

# 人工光学微结构研究进展

李占成 程化 陈树琪<sup>†</sup>  
(南开大学物理科学学院 天津 300071)

2019-03-02收到

<sup>†</sup> email: schen@nankai.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190602

## Artificial optical nanostructures

LI Zhan-Cheng CHENG Hua CHEN Shu-Qi<sup>†</sup>  
(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**摘要** 受益于新世纪以来微纳加工技术的快速发展,人工光学微结构的相关研究在近二十年里取得了长足进步。人工光学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,为光学器件的小型化、集成化和轻质化提供了新的途径。文章将对人工光学微结构这些年的发展进行概述,并展示该研究领域的最新研究进展。

**关键词** 超材料,超表面,光场调控,集成光子学器件

**Abstract** Benefiting from the rapid development of nano-fabrication technology in the new century, great progress has been made in the research of artificial optical nanostructures. These nanostructures, assembled with plentiful physical mechanisms and capabilities for optical wave manipulation, provide a new means for the effective manipulation of light-matter interaction, and a new approach for the integration, miniaturization and weight reduction of optical devices. Here we summarize the progress in research on artificial optical nanostructures over the last twenty years.

**Keywords** metamaterials, metasurfaces, optical wave manipulation, integrated photonic devices

## 1 引言

光学现象的产生和光学功能的实现都源于光与物质的相互作用。实现对光与物质相互作用的有效控制,进而获得所需的各类光学功能器件是光学研究领域的重要研究内容。从400多年前望远镜的发明开始,无数设计精妙的光学器件不断地提出用以实现特定的光学功能或产生独特的光学现象。随着光与物质相互作用相关理论研究的不断深入,研究者们逐步发现了一系列自然界中并不存在的新奇光学现象。这些现象的产生并不违背光学的基本定律,但是由于自然界中存在

的材料并不具备相应的光学性质,因此这些新奇的光学现象在自然界中并不能被观察到。新世纪以来,获取具有全新光学性质的新材料成为了近代光学研究的重要方向。一方面,人们通过化学合成的方式获取具有全新光学性质的新材料,如聚四氟乙烯。另一方面,人们通过对人工微结构介电常数和磁导率的人为设计来操控其光学性质,获得所需的光学响应。相比于化学合成的方法,人工光学微结构在设计上具有更高的自由度和操控性,近年来成为了光学领域的研究热点。

## 2 超材料

人工光学微结构的产生与发展最初着眼于获得自然界中现有材料并不具备的光学性质。19世纪60年代,苏联科学家 V. G. Veselago 对介电常数和磁导率同时为负值( $\epsilon < 0$  且  $\mu < 0$ )的材料的光学响应进行了理论研究,并证明在该类材料中传播的光波的电场、磁场和波矢量遵守左手定则,波矢量和坡印亭矢量的方向相反<sup>[1]</sup>。这种材料被称为左手材料。相比于传统光学材料( $\epsilon > 0$  且  $\mu > 0$ ),左手材料能够产生负折射效应、逆多普勒效应、完美透镜等新奇的光学效应。然而由于自然界中并不存在左手材料,因此相关的实验性研究一直未能得到开展。直到19世纪末期,人工光学微结构的提出和相关理论研究才为在实验上同时实现负的介电常数和磁导率提供了新的可能性。英国帝国理工大学 J. B. Pendry 教授在1996年和1999年分别利用周期性金属棒阵列和开口谐振环阵列实

现了负的介电常数和磁导率<sup>[2, 3]</sup>。2000年美国加利福尼亚大学 D. R. Smith 教授通过将金属棒和开口谐振环相结合,利用人工微结构实现了介电常数和磁导率同时为负<sup>[4]</sup>;之后在2001年,Smith教授利用相似设计在实验上微波波段成功观察到了左手材料中的负折射效应(图1)<sup>[5]</sup>。该材料为人工光学微结构的研究开启了新的大门,2003年被 *Science* 杂志评为当年十大科技突破之一。由于左手材料并不是人工光学微结构的唯一研究内容,因此人们逐渐将具有新奇光学特性的三维人工光学微结构称为超材料(Metamaterials),这一命名最早由美国德克萨斯大学物理学教授 R. M. Walser 在1999年提出<sup>[6]</sup>。超材料被定义为具有亚波长尺度结构单元的人工结构材料,其光学性质主要决定于基本结构单元的设计而非组成其的材料本身。超材料主要有以下三个特点:(1)人工结构的复合材料;(2)基本结构单元小于波长;(3)光学性质主要由基本结构单元决定。从2000年到2010年,利用超材料研究新的光学现象,设计新的光学器件,实现独特的光学功能成为光学研究领域的热点方向,包括负折射现象、超透镜、光学隐身斗篷、人造手性介质、人造磁性介质、光学黑洞以及超分辨成像等在内的诸多新的光学现象、应用被广泛研究<sup>[7, 8]</sup>。图2展示了一种基于超材料设计的微波波段电磁波隐身斗篷,这是超材料最为人们所熟知的应用领域之一<sup>[9]</sup>。2010年 *Science* 杂志审视了进入新千年以来所取得的重要科学进步,评选出了10项重要科学成就(Insights of the Decade),超材料位列其中。*Science* 杂志对超材料给出的评语是光学中不寻常的新把戏(Strange New Tricks With Light),足可看出超材料对现代光学研究产生了重要影响,为现代光学研究的发展提供了新的方向。同时,利用超材料实现光学隐身在军事和航天等领域的巨大应用价值也受到了世界各国的广泛关注。美国国防部将超材料评为2013—2017年科技发展“五年计划”中重点关注的六大颠覆性基础研究领域之一。2017年,《解放军报》以“超材料:国防装备‘隐身衣’”为题报道了我国在超材料及其相关器件关

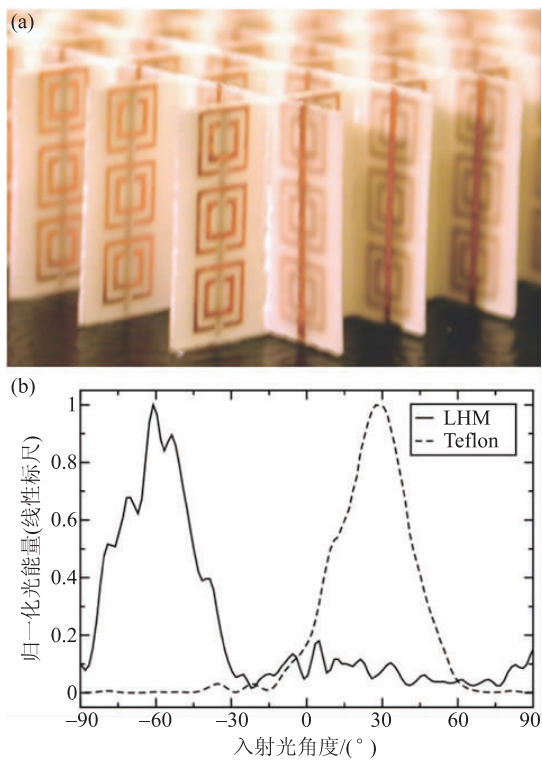


图1 人工光学微结构实现左手材料<sup>[5]</sup> (a)介电常数和磁导率同时为负值的人工光学微结构样品;(b)左手材料中的负折射现象(LHM:左手材料;Teflon:聚四氟乙烯材料)

键技术研发取得的新进展。2018年央视《大国重器》节目首次披露了中国首条超材料生产线，标志着我国成为了世界上首个实现超材料量产的国家。

### 3 超表面

在过去的十多年中，超材料在微波波段的研究较为广泛，包括负折射、光学隐身等现象都是首先在微波波段被实现。而在光波段，由于超材料结构精细，致使其加工与制备不仅复杂而且需要很高的成本，这非常不利于超材料的实际应用。此外，金属材料在超材料设计中被广泛使用，金属本身在光波段高损耗和高色散的特点也限制了所设计超材料的工作效率和带宽。在光波段，相比于超材料而言，平面人工光学微结构由于其相对易于加工制备，且在与光波相互作用过程中损耗较低，因此受到了广泛关注和研究。由于平面人工光学微结构的厚度远远小于其工作波长，因此可以被看作是超材料的二维对应，故而人们将其命名为超表面(Metasurfaces)。2011年，哈佛大学F. Capasso教授及其研究团队利用具有不同结构参数的V字纳米金属天线在亚波长尺度下实现了对线偏振光波相位从0到 $2\pi$ 的调控，该工作被认为是超表面研究领域的开山之作<sup>[10]</sup>。在该工作中，他们还提出了广义斯涅耳定律，通过引入具有不同结构参数的V字纳米金属天线构成相位梯度表面，成功实现了对透射光波波前的操控，如图3所示。这一结果第一次让人们意识到超表面可以在亚波长尺度下实现对光波相位的有效控制，从而控制光波的波前。2012年，英国伯明翰大学X. Chen等人进一步将几何相位原理应用于超表面的设计中，仅通过对超表面基本结构单元的简单旋转就实现了对圆偏振光场相位在亚波长尺度下的有效控制<sup>[11]</sup>。超表面可以对光波相位在亚波长尺度下进行有效控制这一特点，使得其在之后的研究中被广泛用于包括光聚焦、全息成像、矢量光束生成、光子自选轨道耦合等在内的多个领域。此外，随着超表面领域相关研究近年来的不断开展，人们已经可以利用

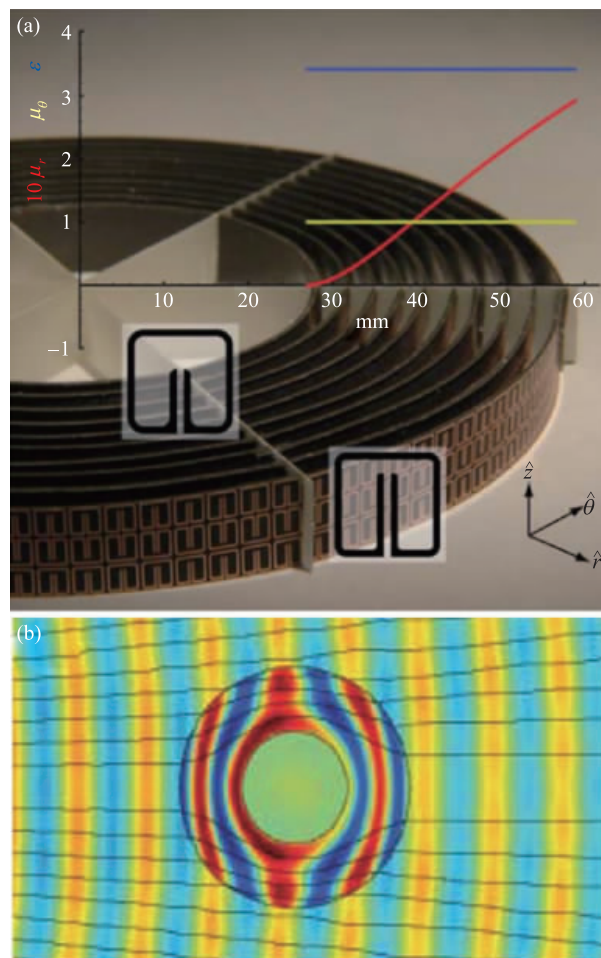


图2 基于超材料的微波波段电磁波隐身斗篷<sup>[9]</sup> (a)电磁波隐身斗篷样品；(b)电磁波隐身斗篷实现隐身功能的模拟示意图

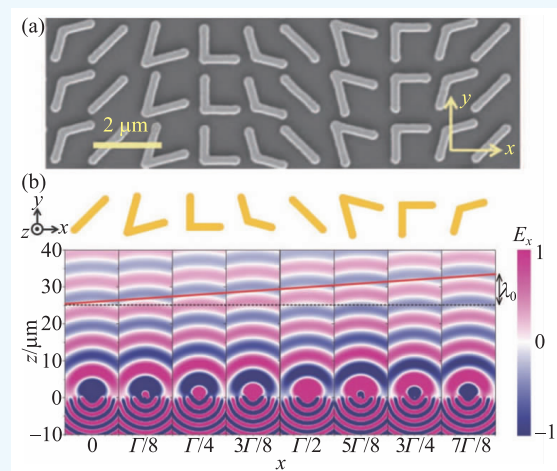


图3 由V字纳米金属天线阵列组成的超表面<sup>[10]</sup> (a)超表面样品在扫描电子显微镜下的俯视图；(b)利用超表面在亚波长尺度下控制光波相位实现光波波前控制的示意图

超表面分别实现对光波振幅、相位、偏振和频率的有效控制，相关研究为微纳集成光学器件的实

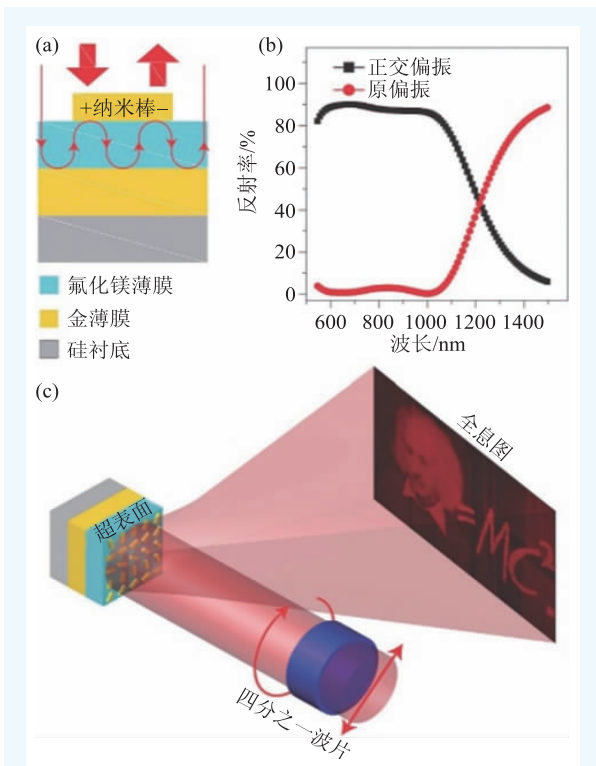


图4 一种“金属薄膜—电介质—金属微结构”超表面设计<sup>[17]</sup> (a)该超表面结构示意图；(b)该超表面中光波偏振态转换的模拟结果；(c)基于超表面对光波高效率的相位控制，实现效率高于80%的全息成像

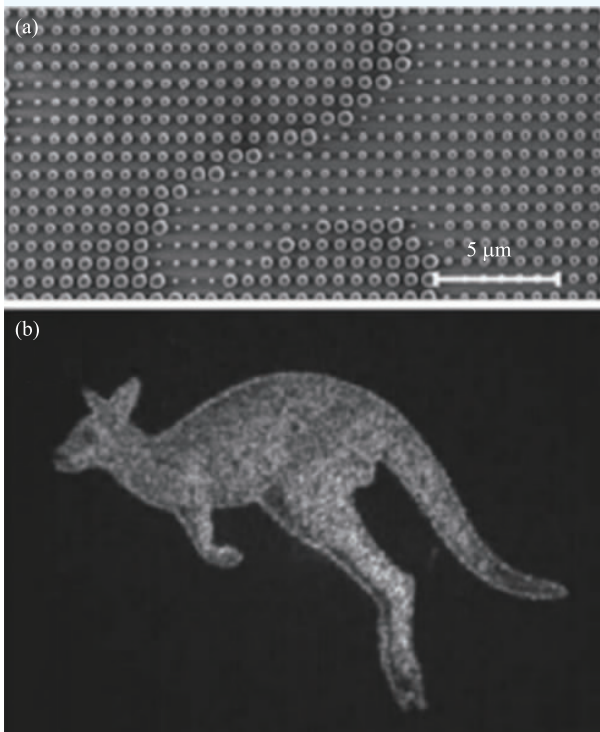


图5 电介质超表面实现全息成像<sup>[19]</sup> (a)电介质超表面样品在扫描电子显微镜下的俯视图；(b)电介质超表面实现的全息图像

现提供了一种有效方式<sup>[12, 13]</sup>。值得一提的是，由于超表面的厚度远远小于其工作波长，因此其等效光学参数(介电常数和磁导率)在设计过程中并不会被太多地关注。取而代之的是，人们通过研究和调控超表面界面处光波与物质的相互作用来操控其光学响应。例如，我们知道在传统的非线性晶体当中，获得高效率的非线性光学响应需要非线性过程满足相位匹配条件。然而由于超表面本身的厚度在亚波长尺度范围内，因此其非线性光学响应不再受限于相位匹配条件，超表面产生的近场强局域电场增强现象和超表面中的多共振模式光响应会显著增强其与光波的相互作用从而导致超表面产生很强的非线性光学响应<sup>[14, 15]</sup>。

作为一种平面人工光学微结构，基于金属材料的超表面相比于超材料虽然有效地降低了其与光波相互作用过程中产生的损耗，但与此同时其与光波的相互作用强度也由于相互作用距离的缩短而随之降低。这使得超表面虽然能够实现对光波振幅、相位、偏振的有效控制，但其调控效率非常有限。例如，在光波相位调控方面，基于金属材料的超表面的调控效率的理论上限为25%<sup>[16]</sup>。“金属薄膜—电介质—金属微结构”设计方法的提出为反射模式下利用超表面实现对光波振幅、相位、偏振的高效率调控提供了一种有效途径。例如，英国伯明翰大学S. Zhang教授及其研究团队在2015年利用这种设计方式在反射模式下实现了对光场圆偏振态的高效率转换<sup>[17]</sup>。他们进一步通过引入几何相位的方式实现了对偏振转换光波相位的有效控制，进而在超表面中实现了效率高于80%的全息成像，如图4所示。在该类设计中，金属薄膜和微结构间光波的多次反射和干涉效应极大地增强了微结构与光波的相互作用强度，从而有效地提高了超表面对光波的调控效率。电介质材料在超表面设计中的广泛应用则从根本上解决了超表面光波调控效率较低这一问题<sup>[18]</sup>。在光波段，电介质材料(例如硅、氧化钛等)与光波能够产生较强的相互作用且在相互作用的过程中几乎没有损耗产生，因此基于电介质材料的超表面在光波调控方面具有极高的效率。例如，澳大利亚国

立大学L. Wang等人利用基于硅材料的超表面实现了对光波相位的高效率调控,从而在透射模式下实现了效率高于90%的全息成像,如图5所示<sup>[19]</sup>。

对光波调控效率的显著提高使得超表面在光波调控研究领域逐渐凸显出其重要地位。研究人员发现超表面不仅能够对光波的振幅、相位、偏振和频率单独地进行控制,还能够进一步实现对这些参量的联合调控。目前,基于超表面实现对光波的两个参量的联合调控是超表面光波调控研究中的热门方向,相关研究具有广泛的应用前景,如图6所示<sup>[20]</sup>。可以看出,进一步实现对光波的任意多个参量的联合控制是超表面光波调控研究的未来发展趋势。2017年国家自然科学基金委员会发布新型光场调控物理及应用重大研究计划,将超材料与超表面等人工纳微结构调控光场的产生、传输、操控与表征的相关研究列为新型光场多维度精确构建、调控及表征方向的三个主要研究内容之一,突显了我国对相关领域关键技术原理的重大需求。

#### 4 少层超表面

研究人员在超表面中采用电介质材料来增强超表面光波调控效率的同时,提出了超表面少层设计用以在透射模式下增强基于金属材料的超表面对光波的调控效率。2013年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室H. T. Chen教授及其研究团队通过在超表面的前向和后向引入两个正交光栅的方式在透射模式下分别实现了对光波偏振态和相位的高效率调控,如图7所示<sup>[21]</sup>。该工作被认为是基于光波多次反射和干涉原理在透射模式下实现超表面对光波高效率调控的代表性工作。与“金属薄膜—电介质—金属微结构”设计方法的原理类似,光栅结构和微结构间光波的多次反射和干涉效应极大地增强了微结构与光波的相互作用强度,从而有效地提高了超表面对光波的调控效率。超表面的少层设计模式不仅能够利用光波在层间的多次反射和干涉效应来有效增强对光波的调控效率,少层设计中存在的层间共振耦合模式

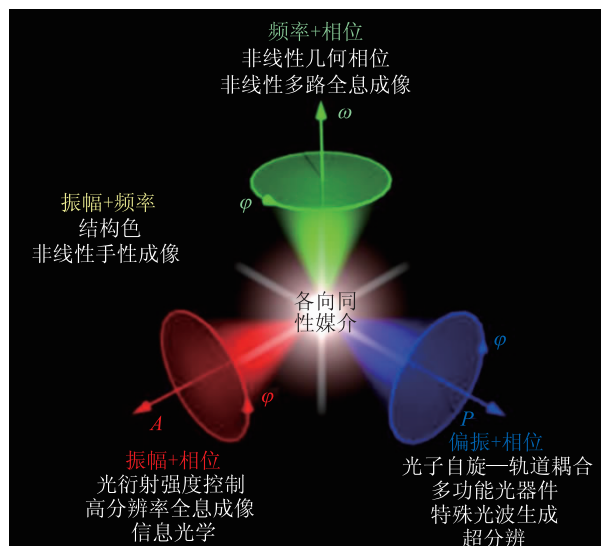


图6 超表面光波双参量调控及其应用方向<sup>[20]</sup>

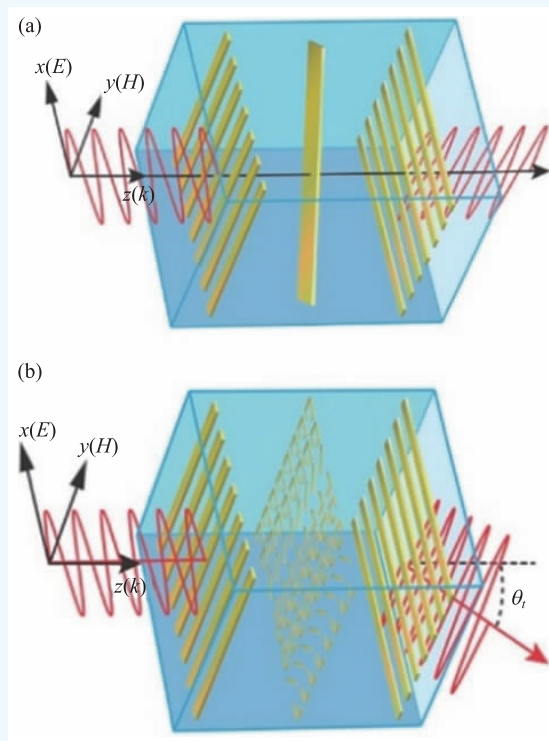


图7 一种典型的超表面少层设计<sup>[21]</sup> (a)超表面少层设计在透射模式下实现高效率的光偏振态垂直转换的示意图;(b)超表面少层设计在透射模式下实现亚波长尺度高效率光相位调控,进而实现光波前操控的示意图

和层间波导效应等其他光与微结构相互作用机制进一步为光波的多参量调控提供了新的设计自由度,进而实现了许多超表面中无法实现的新光学现象。例如,我们通过利用双层矩形镂空结构间

的层间光波导效应实现了对光波相位在亚波长尺度下的高效率控制,同时通过控制矩形镂空的空间朝向,我们进一步实现了对透射光波偏振态的

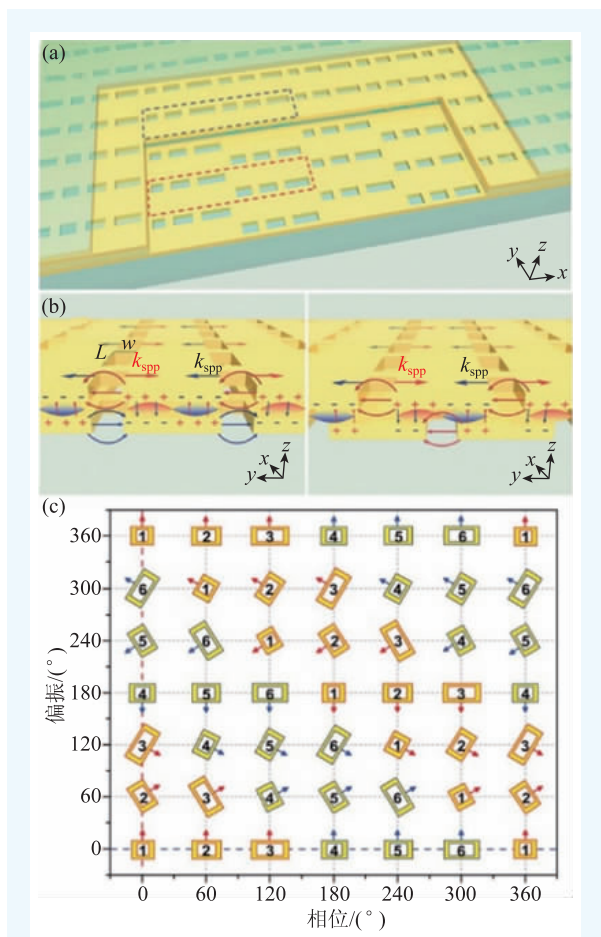


图8 由双层矩形镂空结构构成的超表面少层设计<sup>[22]</sup> (a)双层矩形镂空微结构示意图;(b)双层矩形镂空结构中的层间光波导效应;(c)六个基本双层矩形镂空微结构单元对光波相位和偏振态的联合调控

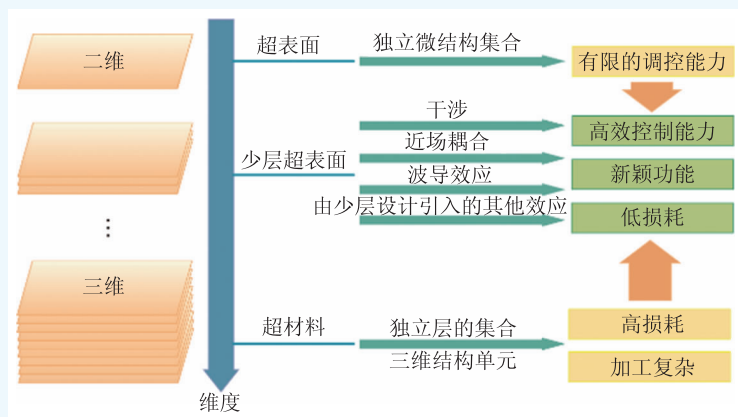


图9 超材料,超表面和少层超表面间的比较<sup>[26]</sup>

连续控制,从而实现对光波相位和偏振态的联合调控,如图8所示<sup>[22]</sup>。此外,我们利用超表面少层设计,还先后实现了线偏振光场非对称传输,光场自旋选择透过和在透射和反射模式下实现对光场相位的同时高效率控制等其他新奇的光学现象和光学功能<sup>[23-25]</sup>。

2015年,我们对超表面少层设计的相关工作进行了归纳总结,以研究快讯的形式阐述了超表面少层设计丰富的物理内涵和其在光波调控方面广阔的应用前景,在国际上第一次提出了少层超表面(Few-layer Metasurfaces)这一概念<sup>[26]</sup>。与超表面和超材料不同,少层超表面既规避了体结构与光波相互作用中高损耗和结构本身设计复杂的缺点,同时也解决了平面结构与光场相互作用强度有限的问题,是介于超材料(三维)和超表面(二维)间的全新人工光学微结构设计。基于少层间光与微结构相互作用产生的丰富物理机制,少层超表面在光波调控方面展现出了高操控性、低损耗和新功能性等多个优点,为人工微结构在光波调控领域的研究提供了新的发展方向,如图9所示。除了丰富的层间光与微结构相互作用机制,散射矩阵的人为任意设计这一特点也为少层超表面在光波多参量调控中的广泛应用提供了新的自由度。在超表面中,光波多参量调控的相关研究均着眼于反射或透射模式,而无法在反射或者透射模式下同时对光波的高效率调控。这是由于超表面作为二维平面结构只能存在几种结构空间

对称设计,因此其散射矩阵的矩阵元无法被独立控制<sup>[25, 27]</sup>。而少层超表面的结构空间对称性可以被任意设计,因此其散射矩阵的各个矩阵元可以被相对独立地进行设计,从而少层超表面可以在透射和反射模式下同时对光波进行高效率调控。例如,宁波大学董建峰教授及其合作伙伴基于对少层超表面散射矩阵的有效设计实现了3种光学功能的集成,不同偏振态的光波从两个相反方向入射时能够分别在反射和透射模式下实现不同的光学功

能,如图10所示<sup>[28]</sup>。少层超表面散射矩阵的人为任意设计使得少层超表面在集成多功能微纳光学器件的研发中具有广阔的应用前景。可以预见,少层超表面的相关研究将成为人工光学微结构的未来发展方向之一。

## 5 研究前沿与展望

随着人工光学微结构研究领域的快速发展,相关研究已经逐渐从理论型研究和基础型研究向应用型研究发展。我们总结了人工光学微结构现阶段六个研究趋势,如图11所示。

**新材料:**如上所述,把硅材料引入到超表面设计中可以有效地提高超表面对光波的调控效率。因此基于具有不同光学响应的材料进行人工光学微结构设计从而有效提高微结构的光波调控能力是目前人工光学微结构发展的主要趋势之一。在该方向上主要有两个研究重点:提高对光波的调控能力和实现对光波的动态控制。在提高对光波的调控能力方面,人们主要通过采用新的电介质材料来提高人工光学微结构的工作带宽和工作效率,优化微结构的光学响应,进而获得具有特定光学响应的超表面设计。例如,南京大学王漱明教授及其合作者利用基于氮化镓材料的超表面设计实现了工作效率高于40%的宽带消色差透镜<sup>[29]</sup>。而在实现对光波的动态控制方面,研究者则在超表面微结构设计中引入相变材料、钙钛矿材料和石墨烯材料的基础上,通过温控,光控和电控的方式实现对光波的动态调控<sup>[20]</sup>。例如,我们通过将石墨烯材料与金属微结构相结合,通过电控的方式在反射模式下实现了对出射光波偏振态的动态控制。该项设计可以被用于光学偏分复用技术中,如图12所示<sup>[30]</sup>。

**新设计:**早期的人工光学微结构的基本单元通常只包含一种结构设计。2016年,以色列理工学院E. Hasman教授及其研究团队展示了区域化、间层设计和多路复用3种人工光学微结构新设计模式,如图13所示<sup>[31]</sup>。这3种设计模式分别对应:不同区域微结构实现不同光学响应,不同

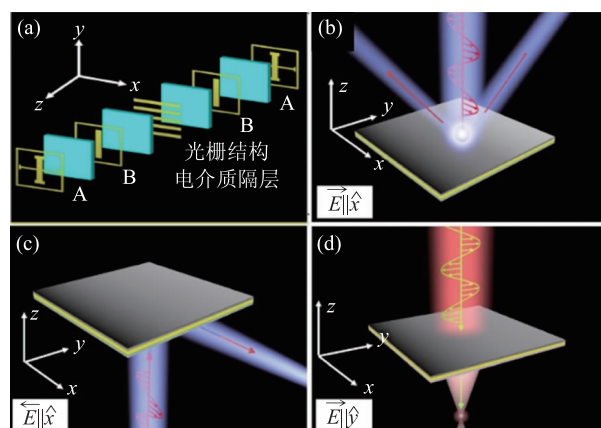


图10 基于少层超表面设计实现3种不同光学功能的集成<sup>[28]</sup>  
(a)少层超表面结构示意图;(b—d)不同入射方向和偏振态下少层超表面所对应的光学功能的示意图



图11 人工微结构的六个研究趋势

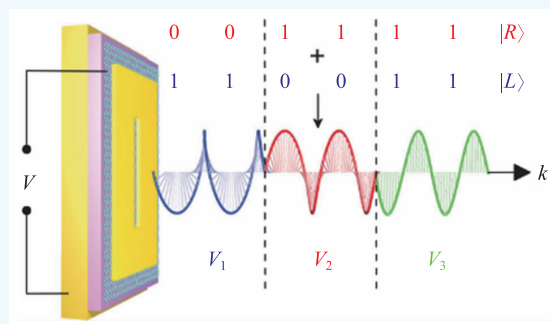
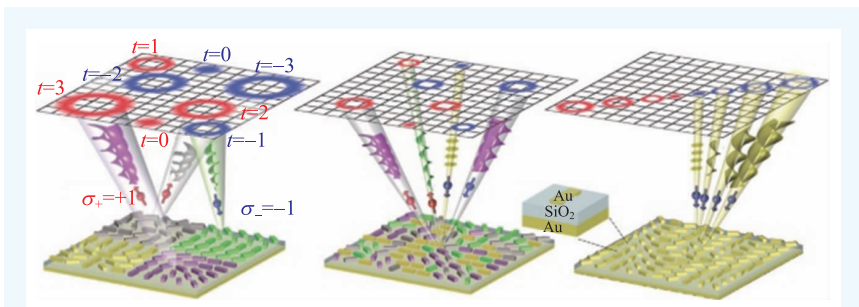
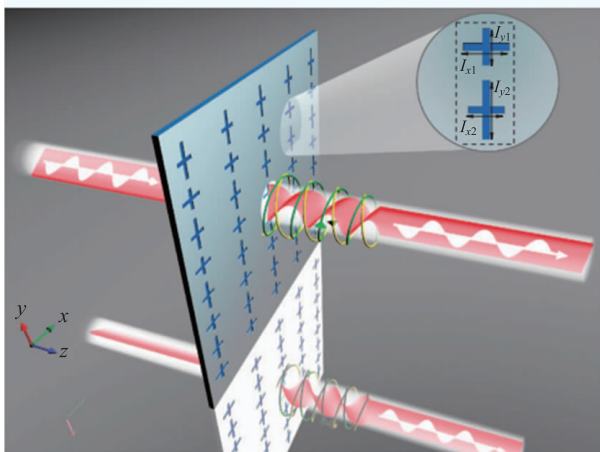
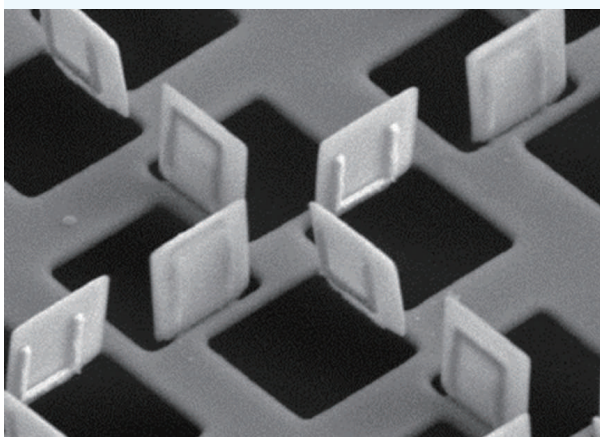


图12 通过石墨烯和金属微结构相结合实现光学偏分复用<sup>[30]</sup>

微结构单元对应不同光学响应和同一微结构单元包含多个光学响应信息三种设计原理。该工作为多种光学功能在人工光学微结构中的集成提供了

图13 多功能人工光学微结构的三种设计方式<sup>[31]</sup>图14 非手性超表面中旋光效应的原理示意图<sup>[31]</sup>图15 一种折叠超表面设计<sup>[36]</sup>

有效途径,极大地促进了人工光学微结构在集成多功能光学器件设计领域的发展。除了上述在平面上的新设计方法,在光传播方向上将具有分立光学功能的超表面结构进行组合,则为特定光学功能的实现提供了新的设计思路。例如,加州理工学院A. Faraon教授及其研究团队则通过将两层具有特定功能的电介质超表面相结合,实现了对入射光波的定向反射<sup>[32]</sup>。

**新原理:**在人工光学微结构设计中引入新的原理对于新光学现象的实现具有重要意义。例如,我们通过将两种十字形人工微结构相结合,在非手性人工微结构中实现了巨旋光效应。实现该现象的基本原理是:两种十字形人工微结构在透射模式下将入射线偏振光

波在近场分别转化为左旋和右旋偏振光波,通过调整两种微结构的结构参数可以调控所产生的左旋和右旋偏振光间的相位差,从而让上述两种光波在远场合成偏振方向与入射光波不同的全新线偏振光波,如图14所示<sup>[33]</sup>。又如,哈佛大学F. Capasso教授及其研究团队通过将几何相位原理和谐振相位原理相结合,实现了对任意两个正交偏振态光波相位的完全独立调控<sup>[34]</sup>。再如,将拓扑光子学的概念与原理引入人工光学微结构的设计中,为人工微结构光学器件的研究提供了新的发展方向<sup>[35]</sup>。

**新技术:**随着微纳加工技术的进一步发展,人工微结构的设计精度和设计自由度将会不断的提高,随之而来将会产生一系列新的人工光学微结构。例如,中国科学院物理研究所微加工实验室顾长志研究员及其研究团队设计制备的折叠超表面结构(图15),能够实现包括环形偶极共振、新型法诺共振等在内的多种全新光学现象<sup>[36]</sup>。近来,人工智能技术的普及为人工光学微结构的逆向设计和自动化设计提供了有效方式。目前,由于人工微结构的设计自由度较高且其与光波相互作用过程中存在丰富的物理机制,这使得人工光学微结构的设计门槛较高,不利于其在其他学科领域的广泛应用。美国佐治亚理工学院W. Cai教授及其研究团队在近日工作中证明:基于深度学习算法实现人工微结构的逆向设计,进而获得所需的光学功能器件将有望解决这一问题<sup>[37]</sup>。

**新自由度:**人工光学微结构对光波的调控研究目前主要集中在振幅、相位、偏振和频率这几个自由度上。随着相关研究的进一步发展,包括光波的相干性和瞬态特性等新的自由度必将被引



入到人工光学微结构光波调控研究当中。另一方面，目前基于人工光学微结构的多功能集成光学器件的设计多基于偏振选择原理，即在不同的偏振态下实现不同的光学功能，或基于光波入射方向不同而实现不同的光学功能。在人工光学微结构多功能集成设计中引入新的功能选择自由度将极大地扩展人工光学微结构的集成能力。例如，中山大学王雪华教授及其合作者将光波的入射角度这一自由度引入到超表面的设计中，从而当光波以不同入射角度入射时会产生角度依赖的全息图像生成，如图16所示<sup>[38]</sup>。又如，复旦大学周磊教授及其团队提出了一种全新的角度依赖多功能集成超表面设计，可以根据光波的入射角度对其偏振态进行不同的控制<sup>[39]</sup>。

**新应用：**随着人工光学微结构相关研究的逐步开展，其在光通信、光成像、光聚焦和光操控等领域已经取得了重要应用。近来，人工光学微结构在生物传感和量子光学等领域展现出了广阔的应用前景，为相关研究领域关键科学问题的解决提供了新的途径。例如，澳大利亚国立大学D. Y. Choi教授及其合作者证明：由具有法诺共振效应的超表面阵列组成的传感芯片能够有效地实现对分子官能团的识别检测<sup>[40]</sup>。又如，以色列理工学院M. Segev教授及其合作者证明利用超材料可以实现光子自旋与轨道角动量的量子纠缠，如图17所示<sup>[41]</sup>。

人工光学微结构在光波调控方面具有非常高的自由度，相关研究对于集成光学和微纳光子学的发展具有重要的意义。随着人工光学微结构相关研究的不断深入，基于人工光学微结构获得具有任意光学响应的集成光学器件将成为可

## 参考文献

[1] Veselago V G. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4):509  
 [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J *et al.* Physical Review Letters, 1996, 76(25):4773  
 [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J *et al.* IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11):2075  
 [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C *et al.* Physical Review Letters, 2000, 84(18):4184  
 [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Science, 2001, 292(5514):77  
 [6] Cai W, Shalaei V. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications. New York: Springer Science + Business Media, 2010

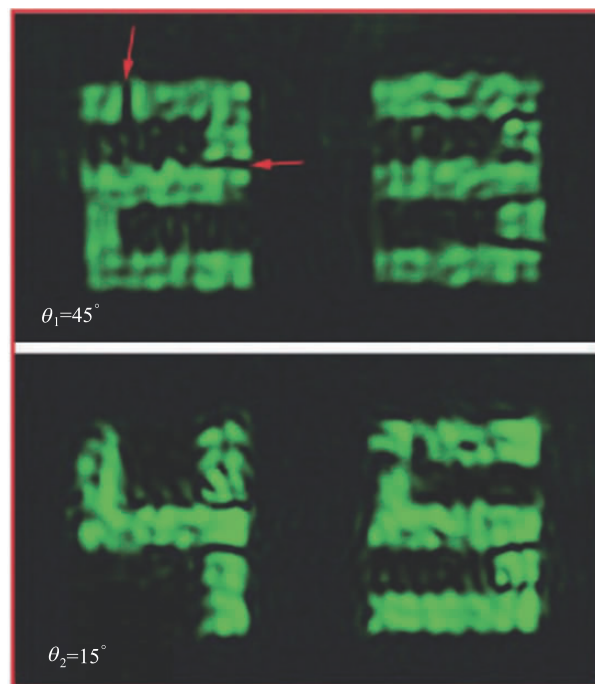


图16 入射光角度不同时超表面产生的全息图像<sup>[38]</sup>

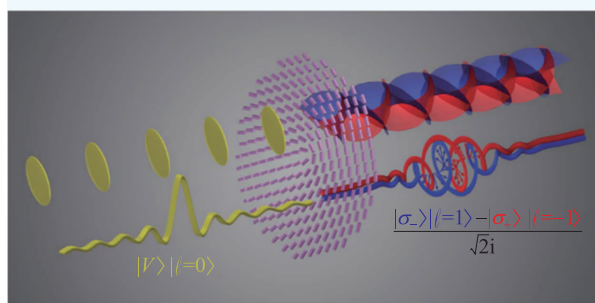


图17 单光子自旋与轨道角动量纠缠示意图<sup>[41]</sup>

能。可以预见，人工光学微结构的相关研究将极大地促进光学在其他各个领域的广泛应用，并进一步推动现代光学研究向前发展。

[7] Zheludev N I. Science, 2010, 328(5978):582  
 [8] Liu Y, Zhang X. Chemical Society Reviews, 2011, 40(5):2494  
 [9] Schurig D, Mock J J, Justice B J *et al.* Science, 2006, 314(5801):977  
 [10] Yu N, Genevet P, Kats M A *et al.* Science, 2011, 334(6054):333  
 [11] Chen X, Huang L, Mühlender H *et al.* Nature Communications, 2012, 3:1198  
 [12] Chen H T, Taylor A J, Yu N. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7):076401  
 [13] Shaltout A M, Kinsey N, Kim J *et al.* Proceedings of the IEEE, 2016, 104(12):2270




关注CIOE官方微信

# 第21届 中国国际光电博览会



## 精密光学展 镜头及摄像模组展

Precision Optics Lens Expo & Camera Module Ex

**2019年9月4-7日**  
深圳会展中心·全馆

光学全产业链展示及交流平台

**展品范围:**

智能相机、板卡、相机配件、工业镜头光源、  
辅助产品、图像处理系统等相关领域

同期展会联动

-  光通信展  
Optical Communications Expo
-  红外技术及应用展  
Infrared Applications Expo
-  激光技术及智能制造展  
Lasers Technology & Intelligent Manufacturing Expo
-  光电子创新展  
Photonics Innovation Expo
-  光电传感展  
Optoelectronic Sensor Expo

110,000m<sup>2</sup> 展出面积  
70,000+ 专业观众  
2,000+ 参展企业  
4,000+ 参展品牌

更多展会详情请浏览  
**WWW.CIOE.CN**

- [14] Vampa G, Ghamsari B G, Mousavi S S *et al.* Nature Physics, 2017, 13(7):659
- [15] Butet J, Brevet P F, Martin O J F. ACS Nano, 2015, 9(11): 10545
- [16] Liu Z, Li Z, Liu Z *et al.* Advanced Functional Materials, 2015, 25(34):5428
- [17] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M *et al.* Nature Nanotechnology, 2015, 10(4):308
- [18] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A *et al.* Nanophotonics, 2018, 7(6): 1041
- [19] Wang L, Kruk S, Tang H *et al.* Optica, 2016, 3(12): 1504
- [20] Chen S, Li Z, Liu W *et al.* Advanced Material, 2019, 31: 1802458
- [21] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R *et al.* Science, 2013, 340(6138):1304
- [22] Li J X, Chen S, Yang H *et al.* Advanced Functional Materials, 2015, 25(34):5428
- [23] Li Z C, Chen S Q, Tang C C *et al.* Applied Physics Letters, 2014, 105(20):201103
- [24] Li Z C, Liu W, Cheng H *et al.* Scientific Reports, 2017, 7(1):8204
- [25] Li Z C, Liu W, Cheng H *et al.* Scientific Reports, 2016, 6: 35485
- [26] Cheng H, Liu Z, Chen S *et al.* Advanced Materials, 2015, 27(36):5410
- [27] Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F. Physical Review A, 2010, 82(5):053811
- [28] Pan W, Cai T, Tang S *et al.* Optics Express, 2018, 26(13):17447
- [29] Wang S, Wu P C, Su V C *et al.* Nature Nanotechnology, 2018, 13(3):227
- [30] Li J, Yu P, Cheng H *et al.* Advanced Optical Materials, 2016, 4(1):91
- [31] Maguid E, Yulevich I, Veksler D *et al.* Science, 2016, 352(6290):1202
- [32] Arbabi A, Arbabi E, Horie Y *et al.* Nature Photonics, 2017, 11(7):415
- [33] Yu P, Li J, Tang C *et al.* Light: Science & Applications, 2016, 5(7):e16096
- [34] Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C *et al.* Physical Review Letters, 2017, 118(11):113901
- [35] Yu G, Xiao M, Fan S H. Physical Review Letters, 2017, 119(16):167401
- [36] Liu Z, Cui A J, Li J J *et al.* Advanced Materials, 2019, 31(4): 1802211
- [37] Liu Z, Zhu D, Rodrigues S P *et al.* Nano Letters, 2018, 18(10):6570
- [38] Bao Y J, Yu Y, Xu H *et al.* Advanced Functional Materials, 2018, 28(51):1805306
- [39] Qiu M, Jia M, Ma S *et al.* Physical Review Applied, 2018, 9(5): 054050
- [40] Tittl A, Leitis A, Liu M *et al.* Science, 2018, 360(6393):1105
- [41] Stav T, Faerman A, Maguid E *et al.* Science, 2018, 361(6407):1101