厚度,光与物质相互作用距离不足,导致调控的效率与工作带宽不高制约了其商业化道路。需要多参量的复合调制,更精细地调节复杂结构光场,从而实现器件的多功能集成。目前,原子厚度的超表面由于具有许多优异性能而显示出广阔的前景。利用原子厚度的超表面的波前调控可以实现超轻超薄,易于集成的超透镜,以替代传统光学系统中的透镜组。利用其载流子迁移率高、带隙可调,在高性能电子产品中有望实现突破,也为自调制光致发光、功能集成化的光电探测器、激子场效应晶体管以及下一代光学计算应用提供助益。

参考文献:

- [1] ENKRICH C, WEGENER M, LINDEN S, *et al.*. Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(20): 203901.
- [2] VALENTINE J, ZHANG SH, ZENTGRAF T, *et al.*. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
- [3] WANG L Y, SMITH K W, DOMINGUEZ-MEDINA S, *et al.*. Circular differential scattering of single chiral self-assembled gold nanorod dimers[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(11): 1602-1610.
- [4] YU N F, GENEVET P, AIETA F, *et al.*. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3): 4700423.
- [5] KUMAR K, DUAN H G, HEGDE R S, *et al.*. Printing colour at the optical diffraction limit[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(9): 557-561.
- [6] NI X J, KILDISHEV A V, SHALAEV V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2807.

- [7] CLAUSEN J S, HØJLUND-NIELSEN E, CHRISTIANSEN A B, *et al.*. Plasmonic metasurfaces for coloration of plastic consumer products[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4499-4504.
- [8] 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.
- [9] YU N F, 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.
- [10] CHEN W T, YANG K Y, WANG C M, *et al.*. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [11] GAO L H, CHENG Q, YANG J, *et al.*. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e324.
- [12] 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.
- [13] WEN D D, YUE F Y, LI G X, *et al.*. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241.
- [14] 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.
- [15] LI X, CHEN L W, LI Y, *et al.*. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601102.
- [16] SUN SH L, YANG K Y, WANG C M, *et al.*. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [17] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.*. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [18] DENG J, YANG Y, TAO J, *et al.*. Spatial frequency multiplexed meta-holography and meta-nanoprinting[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8): 9237-9246.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al.*. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.
- [22] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al.*. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [23] TORRIJOS-MORÁN L, GRIOL A, GARCÍA-RUPÉREZ J. Slow light bimodal interferometry in one-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 16.
- [24] SUN W J, HE Q, SUN SH L, *et al.*. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(1): e16003.
- [25] XU T, ZHAO Y H, GAN D CH, *et al.*. Directional excitation of surface plasmons with subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 101501.
- [26] HUANG L L, CHEN X ZH, MUHLENBERND H, *et al.*. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [27] 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.
- [28] BIENER G, NIV A, KLEINER V, *et al.*. Formation of helical beams by use of Pancharatnam–Berry phase optical elements[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1875-1877.
- [29] SUN SH L, HE Q, XIAO SH Y, *et al.*. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [30] DECKER M, STAUDE I, FALKNER M, *et al.*. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [31] 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.
- [32] LIN J, GENEVE P, KATS M A, *et al.* Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4269-4274.
- [33] DENG Z L, DENG J H, ZHUANG X, *et al.* Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [34] KHORASANINEJAD M, AMBROSIO A, KANHAIYA P, *et al.* Broadband and chiral binary dielectric meta-holograms[J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1501258.
- [35] BHASU V C J, SATHYANARAYANA D N, PATEL C C, *et al.* Proceedings of the Indian academy of sciences—section A—volume 88—1979[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Chemical Sciences*, 1979, 88(4): 333.
- [36] BERRY M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [37] LIN D M, FAN P Y, HASMAN E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [38] HUANG L J, CHEN X ZH, MÜHLENBERND H, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2808.
- [39] TAN S J, ZHANG L, ZHU D, *et al.* Plasmonic color palettes for photorealistic printing with aluminum nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(7): 4023-4029.
- [40] LUO X G, PU M B, MA X L, *et al.* Taming the electromagnetic boundaries via metasurfaces: from theory and fabrication to functional devices[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 2015: 204127.
- [41] LUO X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [42] WEST P R, STEWART J L, KILDISHEV A V, *et al.* All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26212-26221.
- [43] LALANNE P, ASTILEAN S, CHAVEL P, *et al.* Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional échellette gratings[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(14): 1081-1083.
- [44] 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.
- [45] BROWN B R, LOHMANN A W. Complex spatial filtering with binary masks[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(6): 967-969.
- [46] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183-191.
- [47] WANG Q H, KALANTAR-ZADEH K, KIS A, *et al.* Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(11): 699-712.
- [48] MAK K F, LEE C, HONE J, *et al.* Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136805.
- [49] PAKDEL A, BANDO Y, GOLBERG D. Nano boron nitride flatland[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(3): 934-959.
- [50] DEAN C R, YOUNG A F, MERIC I, *et al.* Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(10): 722-726.
- [51] HULTGREN R, GINGRICH N S, WARREN B E. The atomic distribution in red and black phosphorus and the crystal structure of black phosphorus[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1935, 3(6): 351-355.
- [52] SPLENDIANI A, SUN L, ZHANG Y B, *et al.* Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(4): 1271-1275.
- [53] MAK K F, HE K L, SHAN J, *et al.* Control of valley polarization in monolayer MoS₂ by optical helicity[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(8): 494-498.
- [54] YE Z L, CAO T, O'BRIEN K, *et al.* Probing excitonic dark states in single-layer tungsten disulphide[J]. *Nature*, 2014, 513(7517): 214-218.
- [55] WU Y Q, JENKINS K A, VALDES-GARCIA A, *et al.* State-of-the-art graphene high-frequency electronics[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 3062-3067.
- [56] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W ZH, *et al.* Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. *Nano*

- Letters*, 2008, 8(3): 902-907.
- [57] WILSON J A, YOFFE A D. The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties[J]. *Advances in Physics*, 1969, 18(73): 193-335.
- [58] VERRE R, BARANOV D G, MUNKHBAT B, *et al.*. Transition metal dichalcogenide nanodisks as high-index dielectric Mie nanoresonators[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(7): 679-683.
- [59] LIU CH H, ZHENG J J, COLBURN S, *et al.*. Ultrathin van der Waals metalenses[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(11): 6961-6966.
- [60] MORENO I, CAMPOS J, GORECKI C, *et al.*. Effects of amplitude and phase mismatching errors in the generation of a kinoform for pattern recognition[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(12R): 6423.
- [61] LI X P, REN H R, CHEN X, *et al.*. A thermally photoreduced graphene oxides for three-dimensional holographic images[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6984.
- [62] LI P N, DOLADO I, ALFARO-MOZAZ F J, *et al.*. Infrared hyperbolic metasurface based on nanostructured van der Waals materials[J]. *Science*, 2018, 359(6378): 892-896.
- [63] BAO Q L, ZHANG H, WANG B, *et al.*. Broadband graphene polarizer[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 411-415.
- [64] KIM S, JANG M S, BRAR V W, *et al.*. Electronically tunable perfect absorption in graphene[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(2): 971-979.
- [65] WANG Y W, DENG Z L, HU D J, *et al.*. Atomically thin noble metal dichalcogenides for phase-regulated meta-optics[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(11): 7811-7818.
- [66] QIN F, LIU B Q, ZHU L W, *et al.*. π -phase modulated monolayer supercritical lens[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 32.
- [67] LIN H, XU Z Q, CAO G Y, *et al.*. Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 137.
- [68] HU D J, LI H, ZHU Y P, *et al.*. Ultra-sensitive nanometric flat laser prints for binocular stereoscopic image[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1154.
- [69] VAN DE GROEP J, SONG J H, CELANO U, *et al.*. Exciton resonance tuning of an atomically thin lens[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 426-430.
- [70] QU CH, MA SH J, HAO J M, *et al.*. Tailor the functionalities of metasurfaces based on a complete phase diagram[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(23): 235503.
- [71] LOPEZ-SANCHEZ O, LEMBKE D, KAYCI M, *et al.*. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 497-501.
- [72] ANDRZEJEWSKI D, HOPMANN E, JOHN M, *et al.*. WS₂ monolayer-based light-emitting devices in a vertical p-n architecture[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(17): 8372-8379.
- [73] DOBUSCH L, SCHULER S, PEREBEINOS V, *et al.*. Thermal light emission from monolayer MoS₂[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(31): 1701304.
- [74] YANG J, WANG ZH, WANG F, *et al.*. Atomically thin optical lenses and gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(3): e16046.
- [75] KATS M A, BLANCHARD R, GENEVET P, *et al.*. Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(1): 20-24.
- [76] WANG Z, YUAN G H, YANG M, *et al.*. Exciton-enabled meta-optics in two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(11): 7964-7972.

作者简介:



李昊 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光彩色打印应用研究。
E-mail: lihaoipt@stu2018.jnu.edu.cn



李向平 (1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者。主要从事等离激元、超分辨、激光加工及光存储方面研究, 主持、参与国家级和省部级科研项目 10 余项。E-mail: xiangpingli@jnu.edu.cn