



表面等离子激元超构表面的研究进展

林 佼^{1*}, 王大鹏¹, 司光远²

¹深圳大学纳米光子学研究中心, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;

²东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819

摘要: 传统光学系统(如透镜、波片和全息片等)在光程远大于波长尺度的范围内实现对光波前的调控, 其中振幅、相位和偏振的改变均依赖于光束反射、折射和衍射过程所累积的动态光程差。近年来涌现出的平面超薄光学系统因突破了传统设计的局限性而受到各个领域研究人员的青睐。本文着重介绍基于表面等离子激元的超表面在自由空间光场和局域光场波前调控方面的最新进展, 阐述相关机理和具体应用, 并结合国内外研究现状, 分析现有技术存在的瓶颈且对该领域未来的发展趋势进行探讨和展望。

关键词: 表面等离子激元; 超构表面; 波前调控

中图分类号: TB383; O485

文献标志码: A

Recent progress on plasmonic metasurfaces

Jiao Lin^{1*}, Dapeng Wang¹ and Guangyuan Si²

¹Nanophotonics Research Centre, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and System of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; ²College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: Conventional optical systems (lenses, wave-plates and holograms) shape the wavefront of light within the range of an optical path that is much larger than the wavelength of light. The control of amplitude, phase and polarization of light depends on the dynamic optical path difference accumulated through the reflection, refraction and diffraction. Recently, planar ultrathin optical components have attracted tremendous attention by removing such traditional limitations. In this paper, we mainly review the recent progress of plasmonic metasurfaces with respect to wavefront shaping of free space and localized optical fields, including the fundamental mechanisms and applications. Both the drawbacks of existing technology and potential development are highlighted.

Keywords: surface plasmon polaritons; metasurfaces; wavefront shaping

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.003

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(3): 289–296

1 引言

1968年前苏联理论物理学家 Veselago 依据麦克斯韦方程, 首次提出“左手材料”的概念, 该理论的发现拉开了“超材料”领域研究的大幕。随着纳米加工技术的快速发展, 科学家们在三维尺度已获得具有人

工可设计介电常数和磁导率的新型电磁材料, 进而实现自然材料不具备的超常规物理性能, 如光学隐身^[1-3]、负折射率透镜^[4-7]、光学“黑洞”^[8]等。由于传统光学系统设计原理的出发点是通过光束在各类光学晶体传播过程中引入的振幅和相位变化来实现调控, 这就造成其厚度远大于光波长, 导致传统光学器件体积庞大笨重, 难以按比例缩小到集成光学系统中。而“超表面”作为“超材料”在二维平面的替代者, 可灵活调控光与物质相互作用过程中的电磁响应特性, 其实

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-28

*E-mail: jiao.lin@szu.edu.cn

现功能的核心是亚波长的周期或准周期性的人工微纳结构单元而不取决于材料的本征属性,这使得基于超表面的平面光学系统在微纳光学领域的研究中发挥巨大的作用并且具有极大的潜力,也成为新一代集成光电子器件与应用的一个重要分支^[9-12]。

本文重点阐述近年来光学超表面在自由空间光场和局域表面光场波前调控的最新进展,主要包括:电磁波传播调控和近场表面等离激元调控。逐一分析两种类型光场调控的响应机理、技术特点以及其所面向的应用领域。在此基础上总结光学超表面所面临的挑战和今后的发展趋势,为基于超表面的平面光学创新设计提供启发和帮助,推动该领域的进一步发展。

2 自由空间光场波前调控

波前调控通常是指对电磁波等相位面的调控从而改变光波传播行为的一种技术手段。1998年 Ebbesen 等人发现可见光和红外波段下亚波长金属孔洞阵列的异常光学透射现象^[13],立刻引起了研究者们对这种现象背后所蕴藏的物理机制的广泛关注。这个现象微观

层面的机理可以概括为:特定频率光波与尺度匹配的微结构共振激发出在金属表面传播的电磁波经过孔径继续向透射方向传播^[14-15]。透射光能量异常增强意味着微纳结构对入射波振幅进行调制^[16]。除了振幅调制之外,通过金属纳米结构成功进行相位调制的工作也被报道^[17]。图 1(a)展示了美国德州大学 Alù 等人设计的 T 型交错的纳米棒阵列结构^[18],经过理论分析和实验测试获得在 500 nm~2500 nm 具有四分之一波片功能的超表面结构。在结构参数设计中他们计算一系列纳米棒长度和厚度的优化组合条件,最终确定如图 1(b)所示的结构大小。

Mayer 等人采用金属反射型结构(MIM)并利用纳米棒之间的耦合效应,实现了在 640 nm~1290 nm 波长范围内的四分之一和半波片的超表面,如图 1(d)所示,这种结构具有 $\pm 40^\circ$ 广角入射优点^[19]。由于金属固有的欧姆损耗较大导致整体效率不高^[20-22],而反射型金属器件的设计可避免这方面不足并实现所需功能,因此金属反射型超表面无论从理论和实验角度都是近年来的研究热点^[23-24]。

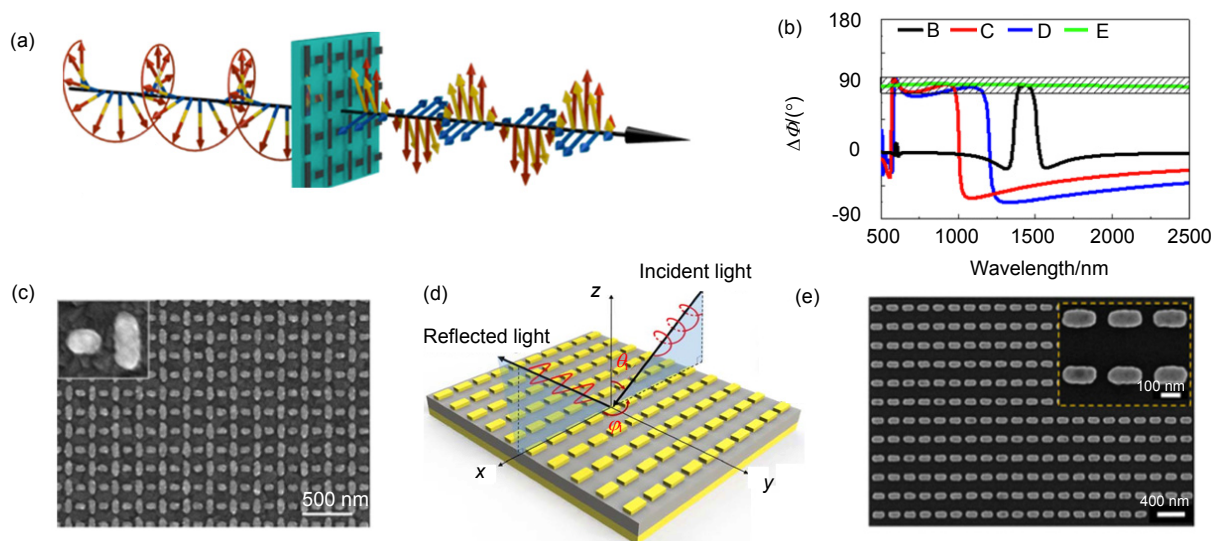


图 1 (a) T 型纳米天线实现四分之一波片原理图^[18]. (b) 正交方向线偏振光的相位差随波长变化关系,其中 B, C, D, E 分别代表四组不同结构参数条件, B 代表金属棒几何尺寸为 $l_x=160$ nm, $l_y=160$ nm, $z=8$ nm, C 代表金属棒几何尺寸为 $l_x=60$ nm, $l_y=160$ nm, $z=45$ nm, D 代表金属棒几何尺寸为 $l_x=60$ nm, $l_y=240$ nm, $z=50$ nm, E 代表金属棒几何尺寸为 $l_x=10$ nm, $l_y=160$ nm, $z=60$ nm, 以上宽度均为 $w=20$ nm, 空隙 $g=10$ nm^[18]. (c) T 型纳米天线扫描电子显微镜图^[18]. (d) MIM 反射型超表面实现广角四分之一波片^[19]. (e) 基本单元纳米棒电子显微镜图^[19].

Fig. 1 (a) Schematic of quarter waveplate achieved by T-type nanoantennas^[18]. (b) Phase shift of orthogonal linearly polarization light as a function of wavelength^[18]. The B-line represents the structural parameters of $l_x=160$ nm, $l_y=160$ nm and $z=8$ nm. The C-line represents the structural parameters of $l_x=60$ nm, $l_y=160$ nm and $z=45$ nm. The D-line represents the structural parameters of $l_x=60$ nm, $l_y=240$ nm and $z=50$ nm. The E-line represents the structural parameters of $l_x=10$ nm, $l_y=160$ nm and $z=60$ nm. The width of nanoantenna is 20 nm and the gap is 10 nm. (c) Scanning electron microscope (SEM) images of interleaved nanoantennas^[18]. (d) Schematic of metal-insulator-metal (MIM) reflective metasurfaces with broadband angles^[19]. (e) SEM images of the typical unit cells in (d). The overview scale bar is 400 nm and the inserted scale bar is 100 nm^[19].

相位调制通常用于实现经典的波片系统,而最近具有开创性意义的研究成果成功地推广了几百年来折/反射光学的基础定理—Snell 定律。自然界中材料的折射率是随光波频率变化的连续函数,但超构表面可在界面处人为施加随空间位置“突变”的梯度相位,最终任意控制折射方向。哈佛大学 Capasso 课题组最早报道这个异常反射和异常折射的现象^[25],他们利用不同结构类型以及不同取向的金属纳米天线逐一匹配 0 到 2π 范围内的八阶离散化的梯度相位,如图 2(a)~2(e) 所示。实验中,他们成功探测到根据重新推导的广义 Snell 定律计算得出的异常反射和折射角度,及携带一阶拓扑荷的光学涡旋。对于光波前相位调控的应用范围还远不止于此,以色列理工学院的 Hasman 教授在对半圆型金属沟槽所激发的表面等离激元研究中发现一种与入射光自旋态相依赖的传播行为^[26]。随后通过设计不同金属型的表面等离子体光学链,在近场和远场均发现了光学自旋霍尔效应^[27-28],首次证实了类似于电子系统中的自旋霍尔效应,光子也表现出自旋态在空间上分裂的现象。此外,由于微结构空间分布带来的梯度相位也可与光子的轨道角动量相耦合,Hasman 等人巧妙地设计出一种金属超表面结构(图 2(f)),将自旋角动量耦合到不同线圈型的金属结构中,获得由轨道角动量不同模式选择准则的手性依赖透射

型光学现象^[29],如图 2(g)所示。

以上工作展示出人工超表面在对振幅、相位和偏振单独调控所实现的特殊功能,而最近本课题组报道了一种超表面结构实现对振幅、相位和偏振的同时调控^[30]。将迂回相位的概念应用于亚波长尺度实现对波前的相位调制,通过设计单元内金属狭缝的几何尺寸来控制透射光的振幅;同时,由于金属狭缝的各向异性对于入射光的偏振具有选择性,因而我们可将叉形光栅和径向光起偏器集成于同一超表面中并实现同时调制三个光束基本参量的目的,如图 3(a)~3(c)所示。

光学涡旋包括螺旋型的相位因子,且理论上定义光学涡旋阶数的拓扑荷数可取任意整数,因此涡旋阶数这个新自由度为下一代光通信系统奠定了物理基础^[31-33]。其中,检测拓扑荷数成为信息通讯中解复用的关键技术^[34]。我们针对这个技术难题提出了一种平面结构可检测出携带不同阶数的光涡旋具体拓扑荷数值,该工作的潜在机制主要是利用轨道角动量与叉形光栅耦合所激发的表面等离激元,由于本征相位信息不同而导致空间光场的振幅重新分布并最终由光电二极管探测^[35]。在实验中,我们取得了对 4 种不同拓扑荷数矢量光束的检测结果。文中详细阐述了所取得的测试结果与理论分析及数值模拟的一致性,证明该方法在涡旋光检测中的应用潜力。

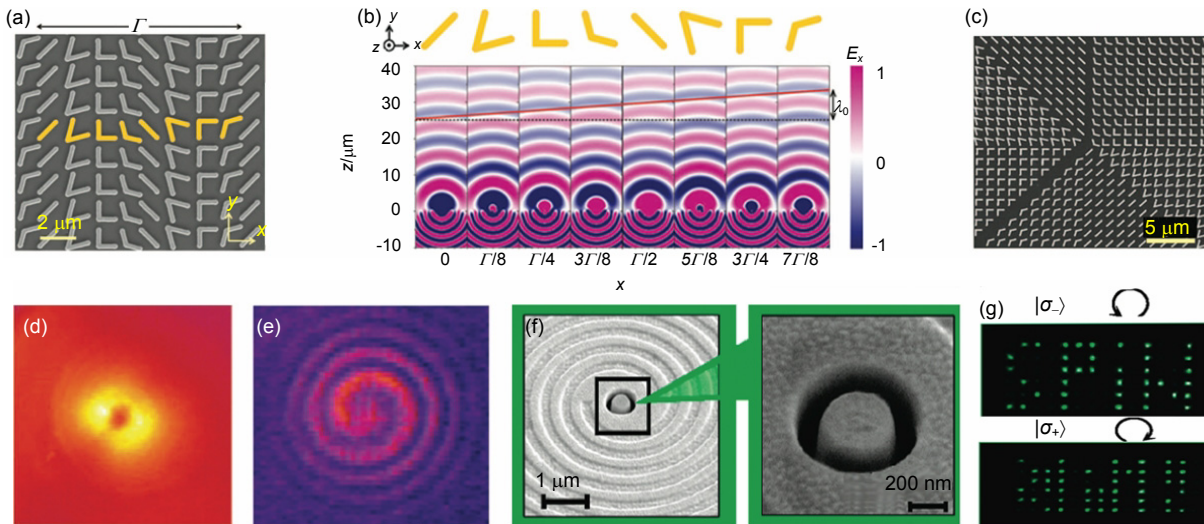


图 2 (a) V 型纳米天线的电子显微镜图片^[25]。(b) 图中黄色标注的结构对应八阶离散化的相位值^[25]。(c) 用于产生涡旋光的超表面电子显微镜图片^[25]。(d) 实验探测得到的一阶涡旋光强度图^[25]。(e) 涡旋光与同轴高斯光干涉实验图^[25]。(f) 手性依赖的金属螺旋线结构的电子显微镜图^[29]。(g) 不同自旋偏振态与超表面相互作用后的透射图^[29]。

Fig. 2 (a) Scanning electron microscope (SEM) images of V-antenna array^[25]. (b) The representative V-antenna nanostructures corresponding to eight discretized phase difference^[25]. (c) SEM images of a plasmonic interface that creates an optical vortex^[25]. (d) The measured far-field intensity distribution of an optical vortex with topological charge one^[25]. (e) The measured spiral pattern created by the interference of vortex beam and co-propagating Gaussian beam^[29]. (f) The magnified SEM image of spiral corrugations of spin-dependent transmission^[29]. (g) The differently measured light transmissions for $|\sigma_{-}\rangle$ and $|\sigma_{+}\rangle$ illuminations^[29].

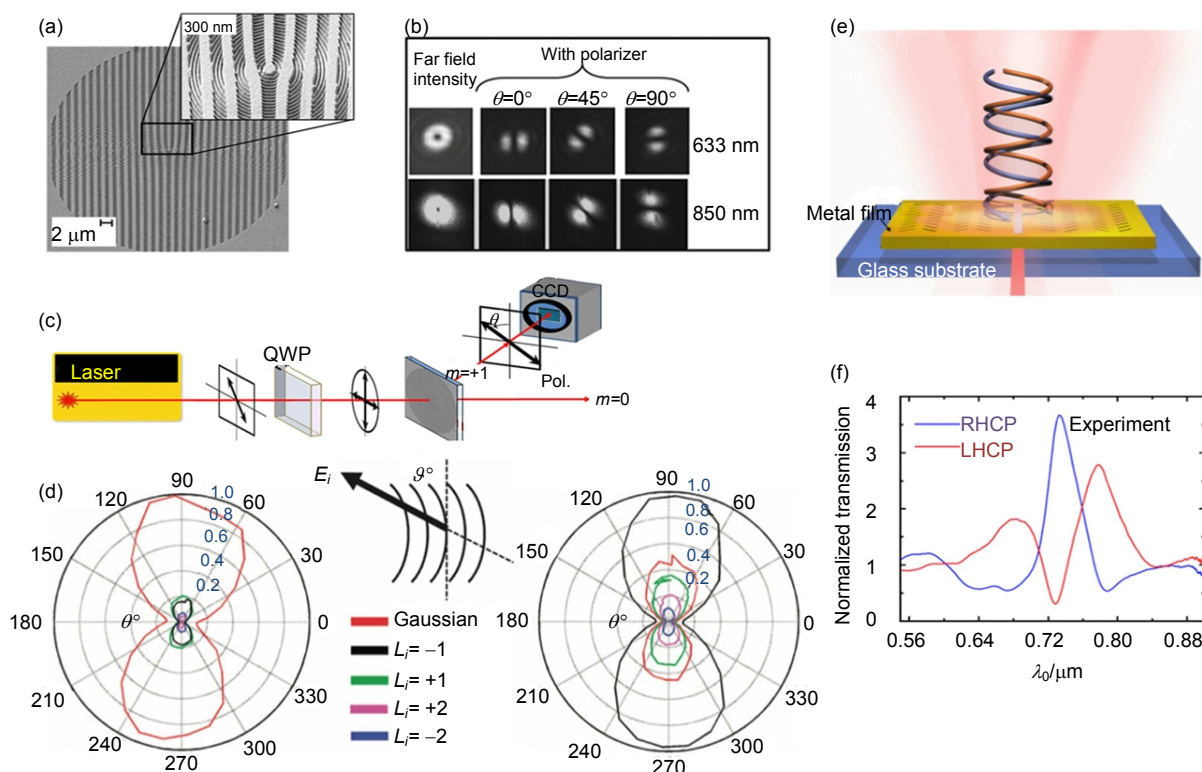


图3 (a) 用于实现径向光偏振片与叉型分光光栅相结合的超表面电子显微镜^[30]。(b) 633 nm和850 nm圆偏振光入射后获得径向偏振光的实验结果^[30]。(c) 矢量光操控的实验测试原理图^[30]。(d) 5种不同轨道角动量实验检测结果图,左图为同心金属圆环结构探测结果,右图为平面叉型超表面探测结果,两种办法均具有区分5种携带不同拓扑荷数的涡旋光的能力^[35]。(e) 手性依赖的异常透射“超孔径”原理图^[36]。(f) 具有手性选择性的“超孔径”的透过光谱^[36]。

Fig. 3 (a) The fabricated structure for generating a radially polarized beam^[30]. (b) The measured far-field intensity distributions at the wavelengths of 633 nm and 850 nm^[30]. (c) The experimental setup^[30]. (d) Detected photocurrent as functions of incident polarization and orbit angular momentum^[35]. (e) Schematic of chiral meta-aperture^[36]. (f) The measured transmission spectra for both left and right handed circularly polarized light^[36].

传统的光学异常透射现象一直存在,是对光子自旋简并态无法区分的物理难题,通常的孔径对于各种偏振状态的透过率相同,即无法分辨入射手性光的椭圆度。针对这个问题,我们设计了一种“超孔径”的纳米表面结构^[36],利用具有手性的超表面结构对普通的光学孔径进行修饰。经过精心设计的超表面结构能够解析出与之作用的光子自旋特性,并将其编码到表面等离激元的位相中。实验中我们首次实现了金属纳米孔径对光子两个自旋态的完全相反的异常透射响应。这种超表面结构对于不同入射光偏振态可实现差异化的透射率,并在很宽频率范围内实现金属超表面的圆二色性^[37],这种超小型化的表面等离激元手性结构在药物/分子的手性检测^[38]、全光开关以及集成自旋光电子器件等方面都具有重要的应用前景^[39]。

3 近场表面等离激元调控

表面等离激元(SPPs)是在金属与介质界面处一种

自由电子和光子相互作用而形成的电磁模式。当电磁波入射到金属与介质分界面时,金属表面的自由电子发生集体振荡,电磁波与金属表面自由电子耦合而形成的一种沿着金属表面传播的近场电磁波,如果电子的振荡频率与入射光波的频率一致就会产生共振,在共振状态下电磁场的能量被有效地转变为金属表面自由电子的集体振动能,这时就形成了一种特殊的电磁模式。到目前为止,SPP在超分辨成像、纳米光刻、高密度数据储存、生物传感、单分子检测及集成光电子等领域都发挥着重要的作用^[40-46]。尤其在科技飞速发展的今天,对器件微型化和高度集成化的要求越来越高,SPP具有很强的局域增强的特点^[47-48],成为在纳米尺度实现光子行为调控的有力手段。

SPP领域的研究主要分为两大类^[49]: 1) 局域表面等离激元共振(localized surface plasmon resonance, LSPR); 2) 传播表面等离激元共振(propagating surface plasmon resonance, PSPR)。关于SPP基本理论

和产生方式等已被多篇综述论文报道^[50-51], 本文重点介绍传播型 SPP^[52-53]。为了实现突破传统的借助金属光栅激发 SPP 方式的局限, 即传播距离有限、光强衰减系数大, 我们提出了一种无衍射的新型表面波并将其定义为“Cosine-Gauss 光束”^[54], 它的无衍射传播特性是通过交叉角度来精确控制的。通过模拟分析和近场光学表征手段, 我们观测到局域增强的 Cosine-Gaussian 光束, 传播距离高达 80 μm 。与此同时, 理论推导证明了这种光束的无衍射特性, 因为其电场横向分量与 x 无关, 即:

$$E_z(x, y) \cong A'f(x)\exp\left(-\frac{y^2}{w_0^2}\right)\cos(k_x y) \quad (1)$$

在随后的工作中, 我们继续通过对两束传播型

SPP 的相移控制, 证明得到了传播距离达到 70 倍 λ_{SPP} 的新奇光束^[55], 如图 4(a)所示。此外对激发 SPP 光栅的调制进一步增加, 我们也能够获得一种近场干涉强度重新分布的现象, 干涉强度的极小值范围与交叉角度有关^[56], 其产生的机理是多束 SPP 传播过程的相消干涉和相长干涉的结果, 在传播距离不同位置, 观测到具有自成像特性的泰伯效应(Talbot effect)。

在此基础上, 提出一种广义的模式匹配型光学超表面, 即实现相干重构以及偏振 / 波长复用的超表面。传统的传播型超表面均是一种静态型 SPP^[57-58], 如图 5(a)~5(b), 而我们在国际上首次提出一种可重构偏振调控型定向耦合的 SPPs^[59]。如图 5(c)所示, 纵向分布的金属狭缝能够激发出 SPP 并在界面处传播, 而横向

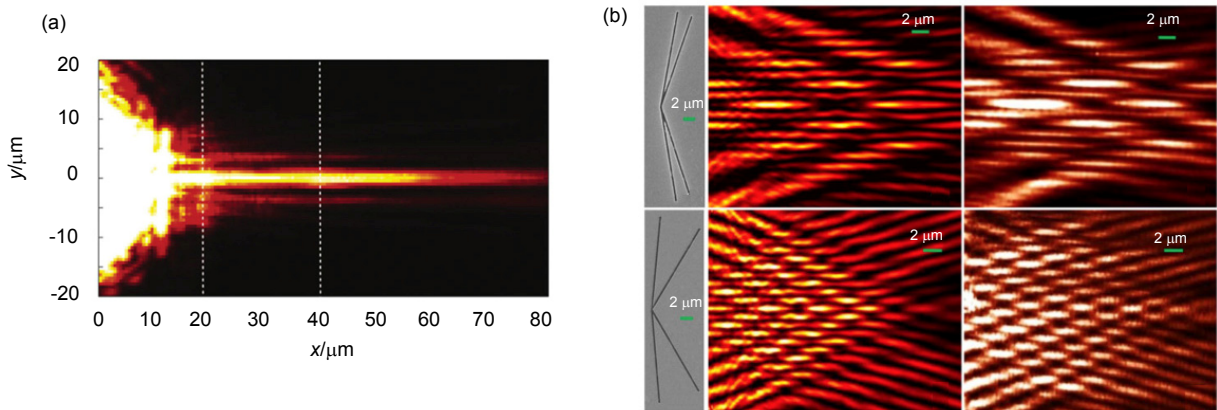


图 4 (a) 基于传播型 SPP 产生的无衍射光束的近场光学表征的实验结果图^[55], 图中 SPP 传播距离达到 80 μm 。(b) 通过调控交叉型金属线栅获得纳米级光学空隙, 实验中观测到近似 Talbot 效应的结果^[56]。

Fig. 4 (a) The near-field intensity distribution of localized Cosine-Gaussian beam observed by a near-field scanning optical microscope. The propagating length is 80 μm ^[55]. (b) The plasmonic voids achieved by interleaved metal gratings. Talbot effect is observed^[56].

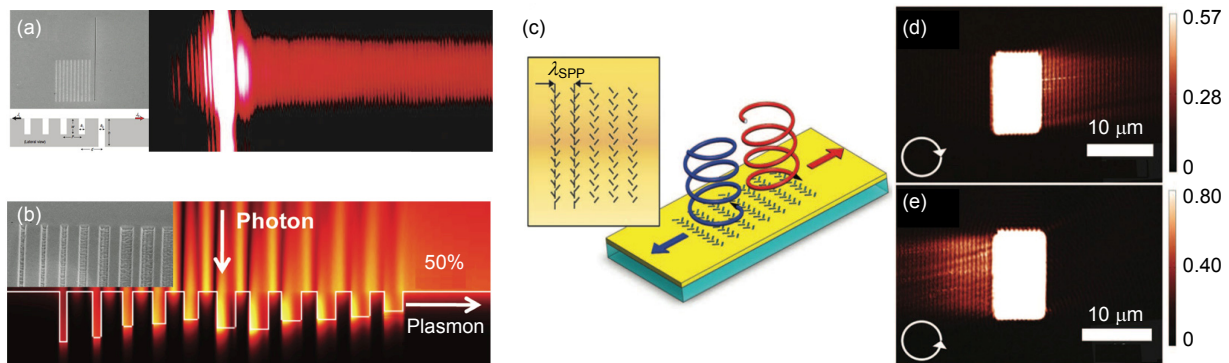


图 5 (a) 在金属光栅一侧加工的辅助结构与 SPP 表面波发生相消干涉从而实现 SPP 单向激发的实验结果图^[57]。(b) 通过调控金属狭缝的线宽和深度来实现表面波的相消干涉所获得的单向激发模拟结果图^[58]。(c) 可重构偏振调控型的超表面原理图^[59]。(d),(e) 实验表征右旋偏振光实现向右侧激发 SPP 而左旋偏振光实现向左侧激发 SPP 的结果图^[59]。

Fig. 5 (a) The experimental result of unidirectional nanoslit coupler for surface plasmons^[57]. (b) The numerical simulation of compact antenna for unidirectional launching and decoupling of surface plasmons^[58]. (c) Schematic of polarization-controllable tunable directional coupling metasurfaces^[59]. (d), (e) Near-field scanning optical microscope image of the metasurface under chiral illuminations^[59].

金属狭缝的分布经过精确计算在对应四分之一 SPP 波长处。通过将左 / 右旋入射光正交方向的相位差转化到二维平面内, 由此可知耦合后的 SPP 波光强分别为

$$I_R \propto C(E_1^2 + E_2^2 - 2E_1^2 E_2^2 \sin \delta),$$

$$I_L \propto C(E_1^2 + E_2^2 + 2E_1^2 E_2^2 \sin \delta), \quad (2)$$

其中: E_1 和 E_2 分别代表入射光在 x 和 y 方向的电场分量、 δ 为 E_1 和 E_2 之间的相位差、 C 为耦合系数。通过式(2)可以得出结论: 1) 入射光光强的左 / 右旋分量之和正比于耦合效率; 2) 其中左旋或右旋分量强度可通过相位调制实现定向耦合。实验中将交错的金属纳米狭缝组成二维阵列, 成功获得 $\pm\sigma$ 自旋偏振态的定向耦合, 如图 5(d)~5(e)所示, 而线偏振的入射光获得双向的激发。多模式匹配的 SPP 超表面可以用于偏振和波长的复用, 这将大大提升集成光电子器件数据传输的容量。此外, 除了实现对于 SPP 定向耦合的调控之

外, 我们后续还设计了一种用于产生无衍射 Airy 光束的超表面结构^[60], 该超表面展现了新颖的波长复用和偏振复用的能力。

在经典光学中, 傅里叶变换是光信息处理的基础, 其原理是指在自由空间中的单色光照射下, 透镜后焦面上光场的复振幅可由透镜物方前焦面的复振幅函数经过傅里叶变换得到。最近, 我们将这个概念延伸至二维平面内^[61]。

SPP 复振幅的分布满足二维亥姆霍兹方程, 经过积分变换可以得到近似物方焦平面分布的 SPP 光场, 即:

$$E_y(x, z) \approx \frac{e^{-ik_{SPP}f\sqrt{f}}}{2\pi} \int_{\Sigma} \left\{ \frac{e^{ik_{SPP}d}}{\sqrt{d}} (1 + \cos \alpha) \right\} U(\theta) d\theta. \quad (3)$$

图 6(a) 标识了计算该方程的必要参数, 经过推导我们得到了一维和二维傅里叶变换近似表达式:

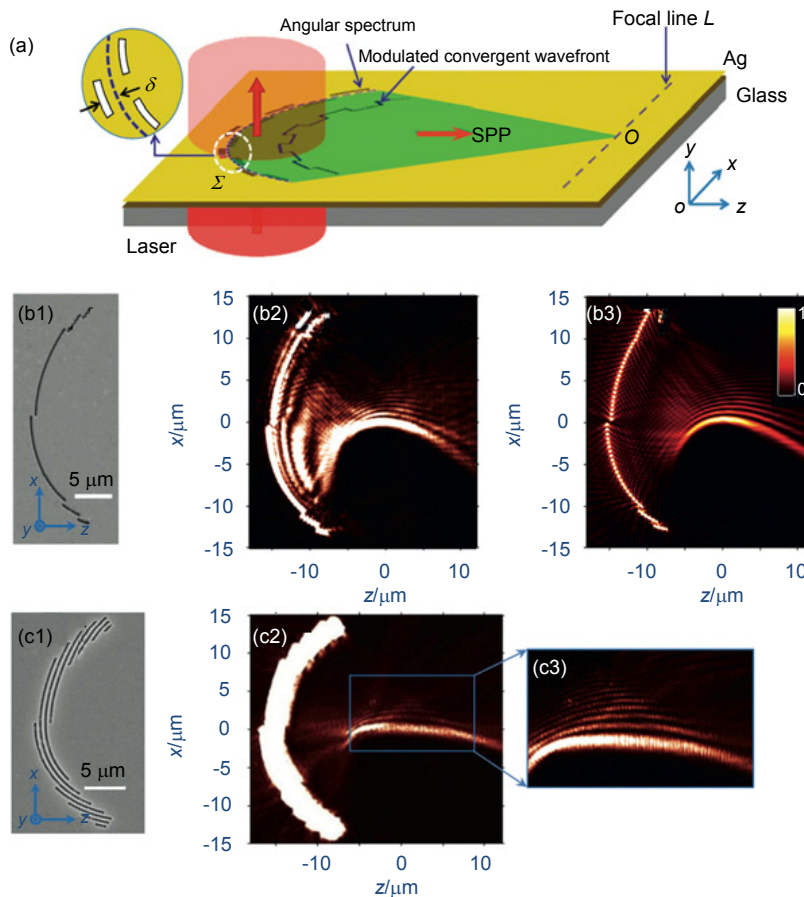


图 6 (a) 二维平面 SPP 表面波傅里叶变换原理图^[61]. (b1)~(b3) 分别是金属表面实现 Weber 光束的加工结构图、近场光学表征图以及计算模拟图^[61]. (c1)~(c3) 分别是金属表面实现 Airy 光束的加工结构图、近场光学表征图以及局部区域放大图像^[61].

Fig. 6 (a) Schematic of in-plane Fourier transform for generating a converging SPP^[61]. (b1)~(b3) represent the fabricated structures of scanning electron microscope (SEM) image, intensity distribution observed by a near-field scanning optical microscope (NSOM) and numerical simulation of plasmonic Weber beam, respectively^[61]. (c1)~(c3) represent the fabricated structures of plasmonic Airy beam generator, the NSOM measurement result and zoom-in view of blue box, respectively^[61].

$$E(x, z = 0) = F_1 \left\{ p \left(\frac{\xi}{f \lambda_{\text{SPP}}} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$E_y(x, z) = F_2 \left\{ U' \left(\frac{\xi}{f \lambda_{\text{SPP}}}, \frac{\zeta}{f \lambda_{\text{SPP}}} \right) \right\}, \quad (5)$$

其中:

$$U' \left(\frac{\xi}{f \lambda_{\text{SPP}}}, \frac{\zeta}{f \lambda_{\text{SPP}}} \right) = U(\theta) \prod \frac{\theta}{\theta_m} \delta(r - f),$$

$$r = \sqrt{\xi^2 + \zeta^2},$$

θ_m 为圆弧的半极角, $\prod(\cdot)$ 和 $\delta(\cdot)$ 分别是矩形函数和狄拉克函数。实验中, 光源选用 He-Ne 激光器, 波长为 633 nm, 线偏振光输出用于激发 SPP。在金属薄膜上刻蚀角度范围为 $\pm 60^\circ$ 的纳米弧线, 分析二维表面聚焦后经过傅里叶变换所得到的表面等离子体 Weber 光束和 Airy 光束。该方法所得到傅里叶变换表达式比自由空间中的表达式简单, 这为基于傅里叶变换的集成光电子器件的研究提供理论依据。在接下来的工作中, 我们使用空间光调制器加载任意相位信息的入射光通过简单的纳米圆狭缝激发实时可控的 SPP 光场, 经过傅里叶变换后, 实现更复杂但可重构的纳米光场图案。

4 结论

基于超表面的平面光学系统已展现出众多突破经典光学局限的能力, 可以通过金属表面等离子体共振实现光束的波前调控, 包括对振幅、相位和偏振的调控。文中所述方法主要是在二维金属材料表面刻蚀纳米结构来激发 SPP 实现对自由空间光场和表面局域光场的调控。通过梳理近年来的工作成果发现, 金属型 SPP 超表面通常仅利用两个基本参量: 纳米狭缝位置和取向来实现调控。这种简单有效的技术可应用于众多前沿研究领域, 如生物传感、纳米光刻、超分辨成像和矢量光通信等。目前这类设计在效率方面仍存在严峻的挑战, 由于金属材料自身的欧姆损耗较大导致器件的整体效率较低, 而有效的改进办法为通过增加增益来实现响应。在 SPP 超表面基础研究领域, 我们认为未来有几个具有潜力的发展方向: 1) 新型二维材料(如石墨烯等)表面等离激元的研究; 2) 除以上所述的基本光学参量调控之外, 引入时域和相干度的调控; 3) 高灵敏、高响应的芯片化超表面器件。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61405031); 中央高校基本科研业务专项资金(N62304008)。

参考文献

- Chen P Y, Soric J, Alù A. Invisibility and cloaking based on scattering cancellation[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(44): OP281-OP304.
- Ni Xingjie, Wong Zijng, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310-1314.
- Liu Wei, Zhang Jianfa, Lei Bing, et al. Invisible nanowires with interfering electric and toroidal dipoles[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2293-2296.
- Valentine J, Zhang Shuang, Zentgraf T, et al. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, **455**(7211): 376-379.
- Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- Wu Aimin, Li Hao, Du Junjie, et al. Experimental demonstration of in-plane negative-angle refraction with an array of silicon nanoposts[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(3): 2055-2060.
- Shalaev V. Optical negative-index metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(1): 41-48.
- Genov D A, Zhang Shuang, Zhang Xiang. Mimicking celestial mechanics in metamaterials[J]. *Nature Physics*, 2009, **5**(9): 687-692.
- Echtermeyer T J, Milana S, Sassi U, et al. Surface plasmon polariton graphene photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(1): 8-20.
- Demetriadou A, Kornyshev A A. Principles of nanoparticle imaging using surface plasmons[J]. *New Journal of Physics*, 2015, **17**: 013041.
- Alizadeh M H, Reinhard B M. Enhanced optical chirality through locally excited surface plasmon polaritons[J]. *ACS Photonics*, 2015, **2**(7): 942-949.
- Zhang Haochi, Fan Yifeng, Guo Jian, et al. Second-harmonic generation of spoof surface plasmon polaritons using nonlinear plasmonic metamaterials[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(1): 139-146.
- Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667-669.
- Weiner J. The physics of light transmission through subwavelength apertures and aperture arrays[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2009, **72**(6): 064401.
- Johns P, Yu Kuai, Devadas M S, et al. Role of resonances in the transmission of surface plasmon polaritons between nanostructures[J]. *ACS Nano*, 2016, **10**(3): 3375-3381.
- Wang Qianjin, Li Jiaqi, Huang Chengping, et al. Enhanced optical transmission through metal films with rotation-symmetrical hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(9): 091105.
- Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible[J]. *Physics Reports*, 2016, **634**: 1-72.
- Zhao Yang, Alù A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(3): 1086-1091.
- Jiang Zhihao, Lin Lan, Ma Ding, et al. Broadband and wide field-of-view plasmonic metasurface-enabled waveplates[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 7511.
- Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, **11**(1): 23-36.
- Yang Yuanmu, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric

- metasurface analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 5753.
- 22 Paniagua-Domínguez R, Yu Yefeng, Miroshnichenko A E, *et al.* Generalized Brewster effect in dielectric metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 10362.
 - 23 Dai Yanmeng, Ren Wenzhen, Cai Hongbing, *et al.* Realizing full visible spectrum metamaterial half-wave plates with patterned metal nanoarray/insulator/metal film structure[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7465–7472.
 - 24 Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Broadband plasmonic half-wave plates in reflection[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 513–515.
 - 25 Yu Nanfang, 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.
 - 26 Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, *et al.* Observation of the spin-based plasmonic effect in nanoscale structures[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(4): 043903.
 - 27 Bliokh K Y, Gorodetski Y, Kleiner V, *et al.* Coriolis effect in optics: unified geometric phase and spin-hall effect[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(3): 030404.
 - 28 Shitrit N, Bretner I, Gorodetski Y, *et al.* Optical spin hall effects in plasmonic chains[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(5): 2038–2042.
 - 29 Gorodetski Y, Shitrit N, Bretner I, *et al.* Observation of optical spin symmetry breaking in nanoapertures[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(8): 3016–3019.
 - 30 Lin Jiao, Genevet P, Kats M A, *et al.* Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(9): 4269–4274.
 - 31 Tan P S, Yuan X C, Lin J, *et al.* Surface plasmon polaritons generated by optical vortex beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(11): 111108.
 - 32 Tan P S, Yuan X C, Lin J, *et al.* Analysis of surface plasmon interference pattern formed by optical vortex beams[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(22): 18451–18456.
 - 33 Zhan Qiwen. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(1): 1–57.
 - 34 Willner A E, Huang F, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, **7**(1): 66–106.
 - 35 Genevet P, Lin Jiao, Kats M A, *et al.* Holographic detection of the orbital angular momentum of light with plasmonic photodiodes[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1278.
 - 36 Du Luping, Kou Shanshan, Balaur E, *et al.* Broadband chirality-coded meta-aperture for photon-spin resolving[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 10051.
 - 37 Wang Xiaoli, Tang Zhiyong. Circular dichroism studies on plasmonic nanostructures[J]. *Small*, 2017, **13**(1): 1601115.
 - 38 Deng Haidong, Chen Xingyu, Xu Yi, *et al.* Single protein sensing with asymmetric plasmonic hexamer via Fano resonance enhanced two-photon luminescence[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(48): 20405–20413.
 - 39 Neugebauer M, Woźniak P, Bag A, *et al.* Polarization-controlled directional scattering for nanoscopic position sensing[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 11286.
 - 40 Wei Shibiao, Lei Ting, Du Luping, *et al.* Sub-100nm resolution PSIM by utilizing modified optical vortices with fractional topological charges for precise phase shifting[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(23): 30143–30148.
 - 41 Liu Zhaowei, Wei Qihuo, Zhang Xiang. Surface plasmon interference nanolithography[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(5): 957–961.
 - 42 Tame M S, McEnery K R, Özdemir Ş K, *et al.* Quantum plasmonics[J]. *Nature Physics*, 2013, **9**(6): 329–340.
 - 43 Tétienne J P, Lombard A, Simpson D A, *et al.* Scanning nanospin ensemble microscope for nanoscale magnetic and thermal imaging[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(1): 326–333.
 - 44 Ciraci C, Hill R T, Mock J J, *et al.* Probing the ultimate limits of plasmonic enhancement[J]. *Science*, 2012, **337**(6098): 1072–1074.
 - 45 Ye Jian, Wen Fangfang, Sobhani H, *et al.* Plasmonic nanoclusters: near field properties of the Fano resonance interrogated with SERS[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(3): 1660–1667.
 - 46 Urban M J, Zhou Chao, Duan Xiaoyang, *et al.* Optically resolving the dynamic walking of a plasmonic walker couple[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(12): 8392–8396.
 - 47 Mühlenbernd H, Georgi P, Pholchai N, *et al.* Amplitude- and phase-controlled surface plasmon polariton excitation with metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(1): 124–129.
 - 48 O'Connor D, Ginzburg P, Rodríguez-Fortuño F J, *et al.* Spin-orbit coupling in surface plasmon scattering by nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 5327.
 - 49 Gubbin C R, Martini F, Politi A, *et al.* Strong and coherent coupling between localized and propagating phonon polaritons [J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(24): 246402.
 - 50 Xu Ting, Wang Changtao, Du Chunlei, *et al.* Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4753–4759.
 - 51 Zhao Zeyu, Pu Mingbo, Wang Yanqin, *et al.* The generalized laws of refraction and reflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(2): 129–139.
赵泽宇, 蒲明博, 王彦钦, 等. 广义折反射定律[J]. *光电工程*, 2017, **44**(2): 129–139.
 - 52 Chen Houtong, Taylor A J, Yu Nanfang. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**(7): 076401.
 - 53 Zhang Lei, Mei Shengtao, Huang Kun, *et al.* Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(6): 818–833.
 - 54 Lin Jiao, Dellinger J, Genevet P, *et al.* Cosine-gauss plasmon beam: a localized long-range nondiffracting surface wave[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(9): 093904.
 - 55 Wei Shibiao, Lin Jiao, Wang Qian, *et al.* Singular diffraction-free surface plasmon beams generated by overlapping phase-shifted sources[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7): 1182–1184.
 - 56 Wei Shibiao, Lin Jiao, Wang Rong, *et al.* Self-imaging generation of plasmonic void arrays[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(15): 2783–2785.
 - 57 López-Tejiera F, Rodrigo S G, Martín-Moreno L, *et al.* Efficient unidirectional nanoslit couplers for surface plasmons[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(5): 324–328.
 - 58 Baron A, Devaux E, Rodier J C, *et al.* Compact antenna for efficient and unidirectional launching and decoupling of surface plasmons[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(10): 4207–4212.
 - 59 Lin Jiao, Mueller J P B, Wang Qian, *et al.* Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, **340**(6130): 331–334.
 - 60 Lin Jiao, Wang Qian, Yuan Guanghui, *et al.* Mode-matching metasurfaces: coherent reconstruction and multiplexing of surface waves[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 10529.
 - 61 Kou Shanshan, Yuan Guanghui, Wang Qian, *et al.* On-chip photonic Fourier transform with surface plasmon polaritons[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, **5**: e16034.