

· 研究进展 ·

# 人工微结构光场调控的研究进展

李占成<sup>1\*</sup> 刘兆庆<sup>2\*</sup> 程化<sup>1</sup> 田建国<sup>1</sup> 陈树琪<sup>1,3\*\*</sup>

(1. 南开大学物理科学学院, 天津 300071; 2. 国家自然科学基金委员会科学传播中心, 北京 100085;  
3. 山西大学极端光学协同创新中心, 太原 030006)

**[摘要]** 人工微结构是增强光与物质相互作用的重要物理体系之一,为光物理与光子学技术的发展提供了全新的机遇和广阔的前景。利用人工微结构实现光场多维度精确调控及其与物质相互作用研究是物理科学研究的前沿,也是未来多学科跨越式发展的重要基础。本文系统介绍了我们在人工微结构光场偏振态、相位、振幅和多维度联合调控方面取得的最新研究进展,展示了人工微结构在光场调控研究领域巨大的研究潜力和广阔的应用前景。

**[关键词]** 人工微结构;光场调控;光学集成;光场调控新方法

在实现对光与物质相互作用有效操控的基础上,获得具有特定功能的光学器件是光学研究领域科研工作者长久以来的共同愿望。受益于新世纪以来微纳加工技术的飞速发展,人们现在可以利用人工微结构实现全新的光学功能和光学现象。借助于亚波长的尺度优势,人工微结构集合了光学介观体系丰富的物理机理、有力的光参量调控手段,为实现对光与物质相互作用的有效操控提供了一种全新的方式。不同于自然界中传统的光学材料,人工微结构的光学响应主要取决于其本身的几何结构而非其构成成分,因而其能够具有自然界中现有材料所不具有的全新光学性质,产生自然界中不存在的全新光学现象。人工微结构丰富独特的物理特性及其对光场的灵活调控能力使其在隐身技术、超分辨成像技术、生物传感技术、微波和太赫兹器件、光学与量子信息技术等诸多领域具有重要的应用前景,近些年成为微纳光子学研究领域的热点方向,为新时代光物理与光子学技术的发展提供了全新的机遇和广阔的前景。

实现光场在微尺度下的有效操控,获得具有特定功能的小型化、轻质化和集成化的全新光学器件对于拓展光学在化学、生命科学与医学、材料科学和信息通信等领域的应用具有重要意义,是目前光学

研究领域的核心科学问题。人工微结构可以在亚波长尺度下通过对结构的有序设计实现对光场偏振态、相位和振幅等多个维度的有效操控。作为光场调控的有效手段,人工微结构在相关研究领域逐渐凸显出其重要的研究地位和广阔的应用前景。本文将系统介绍我们在人工微结构光场偏振态、相位、振幅和多维度联合调控方面取得的最新研究进展,展示人工微结构在光场调控研究领域重要的研究地位和广阔的应用前景,并展望人工微结构光场调控研究的未来发展趋势。

## 1 人工微结构光场偏振态调控

偏振态是光场的一个重要参量,实现对光场偏振态的有效调控在立体成像、液晶显示、光纤通信和传感等领域具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。新世纪以来,随着信息光学与集成光子学的发展,实现偏振光学元件的小型化、集成化,拓宽偏振光学元件的工作频率范围成为了微纳光学研究领域亟待解决的关键问题之一。我们立足于解决这一关键问题,对人工微结构光场偏振态调控的相关问题进行了系统研究,提出了光场偏振态操控的全新方法,实现了对光场偏振态的多种操控<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2018-08-08;修回日期:2018-09-04

\* 共同第一作者

\*\* 通信作者,Email: schen@nankai.edu.cn

### 1.1 基于正交偏振的非手性旋光

旋光是指光场经过介质后偏振方向以传播方向为轴发生一定角度偏转的现象,多发生于自然界的手性介质中。自然界中手性介质的旋光程度取决于光场在介质中的传播距离,改变光场在手性介质中的传播距离或选取不同的手性介质是调节旋光大小的主要方式。我们利用人工微结构在亚波长尺度下直接操控光场相位的方式,在非手性人工微结构中实现了可控旋光<sup>[3]</sup>。相比于传统的旋光方式,这种非手性人工微结构可以通过对微结构单元结构参数的有序设计,实现对旋光度大小更加直接、灵活的控制。如图1所示,通过对两个矩形十字镂空微结构单元的结构参数进行精确设计,入射线偏振光场经过两个微结构单元后可以被分别转换为左旋和右旋圆偏振出射光场。当微结构单元的结构参数发生变化时,两个出射正交圆偏振光场间的相位差随之改变。因此可以通过对微结构单元结构参数的设计实现连续可控的旋光现象。我们证明了这种非手性人工微结构单层设计,可以实现 $3^\circ$ 到 $42^\circ$ 之间的任意角度旋光,而利用少层人工微结构设计我们可以进一步实现 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 之间的任意角度旋光。我们提出的这种新的旋光理论具有广泛的适用性,完善和补充了现阶段的旋光理论,在纳米光学和光子学方面具有很高的潜在应用价值。

### 1.2 宽带的圆偏振与线偏振光转换器

在传统光学中,人们通常利用晶体或者液晶中的双折射效应实现光场线偏振与圆偏振态间的相互转换。因此传统的晶体光学元件的厚度相比于入射

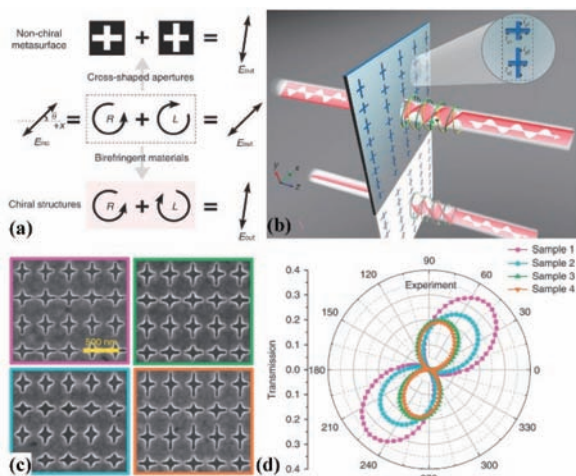


图1 (a) 可调谐旋光现象的理论示意图, (b) 非手性人工微结构旋光过程示意图, (c) 4个非手性人工微结构样品的SEM图, (d) 4个样品旋光程度的实验测量结果,入射光场线偏振角度为 $45^\circ$ <sup>[3]</sup>

光场的波长要大的多,其在工作频率范围和组成材料选择上也具有较多的限制。人工微结构中光场线偏振态与圆偏振态间的相互转换不再依赖于光程差的累积。利用微结构的各向异性光谱振模式,人们在亚波长尺度下就可以实现光场线偏振态与圆偏振态间的相互转换<sup>[4-7]</sup>。我们提出了一种超薄纳米天线人工微结构阵列,通过对单个纳米天线微结构在两个垂直方向上光学响应的巧妙设计,在近红外波段透射模式下实现了宽带高效率的光场线偏振态与圆偏振态间的相互转换<sup>[8]</sup>。所设计的人工微结构在1100 nm到2000 nm波段范围内可以使透射光场在两个垂直方向上产生 $90^\circ$ 的相位差,如图2所示。该设计在1100 nm到2000 nm波段范围内可以实现效率高于40%的光场圆偏振态到线偏振态的转换,同时在1170 nm到1590 nm波段范围内其还可以实现效率高于30%的光场线偏振态到圆偏振态的转换。同时我们还证明了所设计的人工微结构的光学响应在微结构的结构参数有限变化时保持稳定,因此该设计为近红外波段透射模式下光场圆偏振与线偏振态间的相互转换提供了一种有效方式。

### 1.3 新型人工微结构二分之一波片设计方法

在亚波长尺度下实现传统二分之一波片所具有的光学功能是微尺度光场偏振态调控的基本需求。目前,利用单层金属人工微结构中的各向异性光谱振模式很难在透射模式下实现对光场两个垂直分量间 $180^\circ$ 的相位延迟。因此具有与传统二分之一波片类似光学功能的金属人工微结构设计多在反射模式下工作<sup>[9, 10]</sup>。日本信州大学的Nakata教授等人利用双层人工微结构设计在太赫兹波段透射模式下

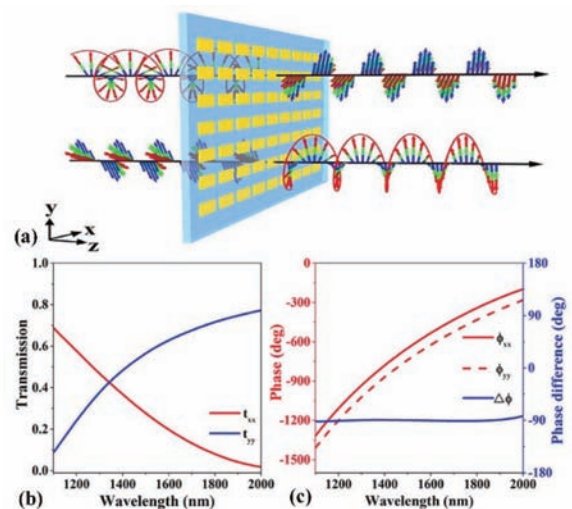


图2 (a) 人工微结构设计的示意图,透射光场在两个垂直方向上的(b)透射率和(c)相位差<sup>[8]</sup>

实现了类二分之一波片的光学功能<sup>[11]</sup>,但是该设计只能在单一波段工作。能否利用人工微结构在透射模式下宽波段范围内实现传统二分之一波片所具有的光学功能是人工微结构光场偏振态调控研究中亟待解决的关键性问题。围绕这一问题,我们基于单层交错纳米天线人工微结构阵列,提出了一种具有广泛适用性的人工微结构二分之一波片设计方法,实现了偏振转换角与波长无关的宽带二分之一波片<sup>[12]</sup>。

如图 3 所示,所设计的人工微结构中的每一个纳米天线微结构都具有类似于传统偏振片的光学响应,其透光方向沿纳米天线短轴方向。通过在每一列将两个旋转角度不同的纳米天线微结构交错排列,可以使得出射光场的偏振方向与入射光场的偏振方向关于两个纳米天线夹角的垂直平分线镜像对称,因而可以实现对任意线偏振光的偏振角进行从  $\theta$  到  $-\theta$  的转化。与此同时,在保证每一列的交错纳米天线微结构间夹角不变的前提下,通过连续改变每一行中微结构的旋转角度可以进一步实现对出射转化光场波矢的控制,进而使得出射转化光场与出射原偏振光场分离。我们所设计的人工微结构实现了传统二分之一波片所具有的光学功能,且由于转化光场与原偏振光场分离,因此出射转化光场具有极高的线偏振度。我们所提出的这种设计方法具有广泛的适用性,为人工微结构二分之一波片的设计提供了一种通用方法,在光子学领域具有非常广泛的应用前景。

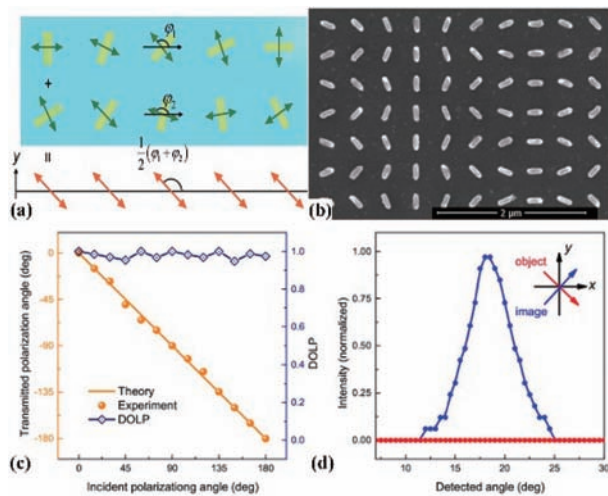


图 3 (a) 人工微结构二分之一波片设计原理图, (b) 微结构样品 SEM 图, (c) 转化光场的偏振角与线偏度随入射光偏振角的变化, (d) 实验得到的转化光场的透射强度随探测角的变化<sup>[12]</sup>

### 1.4 线偏振垂直转化与非对称透过现象

线偏振光场偏振垂直转化是指具有特定偏振方向的人射线偏振光场经过介质后偏振方向旋转  $90^\circ$  的现象,是人工微结构光场偏振态调控的主要研究内容之一。单层人工微结构对于线偏振光场的偏振转化能力非常有限,例如 L 型人工微结构仅能实现对入射线偏振光场偏振方向小于  $45^\circ$  的偏转<sup>[13]</sup>。因此目前人工微结构中线偏振光场偏振垂直转化的实现多基于少层结构设计<sup>[14, 15]</sup>。能否利用单层人工微结构设计实现线偏振光场偏振垂直转化引起了相关研究人员的极大兴趣。我们提出了一种实现线偏振光场偏振垂直转化的全新理论,基于具有各向异性光学响应的单层双 F 型人工微结构在太赫兹波段实现了宽带的线偏振光场偏振近垂直转换<sup>[16]</sup>。

如图 4(b) 所示,在  $0.87\text{--}1.47\text{ THz}$  波段范围内,线偏振光场的偏振偏转角度大于  $75^\circ$ ,在  $0.92\text{ THz}$  和  $1.38\text{ THz}$  两个波段下线偏振光场的偏振偏转角度分别达到了  $88^\circ$  和  $87^\circ$ 。在所设计的微结构中,偏振与入射光场方向相同的分量在近场干涉相消,而结构弯折处电流环路激发的偏振垂直于入射光场的分量能够传播到远场,进而实现了线偏振光场的偏振近垂直转化。该理论对于人工微结构光线偏振态控制具有广泛的适用性。在该研究方向上,我们还提出了一种增强单个 L 型微结构线偏振转换能力的全新方式,通过将 L 型结构与纳米天线阵列相组合,在近红外  $1000\text{ nm}$  宽的波段范围内实现了转换效率高于  $95\%$  的线偏振光场偏振垂直转化<sup>[17]</sup>。同时,我们发现在这种由 L 型结构与纳米天

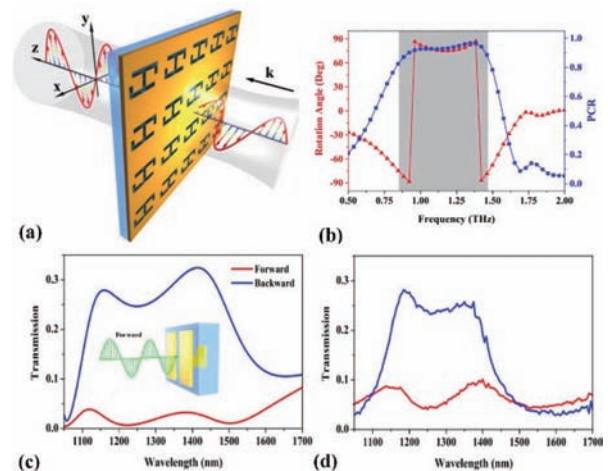


图 4 (a) 单层线偏振光场偏振垂直转换器的结构示意图, (b) 偏振转换角度和偏振转换率 (PCR) 随入射频率的变化<sup>[16]</sup> (c) 偏振方向沿  $x$  轴的线偏振光从两个方向入射到双层人工微结构上时,对应透射谱的数值模拟和 (d) 实验测量结果<sup>[18]</sup>



线阵列组合而成的双层人工微结构中,线偏振垂直转化的效率在两个入射方向上是不同的。基于这一特点,我们利用相似设计在近红外波段实现了宽带的线偏振光非对称单向透过现象,如图4(c)和4(d)所示<sup>[18]</sup>。该设计为光波段线偏振光场非对称单向透过现象的产生提供了全新且有效的设计方式,在光场偏振转换、类二极管光器件设计、超快光信息传输以及光学互连等方向具有广泛的应用前景。我们还在实验上证明了该设计中非对称单向透过现象的效率并不会受到两层微结构间对齐程度的影响,因此大大降低了该类人工微结构设计对制造工艺的要求,为该类设计的实际应用提供了便利。在此基础上,我们还进一步实现了圆偏振光场的非对称单向透过,并通过在人工微结构中采用石墨烯材料实现了对圆偏振光场非对称透过现场产生波段的动态调谐<sup>[19, 20]</sup>。

### 1.5 光场偏振态动态调控

实现对光场偏振态的动态控制在信息光学、防伪成像等领域具有广泛应用前景,是光学系统集成化的必然要求。我们通过将石墨烯材料引入人工微结构设计当中,在中红外波段实现了对光场偏振态的动态连续控制,如图5所示<sup>[21]</sup>。在所设计的人工微结构中,金属矩形镂空微结构具有各向异性的光学响应,仅对入射光场  $y$  方向电场分量会产生显著的近场增强作用。因此通过将矩形镂空结构与单层石墨烯结合,可以有效地增强单层石墨烯与光场  $y$  方向电场分量的相互作用强度。通过外加电压改变石墨烯费米能级的方式,可以进一步对石墨烯的光学响应进行控制,从而有效地改变出射光场  $y$

方向电场分量的相位,进而实现对出射光场在左旋偏振态,垂直线偏振态与右旋偏振态之间连续变化的控制。该设计可以应用于光信息传输中的偏分多路复用技术中,在光通信与光编码领域具有广泛的潜在应用价值。与此同时,我们应用石墨烯光学响应的可调控特性,基于L型石墨烯微结构设计在反射模式下实现了光场的线偏振垂直转化,并通过改变石墨烯的费米能级实现了对工作波段的动态调控<sup>[22]</sup>。此外,我们还提出了一种单层石墨烯十字天线微结构,实现了线偏振光的偏振旋转和从线偏振光到圆偏振光和椭圆偏振光的光偏振动态转化<sup>[23]</sup>。

## 2 人工微结构光场相位调控

在传统光学中,人们多通过控制光场在具有不同折射率的介质中的传播光程来实现对光场相位的有效控制。与传统的光场相位调制器相比,人工微结构可以在亚波长尺度下利用共振相位、几何相位和传输相位3种不同的相位调控原理实现对光场相位  $0-2\pi$  的任意控制<sup>[24]</sup>,相关研究对于光信息传输、计算全息和超分辨成像等领域的发展具有重要意义。我们围绕如何提高人工微结构光场相位调控效率,以及如何在大大入射角度下实现对光场相位的有效调控等问题在微尺度光场相位调控领域开展了系列研究。

### 2.1 人工微结构光场相位调控效率的有效提高

人工微结构中对圆偏振光场相位的调控多基于几何相位原理,人们在设计上通过对金属单棒微结构的简单旋转就能够实现对圆偏振光场相位  $0-2\pi$  的任意控制<sup>[25]</sup>。当左旋(右旋)圆偏振光场入射到旋转角度为  $\theta$  的金属单棒微结构上时,出射的右旋(左旋)偏振光场将会产生  $-2\theta(2\theta)$  的相位延迟。因此基于几何相位原理的人工微结构对于圆偏振光场相位的调控效率主要决定于微结构的圆偏振垂直转换效率,即出射光场中旋性与入射光场正好相反部分所占的比例。然而,由于金属单棒微结构的光学响应与传统的偏振片相类似,因此其圆偏振垂直转换效率的理论上限不高于25%,而在已有的工作报道中其效率多低于10%<sup>[26, 27]</sup>。我们在提出多棒能级杂化及镜像理论的基础上,通过增加微结构单元中金属棒的数量将几何相位的调控效率提高至理论极限,同时有效地拓宽了微结构的响应带宽,如图6(a)和6(b)所示<sup>[28]</sup>。我们所提出的镜像理论为几何相位的物理图像提供了更为直观的解释,大大方便

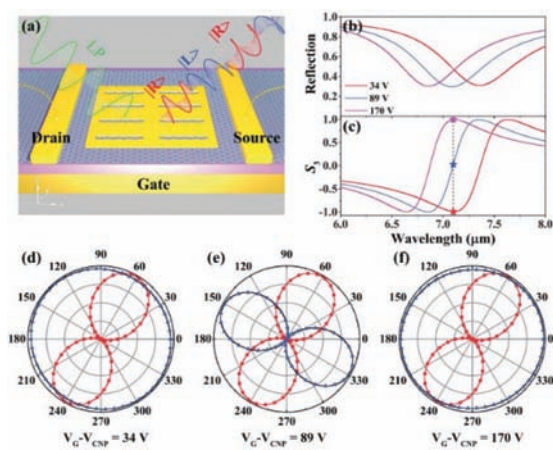


图5 (a) 石墨烯人工微结构实现对反射光偏振态动态调控的示意图, (b) 不同外加电压下, 反射光场对应的反射谱和 (c)  $S_3$  参数, (d—f) 3个特殊外加电压下, 入射光场(红色)与出射光场(蓝色)的偏振态<sup>[21]</sup>

了研究者对几何相位的进一步应用。另一方面,我们基于矩阵光学的基本理论,证明了具有近似于二分之一波片光学响应的人工微结构可以实现效率趋于100%的几何相位控制。在此基础上,我们提出了一种全新的金属棒微结构设计,通过增加金属棒的厚度产生了新的共振模式,进而在1067 nm波长下实现了对入射光场在金属棒长轴方向上 $\pi$ 的相位延迟。所设计的金属棒微结构具有类似于二分之一波片的光学响应,利用由其组成的相位梯度渐变微结构阵列可以实现效率高于70%的光子自旋霍尔效应,如图6(c)和6(d)所示<sup>[29]</sup>。我们所提出的理论分析和金属棒微结构的全新设计方式在光子自旋操控的相关研究领域(光通信、光分束、光自旋选择、光自旋选择全息成像)中都具有重要的应用价值。

## 2.2 基于角度弱依赖相位调控实现傅里叶微透镜

傅里叶变换作为光通信领域的基础理论之一,在民用与军用领域均有重要的研究意义与应用,如压缩感知、图像传输等。所谓傅里叶透镜,就是可以对前焦平面的入射光场进行傅里叶变换并将变换结果呈现在后焦平面上的透镜。传统的傅里叶透镜主要利用厚度缓慢变化的薄透明介质实现,通过控制傍轴条件下光场经过不同厚度介质所积累的相位差来调控相位。因此传统的傅里叶透镜多在傍轴条件下工作,数值孔径难以提高。由复杂透镜组构成的傅里叶透镜虽能突破傍轴条件,但是这种设计大大

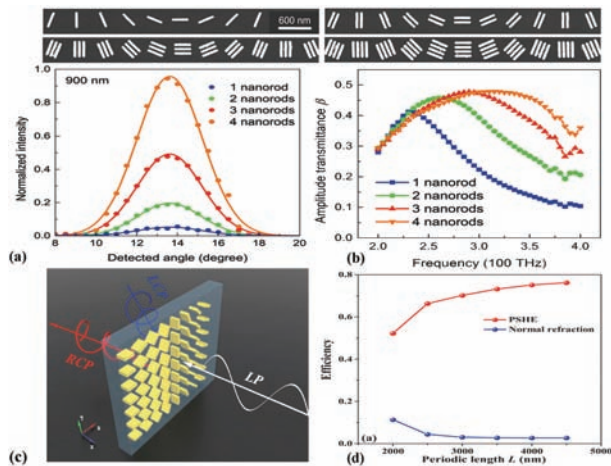


图6 (a) 入射光波长为900 nm时,4种结构单元包含不同个数金属棒的人工微结构设计的几何相位调控效率的归一化对比,(b) 不同波长下4种人工微结构设计中偏振垂直转换光的振幅透过率<sup>[28]</sup>(c) 相位梯度渐变金属棒微结构阵列中光子自旋霍尔效应(PSHE)的示意图,(d) 具有不同相位梯度的金属棒微结构阵列中光子自旋霍尔效应的产生效率<sup>[29]</sup>

增加了生产成本与透镜体积。人工微结构可以在亚波长尺度下实现对光场相位的有效控制,因此利用人工微结构可以方便地实现传统透镜所具有的光学功能<sup>[30, 31]</sup>。然而目前已有的人工微结构透镜多用于成像,适用于大角度(大于 $30^\circ$ )入射光场的高效率傅里叶透镜还未被实现,这主要是由于在现有的人工微结构透镜设计中单个结构单元对光场的相位调控多依赖于光场的入射角度。因此,利用人工微结构实现角度弱色散的光场相位调控对于微尺度下傅里叶透镜的设计具有重要意义。我们基于高折射率电介质波导的模式保护性质,利用一系列具有相同高度和不同宽度的电介质波导微结构实现了角度弱色散的光场相位调控,并进一步通过相位角度函数的一阶近似方法,实现了高数值孔径的傅里叶微透镜,如图7所示<sup>[32]</sup>。该透镜突破了传统傅里叶透镜的傍轴约束条件,对于入射角度在 $0^\circ$ 到 $60^\circ$ 之间的光场都有较好的傅里叶变换能力,且其工作波段覆盖了1100 nm到1700 nm的宽波段范围。我们提出的角度弱色散光场相位调控方法为进一步研究突破衍射极限的微透镜以及集成化多功能光子学微系统奠定了良好基础。

## 2.3 人工微结构相位调控的动量分析新方法

近来,人工微结构光场波前调控在计算全息和多路复用领域取得了广泛的应用<sup>[33, 34]</sup>。基于惠更斯-菲涅尔原理和傅里叶分析方法,人们通过对人工微结构阵列中每一基本单元对光场相位延迟的精确设计,有效地实现了对光场波前的任意控制<sup>[35, 36]</sup>。利用亚波长尺度人工微结构产生的离散相位分布来

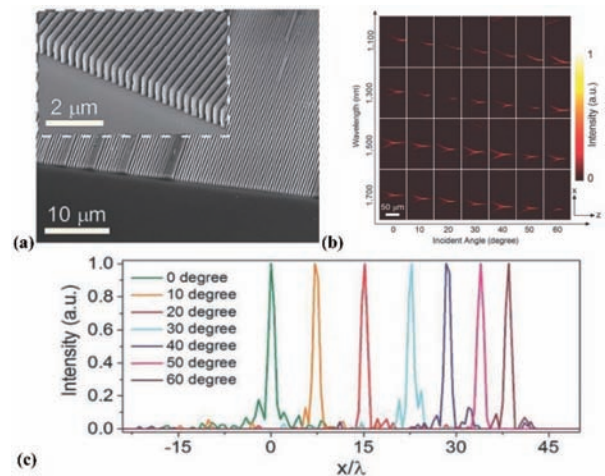


图7 (a) 傅里叶微透镜样品的SEM图像,(b) 不同波长及入射角度下的傅里叶透镜透射场强度分布,(c) 1500 nm光场沿不同角度入射时,焦点截面的光场强度和空间位置<sup>[32]</sup>



拟合连续性相位分布进而调控光场波前是目前人工微结构光波前操控的主要研究思路。这一准连续假设的有效性通常由亚波长条件来保证,即微结构的尺寸大小小于波长即可。然而当相邻微结构单元对光场产生的相位延迟差异较大时,或者当微结构单元的尺寸接近甚至大于波长时,准连续假设就不再适用了。我们基于人工微结构相邻单元间弱耦合这一基本假设,在数学上利用矩形函数提出了微结构单元的光响应函数,并进一步得到了基于傅里叶理论的针对人工微结构的衍射分析新方法,如图8所示<sup>[37]</sup>。通过将微结构的关键参数简化成响应强度、相位延迟和等效尺度3个参量,并进一步通过对所有微结构单元的散射场进行叠加处理,我们给出了相邻单元间弱耦合的人工微结构在实空间以及动量空间的衍射函数。基于对人工微结构动量空间衍射函数的分析,我们提出了人工微结构光场波前操控设计的4个重要指导原则。特别地,我们提出了收敛性条件,补全了之前领域内研究中普遍采用的亚波长条件的不充分性。我们基于提出的衍射分析方法,设计和实现了多种功能性人工微结构超透镜;同时,我们还将该理论应用于国际同行的研究工作中,通过将我们的理论模型、同行的实验结果和数值模拟结果进行对比,验证了所提出的衍射分析方法的普遍适用性。我们所提出的人工微结构衍射分析方法为人工微结构波前控制的相关研究提供了一个广阔平台,在光子学领域、微纳信息领域有广泛的应用前景。

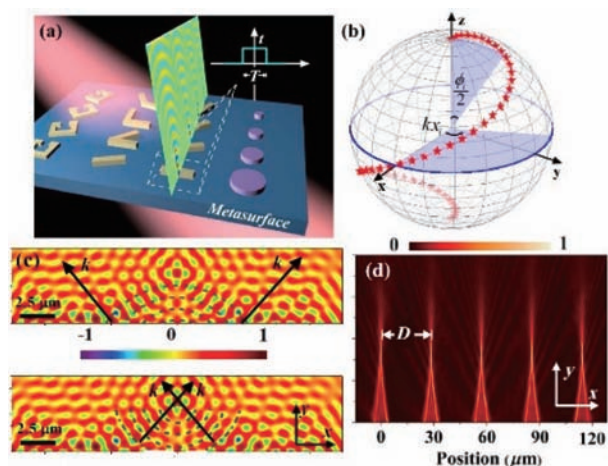


图8 (a) 相邻单元弱耦合的人工微结构的光场散射模型,(b) 人工微结构衍射分析球,(c) 设计的凹凸双透镜的透射光电场分布图,(d) 设计的五焦点透镜的光场强度分布<sup>[37]</sup>

## 2.4 石墨烯人工微结构深亚波长尺度下的光场相位调控

在基于金属或电介质材料的人工微结构设计中,基本微结构单元的尺寸多介于八分之一到二分之一波长之间,因此无法实现对光场相位在深亚波长尺度下的有效控制。在近红外波段,我们发现基于石墨烯材料设计的人工微结构中基本结构单元的尺寸可以趋于八十分之一波长。因此,石墨烯人工微结构为中红外波段深亚波长尺度下光场相位的任意调控提供了一种有效方式。我们提出了一种由石墨烯微十字天线组成的相位梯度渐变人工微结构阵列设计,在中红外波段透射模式下实现了工作波长可调的圆偏振异常透射光场的生成,如图9(a)和9(b)所示<sup>[38]</sup>。通过对石墨烯费米能级的连续改变,可以在单一波长下实现对异常折射效率的控制以及在宽波段下实现对异常光束产生波段的调控。在此基础上,我们进一步设计了具有不同相位渐变梯度的石墨烯人工微结构阵列,在中红外波段反射模式下实现了多角度和大角度的圆偏振光场异常折射,如图9(c)和9(d)所示<sup>[39]</sup>。同时,利用该微结构设计我们还实现了拓扑荷数高达15的涡旋光场的生成。利用石墨烯人工微结构实现对光场深亚波长尺度下的有效控制,进而实现大角度光场异常折射和高阶涡旋光束生成在信息光学、偏振分束、高数值孔径超透镜的研发等领域具有重要的应用价值。

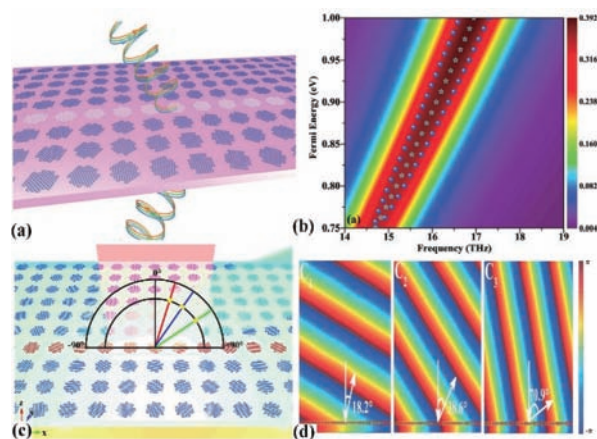


图9 (a) 相位梯度渐变石墨烯人工微结构阵列的示意图,(b) 异常折射效率与入射光场波长和石墨烯费米能级的关系<sup>[38]</sup> (c) 反射式石墨烯人工微结构阵列的示意图,(d) 具有不同相位渐变梯度的石墨烯人工微结构阵列中的光场异常折射现象<sup>[39]</sup>

### 3 人工微结构光场振幅调控

实现对光场振幅的任意控制在传感、储能、成像、照明、通信等领域有着广泛的应用前景。人工微结构实现了亚波长尺度下的光与物质的相互作用，为光场振幅调控提供了新的有效手段。探索人工微结构中光与物质相互作用的新物理、实现对光场的完美吸收，选择透过或反射是人工微结构光场振幅调控的几个热门研究方向。了解人工微结构中光与物质的相互作用方式是拓展其在光场振幅调控方向应用的前提条件，而利用人工微结构实现对光场的选择性吸收、透射和反射在光储能、光滤波和光成像等领域具有非常重要的实际应用价值。我们在相关方向开展了系列工作，获得了一系列重要结果。

#### 3.1 多重法诺共振与偏振无关等离子激元诱导透明的实现

高品质因子光学谐振器在非线性光学、生物传感、光学开关、激光和手性光学研究领域扮演着非常重要的角色<sup>[40, 41]</sup>。法诺共振是高品质因子光学谐振器设计的有效方式之一，主要通过两个阻尼系数相差较大且分别具有宽带和窄带光学响应的谐振器间的相互耦合来实现<sup>[42]</sup>。利用人工微结构可以在亚波长尺度下实现光学谐振器的有效设计，因此为法诺共振的实现提供了一种全新方式。我们基于非对称电介质人工微结构，设计了一种能产生 4 个高品质因子法诺峰的共振器件，如图 10(a) 和 10(b) 所示<sup>[43]</sup>。其品质因子最大可达到  $10^5$  量级，调制深度可接近 100%。该器件可以被应用于折射率传感研究，其敏感度可达 370 nm/RIU，灵敏值(FOM)可达 2 846。

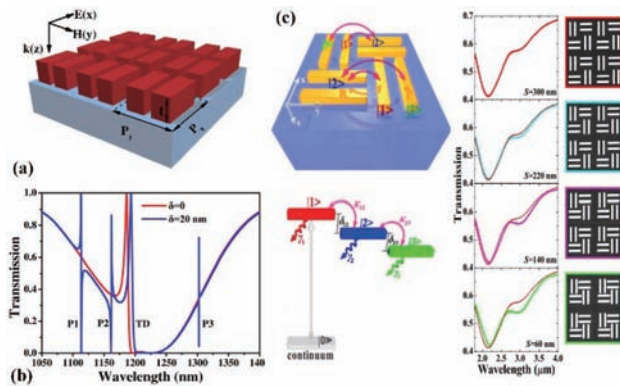


图 10 (a) 具有多重法诺共振的电介质人工微结构示意图，(b) 非对称电介质人工微结构产生的 4 个高品质因子的法诺峰<sup>[43]</sup> (c) C4 对称人工微结构设计中的等离子激元诱导透明现象与对应的四能级理论模型<sup>[46]</sup>

等离子激元诱导透明效应是一种特殊的法诺共振现象，一直被研究者认为只能存在于非对称的人工微结构设计当中，因此人工微结构中等离子激元诱导透明现象的实现对于入射光的偏振态有特定的要求，这极大地限制了其应用<sup>[44, 45]</sup>。我们提出了一种在整体上具有 C4 对称性的人工微结构设计，通过对非对称微结构的旋转对称排布，实现了偏振无依赖广角的等离子激元诱导透明现象，如图 10(c) 所示<sup>[46]</sup>。我们在理论上提出了等离子激元诱导透明现象产生的新机制，建立了四能级理论模型，很好地解释了实验上观测到的光谱衍化。该工作打破了研究者对于等离子激元诱导透明现象实现方式的传统认知，促进了等离子激元诱导透明向实际应用的过渡。在此基础上，我们进一步开展了动态调控等离子激元诱导透明的研究，通过在人工微结构中引入二氧化钒相变材料和石墨烯材料，分别实现了对等离子激元诱导反射效率和等离子激元诱导透明工作波段的动态调控<sup>[47, 48]</sup>。

#### 3.2 少层人工微结构双向光场完美吸收

实现对光场的完美吸收是人工微结构光场振幅调控的主要研究方向之一，在光储能、热成像领域有重要的应用价值。在早期研究中，我们通过设计人工微结构的整体对称性，调控相邻微结构间的耦合效应，很好地实现了广角偏振无依赖的宽带和多带光完美吸收器<sup>[49-51]</sup>。目前已有的基于人工微结构的光完美吸收器主要采用金属反射层-电介质-金属微结构的三明治型结构<sup>[52]</sup>。由于金属反射层的存在，已有的人工微结构光完美吸收器只能实现对光场在单一方向上的完美吸收。我们基于少层人工微结构中的近场光场耦合效应，提出了利用相位有序排布实现光场完美吸收的新机理，如图 11 所示<sup>[53]</sup>。我

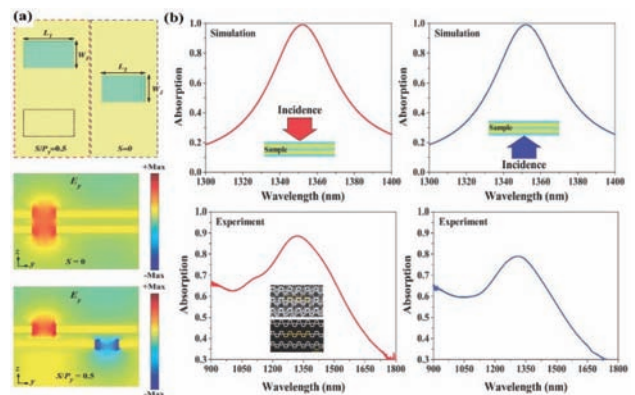


图 11 (a) 少层人工微结构双向完美吸收器的结构示意图和层间驻波耦合效应 (b) 光场从两个方向入射到人工微结构上时对应的吸收谱的数值模拟和实验测试结果<sup>[53]</sup>



们通过设计双层镂空金属波导单元,利用双层微结构间的光场驻波耦合效应,实现了对出射光场相位的有效调控。在此基础上,我们通过对人工微结构基本单元的有序排布在人工微结构表面形成了高梯度的相位分布,从而使得入射光场转化为倏逝波,进而实现了对光场的双向完美吸收。该设计对沿正反两个方向传播的光场的吸收相互独立,因此将传统人工微结构光吸收器的吸收容量提高了一倍,在光学探测、太阳能收集以及传感等方面具有很好的应用前景。基于少层人工微结构的光场双向完美吸收的实现,为微纳光学领域光与物质相互作用的研究提供了新的思路,也为新型光吸收器件的开发提供了新的可能。

### 3.3 光场的偏振依赖反射与透射

实现对某一特定频率或某一特定偏振态光场的选择性反射或透射对于色度学、偏振控制与检测、防伪成像等光学应用领域的研究和发展具有重要意义<sup>[54-56]</sup>。人们通过人工微结构在亚波长尺度下实现对光场振幅的有效调控,可以在可见光波段实现频率依赖的光场透射或反射,从而使得经过人工微结构的散射光场呈现出不同的颜色。人工微结构的颜色是由结构本身对光场振幅的调控效应决定的,因此人们可以通过对人工微结构的精确设计实现对散射光场呈现颜色的人为控制。我们提出了一种基于二氧化钛材料的非对称人工微结构设计,该设计可以在两个相互垂直的线偏振态下分别反射特定频率的光波,从而产生偏振依赖的颜色变化,如图12所示<sup>[57]</sup>。该人工微结构设计中采用的二氧化钛材料在可见光波段具有高折射率低损耗的特性,因此能够实现光场高效率的反射(反射效率理论上接近

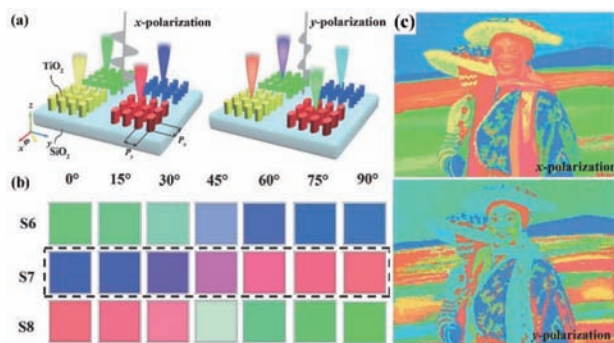


图12 (a) 基于二氧化钛材料的非对称人工微结构设计所产生的偏振依赖微结构颜色的示意图, (b) 3种具有不同结构参数的人工微结构设计在不同偏振角度线偏振光场入射下呈现的反射颜色, (c) 基于非对称人工微结构设计的微尺度画作以及其在不同线偏振入射光场下的颜色<sup>[57]</sup>

100%),从而产生高分辨率和高纯度的颜色。通过对人工微结构的结构参数和结构周期进行单独调节,我们还同时实现了对产生颜色色调与饱和度的调控。所设计人工微结构的颜色会随着入射光偏振角度变化而有明显的变化,甚至可以得到RGB三原色转换。我们所提出的偏振依赖微结构颜色生成方法可以被广泛的应用于多个领域,如信息编码、高密度信息存储、防伪标识、偏光显微镜以及高光谱显微镜等。与此同时,我们还提出了一种手性双层人工微结构设计,在近红外波段1650 nm波长处实现了效率高于50%的圆偏振光场偏振选择透过<sup>[58]</sup>。所设计的手性双层人工微结构可以被用来实现对光场偏振态的选择。数值模拟结果显示在1640 nm到1652 nm波段范围内,所设计的手性双层人工微结构可以实现对光场左旋和右旋偏振态的选择性通过,且透过光场的椭圆度的幅值大于40°。该人工微结构设计在自旋光子学和手性传感研究等领域具有广泛的应用价值。

## 4 人工微结构光场联合调控

完全实现对光场在任意维度上的有效调控,是人工微结构发展的必然趋势,也是其广泛应用于集成信息光子学的基础。近10年来,人工微结构光场调控的相关研究主要围绕如何实现对光场单一维度的有效调控展开。随着人工微结构光场单一维度调控的相关研究趋于成熟,利用人工微结构实现对光场在多个维度上的联合调控,由于其本身所蕴含的丰富物理现象和广阔应用前景,开始越来越多地受到人们的关注。如何实现对光场各个维度的联合调控,并进一步实现集成光子学器件,是人工微结构研究与未来实用化的重要课题与关键难点。其中,利用人工微结构实现对光场在两个维度上的联合调控在现阶段由于具有良好的理论支持和大量的研究基础作为铺垫,逐渐成为了人工微结构光场调控研究领域新的研究热点。围绕人工微结构光场双维度联合调控研究,我们在光场相位和偏振态,以及振幅和相位联合调控方向开展了系列研究。

### 4.1 基于光场相位和偏振态联合调控的任意矢量光束生成

实现光场相位与偏振态的联合调控,在超分辨光学成像、光信息多路复用等诸多研究及应用领域具有重要的应用价值。传统光学中光场相位和偏振态的联合调控常需要通过多个光学元件的组合来实



现,且无法实现对光场相位和偏振态在亚波长尺度下的调控。我们提出了一种全新的由双层金属镂空微波导组成的少层人工微结构设计,在近红外波段亚波长尺度下同时实现了光场相位与偏振的任意控制<sup>[59]</sup>。如图13所示,在所设计的双层金属镂空微波导结构中通过控制金属镂空的几何形状和双层金属镂空空间的相对位置可以实现对出射光场相位的有效控制,通过控制金属镂空的长轴朝向可以实现对出射光场偏振态的连续控制。为了在亚波长尺度下实现对空间光场的相位及偏振分布的任意设计,我们提出了6个基本微结构单元,这6个基本微结构单元可以实现对出射光场相位0到 $2\pi$ 的调控,同时通过对这6个基本微结构单元的旋转可以控制出射光场的偏振态。在此基础上,我们通过6种微结构单元的合理空间排布,在实验上实现了径向矢量光束的生成。我们进一步通过对这6种基本微结构单元的合理空间排布,实现了具有不同拓扑荷数的涡旋矢量光束、标准径向和角向矢量光束、双模式矢量光束以及其他更加复杂的矢量光束<sup>[60]</sup>。所提出的6种基本微结构单元,为具有任意偏振分布和任意相位分布的空间光场的生成提供了一种非常有效的方式,在光波前操控、成像等领域具有广泛的应用前景。

#### 4.2 基于光场相位和振幅联合调控的艾利光束生成

艾利光束是一种新型的无衍射光束,具有无衍射、自弯曲和自愈的特性。艾利光束在光子弹、微粒

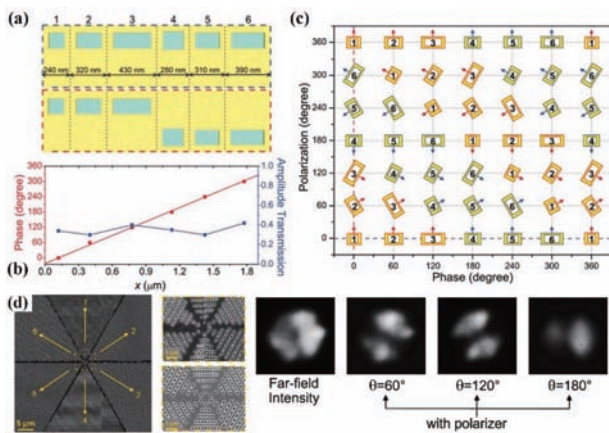


图13 (a) 双层金属镂空微波导组成的少层人工微结构的示意图,蓝色边框和红色边框内分别对应6种基本微结构单元的上层和下层结构示意图,(b) 光场经过6种基本微结构单元的振幅透过率和相位延迟,(c) 6种基本微结构单元在旋转角度不同时对应出射光场的相位和偏振态,(d) 基于6种基本微结构单元的有序排布生成径向矢量光束的样品图和实验测试结果<sup>[59]</sup>

操控、曲线等离子激元通道的构建等研究领域具有广泛的应用前景,相关研究近来受到人们的广泛关注。在传统光学中,艾利光束的生成通常需要引入透镜的傅里叶变换效应,因此至少需要一个焦点,这极大的影响了光学系统的紧凑性<sup>[61, 62]</sup>。人工微结构在亚波长尺度下对光场相位和振幅的联合控制为微尺度艾利光束的生成提供了一种全新方式。我们通过对亚波长金属天线微结构的结构参数和旋转角度的合理设计,实现了对出射光场相位和振幅的联合调控,进而实现了高质量艾里光束的生成,如图14所示<sup>[63]</sup>。我们对比了引入强度调制与无强度调制两种设计下艾里光束的质量,以及天线阵列个数对艾里光束弯曲度的影响。我们发现相比于仅通过对光场相位进行调控而生成的艾利光束,通过实现对光场相位和振幅的联合调控而生成的艾利光束更为理想。同时,我们进一步证明了所生成的艾里光束在遇到散射体时的自愈性。这一研究结果在微尺度特殊光场生成方向具有广泛应用前景。

#### 4.3 基于光场相位和振幅联合调控的偏振依赖异常折射和反射光场的同时产生

人们在利用人工微结构实现对光场相位调控的基础上,通过在微结构表面引入连续的相位梯度实现了光场的异常折射与反射,既对散射光场波前的任意控制<sup>[28]</sup>。然而已有的人工微结构设计大多只能实现对圆偏振光场高效率的异常反射或折射,而不能同时产生高效率的异常折射和反射光束。我们提出了一种各向异性少层人工微结构设计,实现了对光场振幅和相位的同时控制,进而在近红外波段实现了异常折射与异常反射光束的同时生成,如图15所示<sup>[64]</sup>。所设计的人工微结构可以在1900 nm到2050 nm波段范围内实现非对称的、高

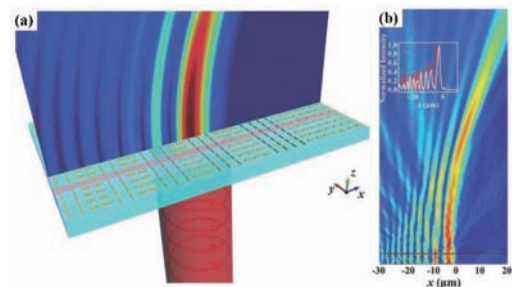


图14 (a) 亚波长金属天线微结构阵列实现艾利光束的示意图,(b) 基于光场振幅和相位联合调控生成的艾利光束的电场空间分布,插图为理论设计的理想艾利光束和所生成艾利光束在距离人工微结构表面5微米处空间电场幅值分布的归一化对比<sup>[63]</sup>

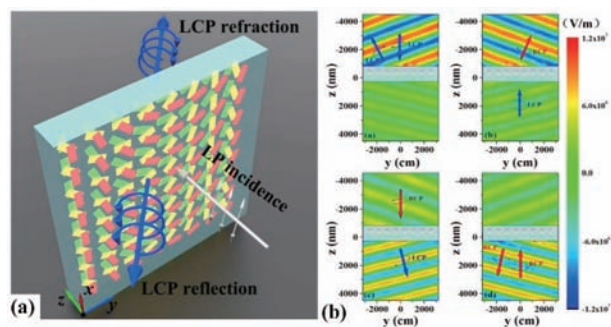


图 15 (a) 少层人工微结构实现异常反射与折射光束同时生成的示意图, (b) 左旋和右旋圆偏振光场从两个相反方向入射时产生的异常折射与反射光场<sup>[64]</sup>

效率的异常反射与异常折射光场的同时生成,同时异常光束的生成效率在 150 nm 宽的工作波段范围内高于 45%,且正常反射和折射光束的生成效率在该范围内不超过 20%。所设计的少层人工微结构可以将线偏振入射光场转换为两束具有相同圆偏振态但传播方向正好相反的异常折射和反射光束。同时,当线偏振光场沿着两个相反方向入射时,出射光场的圆偏振态正好相反。我们提出的这种利用少层人工微结构实现光场相位和振幅联合控制的方法在光束分离、偏振选择、光通信等领域具有广泛的应用前景,对于人工微结构光波前调控的相关应用具有重要意义。此外,我们还通过引入泵浦光场的方式,在利用人工微结构实现对光场相位调控的基础上,实现了对出射光场振幅的动态控制<sup>[65, 66]</sup>。

## 5 总结与展望

利用人工微结构实现对光场多维度精确调控及其相互作用研究是物理科学研究的前沿,也是未来多学科跨越式发展的重要基础。围绕人工微结构光场调控开展的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。我们围绕人工微结构光场偏振态、相位、振幅和双维度联合调控开展了系统研究,取得了系列创新研究成果:

(1) 提出了人工微结构光场偏振态操控的新方法、新思路,在微尺度下实现了对光场偏振态的多种有效转换;

(2) 揭示了增强人工微结构光场相位调制深度的新机理,提出了人工微结构光场相位调控的动量分析新方法,利用石墨烯人工微结构在深亚波长尺度下实现了对光场相位的有效控制;

(3) 研究了人工微结构光场振幅调控中的新机制、新现象,实现了多重法诺共振和偏振无关的等离子激元诱导透明现象,提出了一种实现光双向完美吸收的新理论,实现了对光场的偏振选择透射和反射;

(4) 实现了对光场相位和偏振态、振幅和相位的联合控制,进而实现了具有任意相位和偏振态分布的空间光场的生成、理想艾利光束的生成以及异常反射与折射光束的同时生成。

尽管近年来人们在人工微结构光场偏振、相位、振幅调控方面开展了系列研究,但是在光场多维度联合调控方向的研究还处于发展阶段。在后续工作中,我们将在人工微结构光场联合调控方向继续开展深入研究。一方面,我们计划基于非线性等离子效应在人工微结构光场调控中引入频率调控,从而为光场的多维度联合调控提供新的自由度。另一方面,我们将在实现光场多维度联合调控的基础上开展多功能集成化人工微结构光学器件的研究,并进一步设计和实现微区片上集成光学系统所需的各种微尺度光学元件。

在人工微结构光场调控未来的发展方向上,我们认为提高光场调控深度、扩展光场调控维度和实现多种光学功能的集成是人工微结构光场调控未来发展的 3 个主要方向:提高光场调控深度就是要增强人工微结构与光场相互作用的强度,从而提高光场调控的效率和工作带宽;扩展光场调控维度就是要在偏振、相位、振幅调控的基础上引入新的调控维度,例如频率、时域和空域等;实现多种光学功能的集成则是人工微结构光场调控研究走向微尺度光子学应用的必然需求,基于人工微结构光场多维度联合调控实现多种光学功能的微尺度集成对于微区集成光学系统的设计和研究具有重要意义。

针对以上 3 个研究方向,目前人工微结构光场调控相关研究呈现出三大主流趋势:引入新材料、发现新设计、提出新物理。在引入新材料方面,二氧化钛、非晶硅等电介质材料的引入极大地提高了人工微结构与光场相互作用的强度,而二氧化钒、石墨烯和钙钛矿等材料的引入则实现了对人工微结构与光场相互作用的动态调控。在发现新设计方面,少层人工微结构的提出为增强人工微结构与光场的相互作用提供了一种有效方式,将傅里叶分析方法和动量分析方法引入到人工微结构的设计中则有效地实现了对光场波前的任意控制。在提出新物理方面,



拓扑光子学与人工微结构的相互结合则为人工微结构光场调控提供了新的自由度。

可以预见,人工微结构光场调控相关研究的不断进步和发展将会为微纳光学与光子学研究领域带来全新的革命。

**致谢** 本文工作得到国家自然科学基金(项目编号:11304163, 61378006, 11574163, 11774186)的支持。

### 参 考 文 献

- [1] Teich, MC, Saleh BEA. *Fundamentals of photonics*, 2<sup>nd</sup>. Canada: Wiley Interscience, 2007, 197—242.
- [2] Chen S, Liu W, Li Z, et al. Polarization State Manipulation of Electromagnetic Waves with Metamaterials and Its Applications in Nanophotonics. In *Metamaterials-Devices and Applications*. United Kingdom: InTech, 2017: 217—242.
- [3] Yu P, Li J, Tang C, et al. Controllable optical activity with non-chiral plasmonic metasurfaces. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(7): e16096.
- [4] Sieber PE, Werner DH. Infrared broadband quarter-wave and half-wave plates synthesized from anisotropic Bézier metasurfaces. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32371—32383.
- [5] Pors A, Bozhevolnyi SI. Efficient and broadband quarter-wave plates by gap-plasmon resonators. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2942—2952.
- [6] Zhao Y, Alù A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 1086—1091.
- [7] Yu N, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328—6333.
- [8] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Realizing broadband and invertible linear-to-circular polarization converter with ultrathin single-layer metasurface. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18106.
- [9] Dai Y, Ren W, Cai H, et al. Realizing full visible spectrum metamaterial half-wave plates with patterned metal nanoarray/insulator/metal film structure. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7465—7472.
- [10] Jiang ZH, Lin L, Ma D, et al. Broadband and wide field-of-view plasmonic metasurface-enabled waveplates. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7511.
- [11] Nakata Y, Taira Y, Nakanishi T, et al. Freestanding transparent terahertz half-wave plate using subwavelength cut-wire pairs. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2107—2114.
- [12] Liu Z, Li Z, Liu Z, et al. Single-layer plasmonic metasurface half-wave plates with wavelength-independent polarization conversion angle. *ACS Photonics*, 2017, 4(8): 2061—2069.
- [13] Li T, Liu H, Wang SM, et al. Manipulating optical rotation in extraordinary transmission by hybrid plasmonic excitations. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(2): 021110.
- [14] Li T, Wang SM, Cao JX, et al. Cavity-involved plasmonic metamaterial for optical polarization conversion. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(26): 261113.
- [15] Grady NK, Heyes JE, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction. *Science*, 2013, 340(6138): 1304—1307.
- [16] Liu W, Chen S, Li Z, et al. Realization of broadband cross-polarization conversion in transmission mode in the terahertz region using a single-layer metasurface. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3185—3188.
- [17] Li Z, Chen S, Liu W, et al. High performance broadband asymmetric polarization conversion due to polarization-dependent reflection. *Plasmonics*, 2015, 10(6): 1703—1711.
- [18] Li Z, Chen S, Tang C, et al. Broadband diodelike asymmetric transmission of linearly polarized light in ultrathin hybrid metamaterial. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(20): 201103.
- [19] Liu J, Li Z, Liu W, et al. High-Efficiency Mutual Dual-Band Asymmetric Transmission of Circularly Polarized Waves with Few-Layer Anisotropic Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12): 2028—2034.
- [20] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Tunable dual-band asymmetric transmission for circularly polarized waves with graphene planar chiral metasurfaces. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3142—3145.
- [21] Li J, Yu P, Cheng H, et al. Optical polarization encoding using graphene-loaded plasmonic metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(1): 91—98.
- [22] Cheng H, Chen S, Yu P, et al. Dynamically tunable broadband mid-infrared cross polarization converter based on graphene metamaterial. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(22): 223102.
- [23] Cheng H, Chen S, Yu P, et al. Mid-infrared tunable optical polarization converter composed of asymmetric graphene nanocrosses. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1567—1569.
- [24] Chen S, Li Z, Zhang Y, et al. Phase Manipulation of Electromagnetic Waves with Metasurfaces and Its Applications in Nanophotonics. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(13): 1800104.
- [25] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750—5755.

- [26] Shaltout A, Liu J, Shalaev VM, et al. Optically active metasurface with non-chiral plasmonic nanoantennas. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4426—4431.
- [27] Wen D, Yue F, Kumar S, et al. Metasurface for characterization of the polarization state of light. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10272—10281.
- [28] Liu Z, Li Z, Liu Z, et al. High-performance broadband circularly polarized beam deflector by mirror effect of multi-nanorod metasurfaces. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(34): 5428—5434.
- [29] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Manipulation of the Photonic Spin Hall Effect with High Efficiency in Gold-Nanorod-Based Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(20): 1700413.
- [30] Khorasaninejad M, Chen WT, Devlin RC, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and sub-wavelength resolution imaging. *Science*, 2016, 352(6290): 1190—1194.
- [31] Arbabi A, Arbabi E, Kamali SM, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations. *Nature Communications*, 2016, 7: 13682.
- [32] Liu W, Li Z, Cheng H, et al. Metasurface Enabled Wide-Angle Fourier Lens. *Advanced Materials*, 2018, 30(23): 1706368.
- [33] Ni X, Kildishev AV, Shalaev VM. Metasurface holograms for visible light. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [34] Li Y, Li X, Chen L, et al. Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600502.
- [35] Huang L, Mühlenbernd H, Li X, et al. Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces. *Advanced Materials*, 2015, 27(41): 6444—6449.
- [36] Zhang Y, Yang X, Gao J. Twisting phase and intensity of light with plasmonic metasurfaces. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4884.
- [37] Liu W, Li Z, Cheng H, et al. Momentum Analysis for Metasurfaces. *Physical Review Applied*, 2017, 8(1): 014012.
- [38] Cheng H, Chen S, Yu P, et al. Dynamically tunable broadband infrared anomalous refraction based on graphene metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1744—1749.
- [39] Wang C, Liu W, Li Z, et al. Dynamically Tunable Deep Subwavelength High-Order Anomalous Reflection Using Graphene Metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(3): 1701047.
- [40] Li Z, Liu W, Li Z, et al. Fano-resonance-based mode-matching hybrid metasurface for enhanced second-harmonic generation. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3117—3120.
- [41] RoyChoudhury S, Rawat V, Jalal AH, et al. Recent advances in metamaterial split-ring-resonator circuits as biosensors and therapeutic agents. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 86: 595—608.
- [42] Limonov MF, Rybin MV, Poddubny AN, et al. Fano resonances in photonics. *Nature Photonics*, 2017, 11(9): 543—554.
- [43] Zhang Y, Liu W, Li Z, et al. High-quality-factor multiple Fano resonances for refractive index sensing. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1842—1845.
- [44] Zhang S, Genov D A, Wang Y, et al. Plasmon-induced transparency in metamaterials. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 047401.
- [45] Yang Y, Kravchenko II, Briggs DP, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency. *Nature Communications*, 2014, 5: 5753.
- [46] Duan X, Chen S, Yang H, et al. Polarization-insensitive and wide-angle plasmonically induced transparency by planar metamaterials. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 143105.
- [47] Duan X, Chen S, Cheng H, et al. Dynamically tunable plasmonically induced transparency by planar hybrid metamaterial. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 483—485.
- [48] Cheng H, Chen S, Yu P, et al. Dynamically tunable plasmonically induced transparency in periodically patterned graphene nanostrips. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(20): 203112.
- [49] Chen S, Cheng H, Yang H, et al. Polarization insensitive and omnidirectional broadband near perfect planar metamaterial absorber in the near infrared regime. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 253104.
- [50] Cheng H, Chen S, Yang H, et al. A polarization insensitive and wide-angle dual-band nearly perfect absorber in the infrared regime. *Journal of Optics*, 2012, 14(8): 085102—85106.
- [51] Duan X, Chen S, Liu W, et al. Polarization-insensitive and wide-angle broadband nearly perfect absorber by tunable planar metamaterials in the visible regime. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125107—125113.
- [52] Ra'Di Y, Simovski CR, Tretyakov SA. Thin perfect absorbers for electromagnetic waves: theory, design, and realizations. *Physical Review Applied*, 2015, 3(3): 037001.



- [53] Li J, Yu P, Tang C, et al. Bidirectional perfect absorber using free substrate plasmonic metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(12): 1700152.
- [54] Kristensen A, Yang JKW, Bozhevolnyi SI, et al. Mortensen N A Plasmonic colour generation. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(1): 16088.
- [55] Heydari E, Sperling JR, Neale SL, et al. Plasmonic Color Filters as Dual-State Nanopixels for High-Density Microimage Encoding. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(35): 1701866.
- [56] Wen D, Yue F, Kumar S, et al. Metasurface for characterization of the polarization state of light. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10272—10281.
- [57] Yang B, Liu W, Li Z, et al. Polarization-Sensitive Structural Colors with Hue-and-Saturation Tuning Based on All-Dielectric Nanopixels. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701009.
- [58] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Spin-Selective Transmission and Devisable Chirality in Two-Layer Metasurfaces. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8204.
- [59] Li J, Chen S, Yang H, et al. Simultaneous control of light polarization and phase distributions using plasmonic metasurfaces. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(5): 704—710.
- [60] Yu P, Chen S, Li J, et al. Generation of vector beams with arbitrary spatial variation of phase and linear polarization using plasmonic metasurfaces. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3229—3232.
- [61] Siviloglou GA, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [62] Hu Y, Zhang P, Lou C, et al. Optimal control of the ballistic motion of Airy beams. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2260—2262.
- [63] Li Z, Cheng H, Liu Z, et al. Plasmonic airy beam generation by both phase and amplitude modulation with metasurfaces. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(8): 1230—1235.
- [64] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Simultaneous generation of high-efficiency broadband asymmetric anomalous refraction and reflection waves with few-layer anisotropic metasurface. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35485.
- [65] Liu Z, Chen S, Cheng H, et al. Interferometric control of signal light intensity by anomalous refraction with plasmonic metasurface. *Plasmonics*, 2016, 11(2): 353—358.
- [66] Liu Z, Chen S, Li J, et al. Fully interferometric controllable anomalous refraction efficiency using cross modulation with plasmonic metasurfaces. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6763—6766.

## Research progresses of optical field manipulation with artificial micro/nano-structures

Li Zhancheng<sup>1\*</sup>   Liu Zhaoqing<sup>2\*</sup>   Cheng Hua<sup>1</sup>   Tian Jianguo<sup>1</sup>   Chen Shuqi<sup>1,3\*\*</sup>

(1. School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071;

2. Center for Science Communication, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;

3. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

**Abstract** Artificial micro/nano-structure is one of the most important systems for the enhancement of the interaction of light and matter, which provides new opportunities and broad prospects for the development of photophysics and photonics. The studies about the rigorously multi-dimensional manipulation of optical fields and their interactions are the frontiers of physical science research and the important basis for the leapfrog development of multi-disciplinary by using artificial micro/nano-structure. In this research progress, we systematically introduced our recent progresses of polarization, phase, amplitude and multi-dimensional manipulations of optical fields with artificial micro/nano-structures, which reveal the great research potential and wide application prospects of artificial micro/nano-structures in the field of optical field manipulation.

**Key words** artificial micro/nano-structures; optical field manipulation; photonic integration; novel method for optical field manipulation