

文章编号:1005-4642(2019)12-0001-10



## 基于光学人工微结构的光场调控研究

李占成<sup>1</sup>, 刘文玮<sup>1</sup>, 程 化<sup>1</sup>, 陈树琪<sup>1,2</sup>

(1. 南开大学 物理科学学院 泰达应用物理研究院

弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071;

2. 山西大学 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006)

**摘 要:**从光学人工微结构光场调控研究的研究现状出发, 详细介绍了光学人工微结构在光场调控研究中的设计思路、研究流程和实验方法, 着重展示了课题组在本领域近年来的研究进展, 力图以此引导研究型实验教学, 同时为相关领域研究人员提供借鉴。

**关键词:**人工微结构; 光场调控; 微纳光学; 超材料; 超表面

中图分类号: O439

文献标识码: A

DOI: 10. 19655/j. cnki. 1005-4642. 2019. 12. 001

### 1 光学人工微结构光场调控研究现状

#### 1.1 光学人工微结构简介

实现对光场的任意操控, 从而产生新的光学现象和获得具有所需光学功能的光学器件是光学和光子学领域的重要研究目标之一。在传统光学中, 对光场的操控主要通过控制光波在具有不同折射率的介质中的传播距离来实现。一方面, 由于自然界中已有材料的电容率  $\epsilon$  的变化范围非常有限, 且其磁导率  $\mu$  由于材料分子与光波磁场微弱的相互作用近乎全部趋于 1, 因此它们的折射率变化非常有限, 难以实现对光场的任意控制; 另一方面, 由于自然界已有材料对光场的操控依赖于光波在其内部的传播距离, 因此现有的光学器件多具有较大的体积和重量, 无法在小型化、轻质化和集成化的微纳光学系统和片上集成光学系统中被使用<sup>[1-3]</sup>。21 世纪以来, 如何实现对光场的有效操控并获得小型化和轻质化的微纳光学器件成为了微纳光学和光子学研究领域的热门话题。

光学人工微结构是具有亚波长尺度结构单元的人造光学材料, 其光学性质主要与其微结构的结构参量决定而非其组成成分。光学人工微结构的提出为实现对光与物质相互作用的增强和有效控制提供了全新方式, 为光学器件的小型化、轻质

化和集成化提供了全新手段。光学人工微结构的产生和发展, 最初源于对材料电容率和磁导率组成的参量空间的拓展和开发, 以获得自然界中现有材料所不具备的全新光学性质。1968 年, 苏联科学家 V. G. Veselago 对电容率  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负值的材料的光学响应进行了理论研究, 证明了在该材料中存在负折射现象<sup>[4]</sup>。然而由于自然界中并没有电容率  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  同时为负值的材料, 因此负折射现象在自然界中并没有被观察到。21 世纪初, 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结构相结合, 在微波波段获得了电容率和磁导率同时为负的人工微结构(被称为左手材料)并在其中观察到了负折射现象<sup>[5-6]</sup>。左手材料的提出开启了光学人工微结构研究领域的大门, 2003 年被《Science》杂志评为当年十大科技突破之一。通过对人工微结构的合理设计, 可以实现对空间中各个位置电容率和磁导率的有效控制。因此利用人工微结构不仅可以实现负折射现象, 还可以实现包括电磁隐身、光学黑洞、超分辨成像、人造磁性介质和完美透镜在内的多种全新的光学现象和光学功能<sup>[7-8]</sup>。人们将电容率和磁导率可以人为设计的三维光学人工微结构称为超材料(Metamaterials), 如图 1(a)所示。图 1(b)给出了基于超材料

收稿日期: 2019-09-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 11925403); 国家重点研发计划(No. 2016YFA0301102, No. 2017YFA0303800); 中国博士后科学基金(No. 2018M640224, No. 2018M640229)

作者简介: 李占成(1990-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 南开大学物理科学学院助理研究员, 博士, 主要从事少层人工微结构光场调控及其应用研究。



实现电磁隐身的示意图,这是超材料最为人们所熟知的应用领域之一<sup>[9]</sup>. 在 21 世纪前 10 年,超材料相关研究为微纳光学和光子学领域带来了一场革命,2010 年被《Science》杂志评为 21 世纪前 10 年十大科学成就之一.

虽然超材料在光场调控方面取得了巨大的成功,但是其本身也存在一定的不足,例如在与光波相互作用过程中存在一定的损耗. 此外,超材料作为三维人造结构,不易于加工与制备;特别是在高频段,结构复杂的超材料对加工工艺提出了严峻挑战. 2011 年,哈佛大学 F. Capasso 教授及其研究团队利用平面人工微结构实现了对光波相位在亚波长尺度下的有效控制,从而实现了对光波的异常折射<sup>[10]</sup>. 相比于具有三维空间结构的超材料,平面光学人工微结构易于加工且在与光波相互作用过程中损耗较低,因此受到了相关研究领域研究者越来越多的关注. 平面光学人工微结构可以看作超材料的二维对应,故而人们将其命名为超表面(Metasurfaces),如图 1(c)和 1(d)所示. 由于超表面本身的厚度远远小于波长,因此其等效电容率和磁导率在设计中并不会被关注太多,人们在设计过程中更多的是通过调整光波在超表面界面处的透射或反射函数来实现对光波相位、振幅和偏振态的操控. 利用超表面在亚波长尺度下对光波相位、振幅和偏振态的有效控制,包括计算全息成像、超透镜、结构色和多功能器件在内的多种全新的光学功能和器件被先后实现<sup>[11-13]</sup>. 虽然超表面作为平面结构能够有效地降低光波与微结构相互作用过程中的损耗,但与此同时也使得光与微结构相互作用的区域变得非常有限,从而造成了早期超表面设计的工作效率都很低. 例如,基于金属材料的超表面产生异常折射现象的效率的理论上限为 25%<sup>[14]</sup>. 因此,如何提高超表面的工作效率是该研究领域的研究热点之一. 一方面,研究者提出通过采用“金属薄膜-电介质层-金属微结构”这种三明治结构来有效地增强反射模式下超表面的工作效率<sup>[15]</sup>. 另一方面,研究者利用损耗很低的电介质材料代替金属材料作为超表面的构成成分,获得了近乎无损耗的超表面<sup>[16]</sup>.

超表面虽然能够在亚波长尺度下实现对光场振幅、相位和偏振态的有效控制. 但是由于超表面是二维平面结构,因此其单元结构均存在一定

的结构对称性,故而其散射矩阵中的各矩阵元素不相互独立,无法实现对透射和反射光波的同时操控<sup>[17-18]</sup>. 少层超表面的提出为光场的全空间操控提供了一种有效方式;在少层超表面中,可以通过对单元结构对称性的合理设计来实现对其散射矩阵各个矩阵元素的独立控制,从而在透射和反射模式下同时实现对光场的有效操控,如图 1(e)和 1(f)所示<sup>[19-21]</sup>. 除此之外,少层超表面中丰富的层间相互作用机制,如多波干涉效应、近场耦合效应和层间波导效应等,为光与超表面相互作用的有效增强提供了全新的方式<sup>[22-26]</sup>. 值得一提的是,层间弱耦合的少层超表面设计也为多波长下多种光学功能的集成提供了有效手段<sup>[27-29]</sup>. 少层超表面既规避了超材料与光波相互作用过程中较高的损耗和结构本身设计复杂的缺点,也解决了超表面与光场相互作用强度有限的问题,同时其散射矩阵各矩阵元素可以被独立设计,是介于超材料(三维)和超表面(二维)间的新型人工光学微结构设计. 在少层超表面设计中,人们在考虑结构对称性的基础上,通过在层间引入近场耦合效应等光与微结构相互作用机制,在增强其工作效

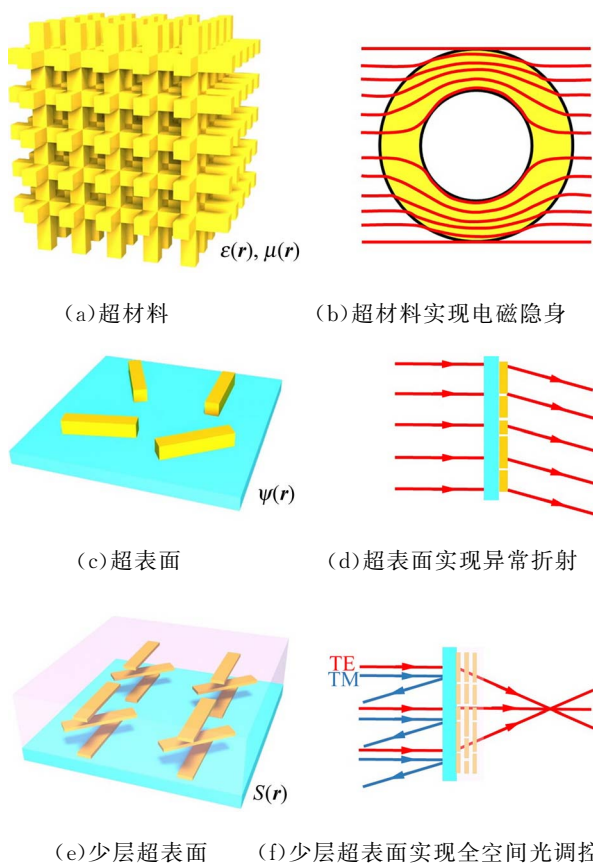


图 1 多种人工微结构设计及其典型应用

率的同时实现对其散射矩阵各个矩阵元素的分立调控,从而在全空间中实现对光波的有效操控.少层超表面散射矩阵可以人为任意设计的特点使得少层超表面在全空间集成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.

### 1.2 光学人工微结构光场调控研究

光学人工微结构可以在亚波长尺度下实现对光场振幅、相位和偏振态任意调控的特点,使得其在光场调控和新型光场构筑方面具有重要的研究价值和广阔的应用前景.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 3 个主要研究内容之一,凸显了光学人工微结构在相关领域的重要研究地位.

图 2 展示了光学人工微结构实现光场单维度与双维度联合调控所对应的典型应用领域<sup>[2]</sup>.目前,人们利用光学人工微结构已经能够实现对光场在单个维度上的有效控制.基于光学人工微结构实现对光波在 2 个维度上的联合调控是光场调控研究领域当前的热门方向.

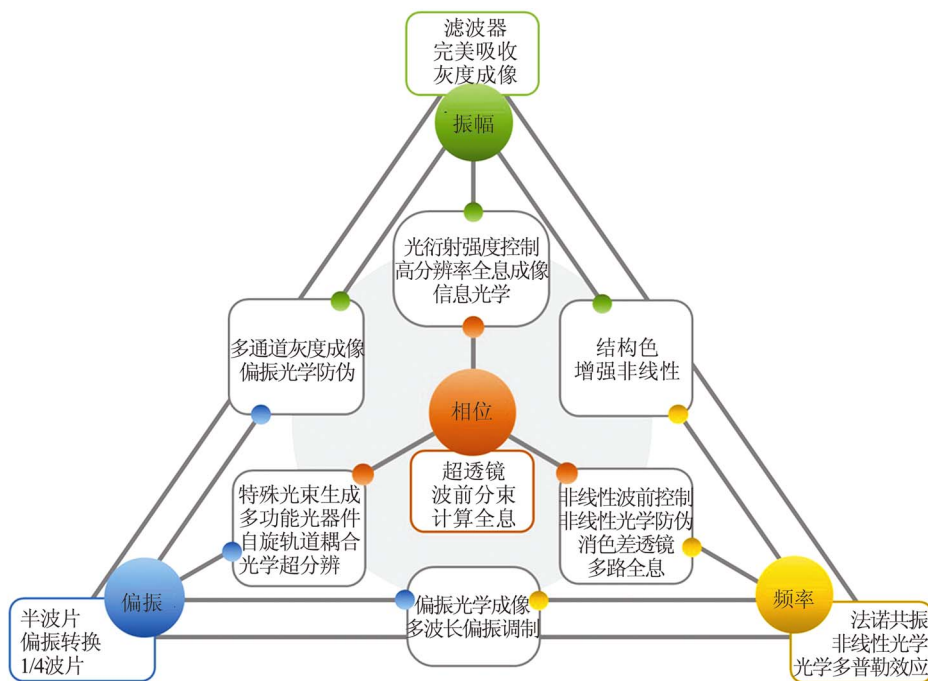
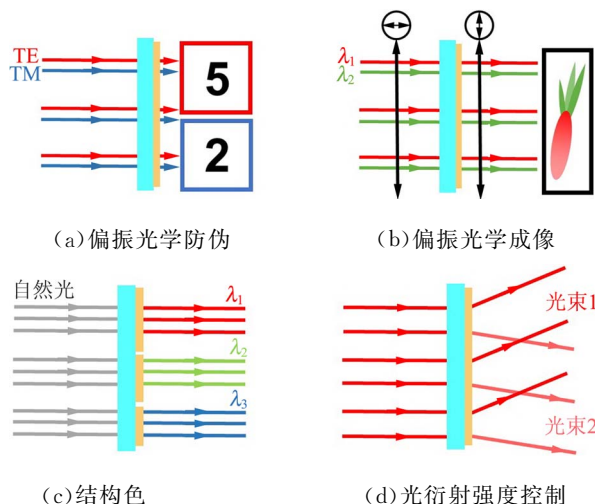


图 2 光学人工微结构光场调控应用

图 3 给出了目前光学人工微结构光场双维度联合调控研究中的典型应用的示意图.例如,通过偏振依赖的光场强度调制可以在不同偏振下产生不同的灰度图像,从而实现偏振光学防伪<sup>[26]</sup>.通过在不同波长下实现对光波偏振态的分立控制,可以实现彩色偏振成像<sup>[30]</sup>.通过在不同波长下实现对光波透过率的独立控制可以实现高饱和度结构色<sup>[31]</sup>.通过对光波的振幅和相位同时控制可以实现对光波衍射强度分布的有效控制<sup>[32]</sup>.通过对光波相位的偏振依赖控制,可以实现不同光学功能的集成<sup>[33]</sup>.通过在不同波长下实现对光波相位的控制,可以实现消色差透镜<sup>[28]</sup>.从上述典型应用可



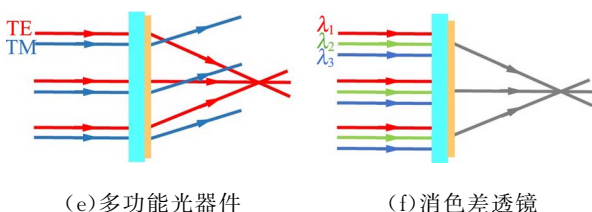


图 3 光学人工微结构光场双维度联合调控典型应用

以看出,光学人工微结构在光场调控研究领域具有广泛的应用前景,相关研究正如火如荼,方兴未艾。

## 2 研究方法概述

光学人工微结构光场调控研究的研究流程可以简要概括为理论分析、结构设计、样品加工和实验测试 4 个部分,如图 4 所示。

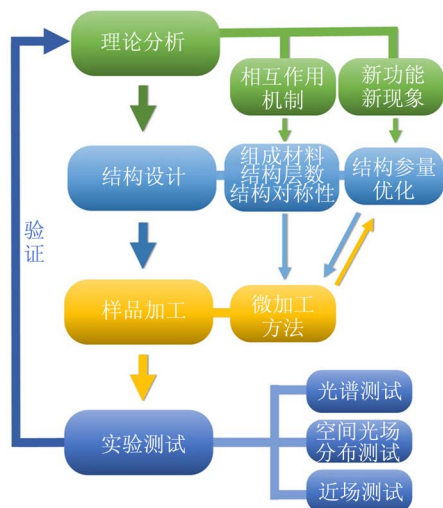


图 4 光学人工微结构研究方法

### 2.1 理论分析

理论分析是光学人工微结构光场调控研究中最重要的重要组成部分。理论分析研究可以概括为 2 个主要研究内容:1) 微结构与光场相互作用物理机制研究;2) 新现象和新功能实现方法研究。顾名思义,微结构与光场相互作用物理机制研究旨在通过研究光学人工微结构与光波的相互作用机制,明确微结构中对光场特定维度调控的实现与微结构组成材料、结构层数和结构对称性等结构特征间的关系,从而指导微结构的结构设计。惠更斯超表面的提出<sup>[34]</sup>、少层人工微结构中多波干涉效应的研究<sup>[35]</sup>、电介质超表面中多级共振模式的研究<sup>[36]</sup>和对具有不同对称性的微结构的散射矩阵的规律分析<sup>[18]</sup>都属于物理机制研究。而新现象和新功能实现方法的研究则往往不涉及具体的微结构,主要

是从波动光学理论和麦克斯韦方程出发得到产生新的光学现象或者获得特定的光学功能所需要的光学响应分布函数<sup>[37]</sup>,然后再根据相互作用物理机制研究的结果寻找具有该光学响应分布函数的光学人工微结构。光学人工微结构中负折射现象的实现<sup>[4]</sup>、消色差透镜的设计<sup>[38-40]</sup>、光学多功能集成的设计<sup>[41]</sup>和光场自旋选择透过的实现<sup>[42]</sup>等都属于实现方法研究。

### 2.2 结构设计

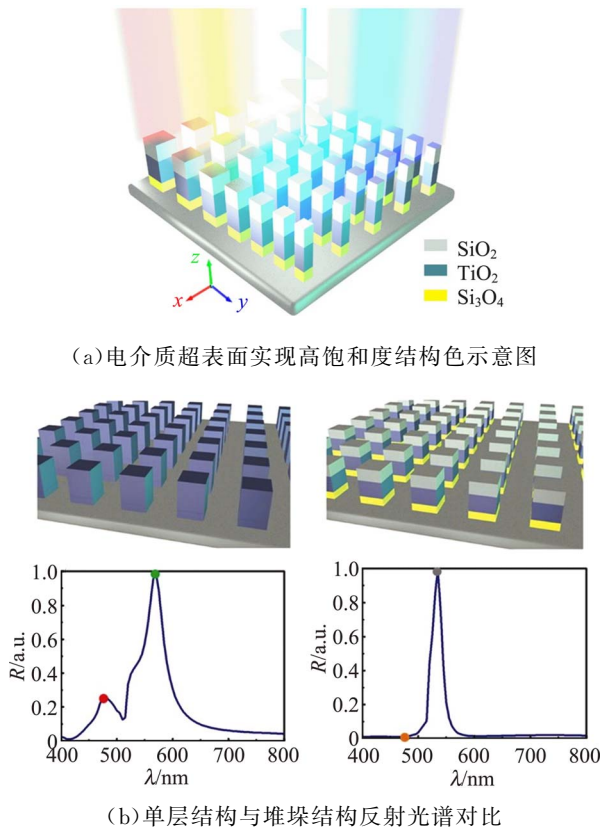
光学人工微结构的设计主要分为 2 步。首先根据所需的光学响应分布函数,按照光场与微结构相互作用物理机制的研究结果确定微结构特征,包括微结构的组成材料、结构层数、结构对称性、结构形状和结构参量变化范围等。在光学微结构设计中,从已有的光学人工微结构中借鉴设计经验对于简化结构设计流程具有重要的指导作用。第二步在确定微结构特征的基础上通过数值模拟的方式进行结构优化,从而让光学人工微结构的光学响应分布函数与理论要求相一致。在数值模拟优化过程中,主要针对结构的形状和大小等进行优化,进而调整光学人工微结构的光学响应。目前比较成熟的数值模拟软件有 COMSOL Multiphysics, CST MICROWAVE STUDIO 和 Lumerical FDTD solutions 等。设计经验在光学人工微结构的结构优化中起着举足轻重的作用,对于经验丰富的设计者来说,结构优化过程往往能够比新进人员快出很多。近来,研究证明通过在光学人工微结构的设计优化中引入人工智能算法能够帮助设计者更快地完成对于微结构的结构优化<sup>[43-45]</sup>。

### 2.3 样品加工

光波波段光学人工微结构的加工主要通过电子束曝光技术、聚焦离子束加工技术、纳米压印技术、3D 打印技术、干涉光刻技术和自组装技术等来实现。在样品加工的过程中,首先根据光学人工微结构的组成成分、整体尺寸和结构形貌选取合适的加工技术,要考虑加工技术的分辨率、可重复性、加工尺寸和加工费用等因素。之后再根据加工制作出的样品决定是否需要重新进行参量优化。在某些情况下,由于优化后的微结构的结构形貌和尺寸在实际加工过程中不容易实现,或者在加工完成后不容易保持稳定,需要进行进一步的结构参量优化并重新加工样品。例如,在电介质超表面加工过程中,如果结构的高宽比太大,加工完成后的样品容



对特定波长光波具有吸收和散射能力的化学染料是人为产生颜色的主要方式. 相比于利用化学染料产生的颜色, 光学人工微结构中颜色的产生则是通过人为操控微结构对特定波长光波的散射来实现的. 由于光学人工微结构中颜色的产生来源于微结构对光波的散射, 因此也被称为结构色. 光学人工微结构产生的结构色是一种非常环保的成色体系, 具有高分辨率和高可控性等特点. 目前, 利用电介质超表面 (例如非晶硅超表面<sup>[49]</sup>和二氧化钛超表面<sup>[50]</sup>) 产生的颜色已经覆盖并扩展到了 sRGB 色彩空间之外. 然而由于电介质微结构在与光波的相互作用过程中总会伴随着高阶共振模式的激发, 从而在多个波段上产生对光的散射. 因此利用电介质超表面无法完全实现仅在单一波段范围内对光波散射的操控, 从而导致了所产生的结构色不具有超高的饱和度. 我们提出了少层电介质层堆垛超表面结构, 如图 7(a) 所示<sup>[31]</sup>. 通过调整该结构中电介质堆垛层的厚度可以实现对其与光场相互作用过程中激发的多级共振模式的深度调控, 从而有效地抑制非设计波段共振模式的激发, 显著地提高反射光谱的单色性, 如图 7(b) 所示. 进一步地, 通过调整少层电介质层堆垛超表面结构的结构周期  $T$  和堆垛结



(c) 电介质超表面中结构色的模拟和实验结果

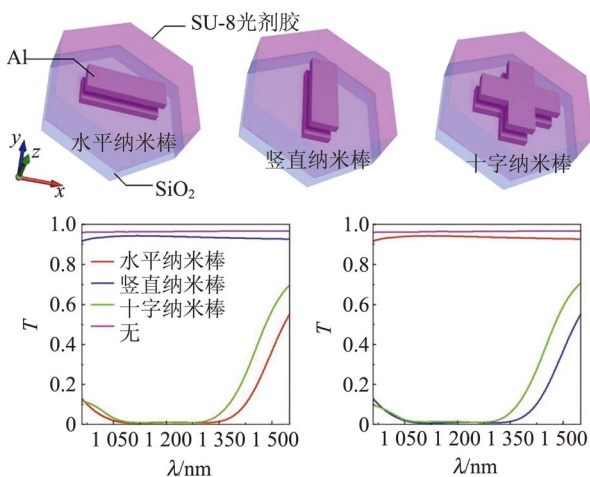
图 7 少层电介质超表面实现超高饱和度结构色

构间的间距  $d$ , 可以实现不同的高饱和度结构色, 图 7(c) 展示了通过 CCD 相机在反射模式下观测到的 55 个具有不同结构周期和间距的少层电介质层堆垛超表面所产生的超高饱和度结构色及其在 CIE1931 色彩空间中所对应的具体位置. 从实验测量结果可以看出, 所提出的少层电介质层堆垛超表面占据的 CIE1931 色彩空间范围是 sRGB 色彩空间的 128%, 是 Adobe RGB 色彩空间范围的 95%. 值得一提的是, 所提出的少层电介质层堆垛超表面所产生的结构色的分辨率至少达到了 18 000 dpi, 完全满足成像和显示应用. 我们所提出的少层电介质层堆垛超表面有望为先进的显示和成像应用提供新的载体, 在高级成像、数字电影投影、超高清电视、高端相机和高密度光学数据存储等领域都具有潜在的应用价值. 此外, 所提出的少层堆垛的设计理念还可被进一步用于提高其他已有光学人工微结构中结构色的饱和度.

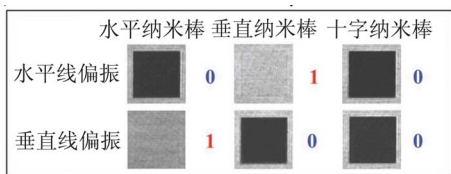
### 3.2 近完美偏振片与偏振依赖多通道成像

实现对光场强度在微米尺度的任意控制是光学器件集成化和小型化的基本要求之一, 相关研究对于高分辨率成像和信息防伪等领域的发展具有重要意义. 根据马吕斯定律, 线偏振光经过偏振片后, 透射光的强度正比于线偏振光与偏振片光轴的夹角, 因此可以利用光学人工微结构实现偏振片对应的光学功能, 从而在亚波长尺度下通过

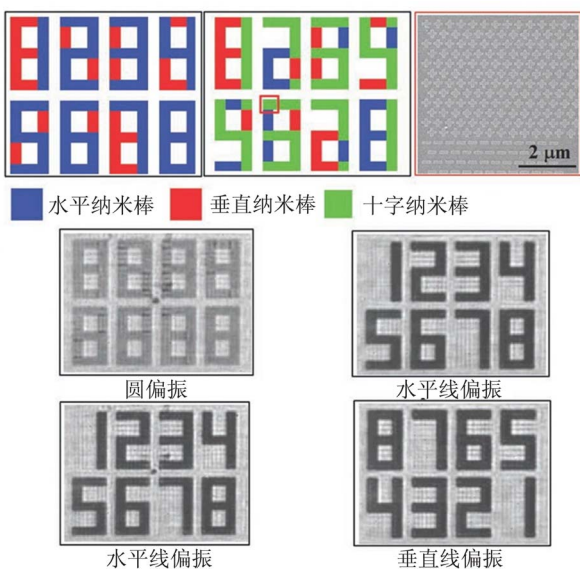
对微结构偏振片光轴朝向的人工设计实现对线偏振光透射强度的任意控制. 然而,由于超表面与光场的相互作用强度非常有限,因此利用超表面无法在宽波段范围内实现高消光比的偏振消光. 我们提出了双层超表面结构,利用光波在层间的多波干涉效应,有效地增强了光场与微结构的相互作用强度,进而在近红外宽波段范围内实现了高消光比的偏振消光效应<sup>[26]</sup>. 图 8(a)展示了 3



(a) 3 种少层人工微结构及其在  $x$  和  $y$  偏振下的透射光谱



(b) 少层人工微结构实现偏振依赖光强控制



(c) 少层人工微结构偏振依赖单通道和双通道成像

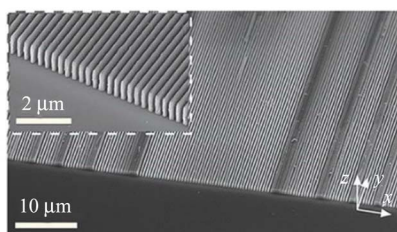
图 8 少层人工微结构偏振依赖多通道成像

种双层人工微结构设计及其在  $x$  (左侧谱图) 和  $y$  (右侧谱图) 偏振光波入射下的透射光谱. 从图 8 中可以看出,所设计的双层人工微结构可以在宽波段范围内实现高消光比的偏振消光,且其透光方向垂直于纳米棒. 图 8(b)展示了 3 种双层人工微结构样品中的偏振消光效应的实验测试结果. 可以看出双层纳米棒结构只能透过偏振方向垂直于纳米棒的光波,而双层纳米十字天线结构则在 2 个垂直方向上都不透光,因此所提出的 3 种双层人工微结构可以被用来实现偏振依赖的光强度编码,从而实现单通道和双通道偏振依赖成像. 图 8(c)展示了利用所提出的 3 种双层人工微结构基本单元实现偏振依赖单通道和双通道成像的设计原理和实验测试结果. 此外,利用所提出的少层超表面结构还可以实现高分辨率灰度成像和光学防伪等应用. 所提出的少层超表面结构中的偏振消光光学响应对于双层结构间的对齐程度和入射光波的入射角度具有良好的鲁棒性,因此具有很好的实用性.

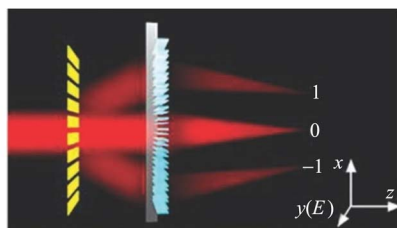
### 3.3 突破傍轴条件的宽场傅里叶超透镜

傅里叶变换作为光通信领域的基础理论之一具有重要的研究意义,其在压缩感知、图像传输和光学校正等领域应用广泛. 傅里叶透镜是光场空间变换的基础性元件. 所谓傅里叶透镜,即可以对前焦平面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. 在传统光学中,傅里叶透镜主要利用厚度缓慢变化的薄透明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,但是该设计大大增加了生产成本与透镜体积. 光学人工微结构能够在亚波长尺度下实现对光场相位的有效控制,因此为突破傍轴条件的宽场傅里叶透镜的实现提供了一种有效途径. 然而,目前已有的光学人工微结构超透镜多用于成像<sup>[51-52]</sup>,高效率宽场傅里叶透镜还未被实现,这主要是由于在已有的基于光学人工微结构的超透镜设计中,其基本结构单元的光学响应函数多依赖于光场的入射角度. 当光场的入射角度较大时,光学人工微结构中的光学响应分布函数将不再符合理论设计,因此无法在大角度下保持其光学功能的稳定性. 如何利用光学人工微结构实现角度

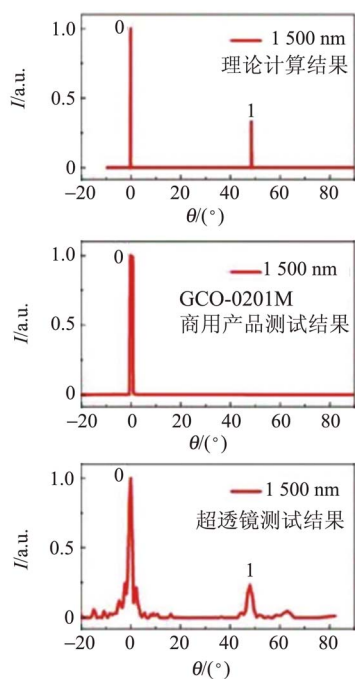
弱色散的光场相位调控对于微尺度下宽场傅里叶透镜的设计具有重要意义. 我们提出了大高宽比的非晶硅波导结构用以实现宽场傅里叶超透镜<sup>[53]</sup>. 高折射率是非晶硅材料的重要特性, 高度约为 1 个波长的非晶硅波导结构可以将入射光波耦合到波导中, 且其耦合模式对于入射光角度具有良好的鲁棒性, 因此其光学响应在光场大角度入射下仍能保持良好的稳定性. 进一步地, 通过对波导宽度的改变就可以实现对透射光波相位的有效控制, 从而实现宽场傅里叶超透镜. 图 9(a)



(a) 傅里叶超透镜的扫描电镜图



(b) 超透镜实现傅里叶变换的示意图



(c) 超透镜与商用傅里叶透镜对比

图 9 突破傍轴条件的宽场傅里叶超透镜

展示了所设计的宽场傅里叶透镜样品在扫描电子显微镜下的图像. 实验测试结果表明, 所提出的宽场傅里叶超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  $0^\circ \sim 60^\circ$  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  $1\ 100 \sim 1\ 700\ \text{nm}$  的宽波段范围. 图 9(b) 是宽场傅里叶超透镜对经过透射光栅的光波进行傅里叶变换的示意图, 图 9(c) 给出了  $1\ 500\ \text{nm}$  光波入射时, 其与商用傅里叶透镜进行对比的实验测试结果. 可以看出, 所提出的傅里叶超透镜突破了传统傅里叶透镜的傍轴约束条件, 明显拓宽了视场范围, 对于高级次傅里叶分量实现了高度再现. 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.

#### 4 结束语

通过介绍基于光学人工微结构的光场调控的研究现状、研究方法和我们所取得的一些研究进展, 力图帮助研究者了解该研究领域的研究现状, 掌握相关研究的基本研究方法和研究流程, 同时对光学人工微结构在光场调控领域的应用范围有较为全面的了解. 光学人工微结构可以实现对光场高自由度的调控, 在光场调控和新型光场构筑等光学研究领域占有重要的研究地位, 相关研究对于推动微纳光学与集成光子学器件的研发具有积极意义. 当前物理实验教学越来越注重前沿性、研究性和自主设计性. 让学生尽早掌握国际前沿研究领域的基本研究方法和研究思路, 开阔学生的眼界, 培养学生自主学习、分析问题和设计实验的能力, 可以为学生开展科学研究奠定良好的前期基础. 希望本文能对相关物理实验教学和科研工作者提供有益的借鉴.

#### 参考文献:

- [1] Saleh B E A, Teich M C. Fundamentals of photonics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1991:1-35.
- [2] Chen S, Li Z, Liu W, et al. From single-dimensional to multidimensional manipulation of optical waves with metasurfaces [J]. Advanced Materials, 2019, 31(16):1802458.
- [3] Sun S, He Q, Hao J, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2019, 11(2):380-479.



- [4] Veselago V G, Lebedev P N. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Physics-Usppekhi*, 1968, 10(4): 509-514.
- [5] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184.
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [7] Zheludev N I. The road ahead for metamaterials [J]. *Science*, 2010, 328(5978): 582-583.
- [8] Liu Y, Zhang X. Metamaterials: a new frontier of science and technology [J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [9] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [10] Yu N, 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.
- [11] Chen X, Huang L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [12] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications [J]. *Reports on progress in physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [13] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 889-898.
- [14] Liu Z, Li Z, Liu Z, et al. High-performance broadband circularly polarized beam deflector by mirror effect of multinanorod metasurfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(34): 5428-5434.
- [15] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308.
- [16] Wang L, Kruk S, Tang H, et al. Grayscale transparent metasurface holograms [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1504-1505.
- [17] 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 [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35485.
- [18] Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F. Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(5): 053811.
- [19] Pan W, Cai T, Tang S, et al. Trifunctional metasurfaces: concept and characterizations [J]. *Optics express*, 2018, 26(13): 17447-17457.
- [20] Zhuang Y, Wang G, Cai T, et al. Design of bifunctional metasurface based on independent control of transmission and reflection [J]. *Optics express*, 2018, 26(3): 3594-3603.
- [21] Cai T, Wang G M, Xu H X, et al. Bifunctional pancharatnam-berry metasurface with high-efficiency helicity-dependent transmissions and reflections [J]. *Annalen der Physik*, 2018, 530(1): 1700321.
- [22] Cheng H, Liu Z, Chen S, et al. Emergent functionality and controllability in few-layer metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(36): 5410-5421.
- [23] Chen S, Zhang Y, Li Z, et al. Empowered layer effects and prominent properties in few-layer metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801477.
- [24] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [25] Luo W, Sun S, Xu H X, et al. Transmissive ultrathin pancharatnam-berry metasurfaces with nearly 100% efficiency [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(4): 044033.
- [26] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Arbitrary manipulation of light intensity by bilayer aluminum metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(13): 1900260.
- [27] Forouzmand A, Mosallaei H. Composite multilayer shared-aperture nanostructures: a functional multispectral control [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1427-1439.
- [28] Avayu O, Almeida E, Prior Y, et al. Composite functional metasurfaces for multispectral achromatic optics [J]. *Nature communications*, 2017, 8: 14992.
- [29] Ding J, Xu N, Ren H, et al. Dual-wavelength terahertz metasurfaces with independent phase and

- amplitude control at each wavelength [J]. *Scientific reports*, 2016,6:34020.
- [30] Zang X, Dong F, Yue F, et al. Polarization encoded color image embedded in a dielectric metasurface [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30 (21): 1707499.
- [31] Yang B, Liu W, Li Z, et al. Ultra highly saturated structural colors enhanced by multipolar-modulated metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2019, 19 (7):4221-4228.
- [32] Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014,26 (29):5031-5036.
- [33] 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.
- [34] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015,3(6):813-820.
- [35] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (7):7165-7172.
- [36] Papisimakis N, Fedotov V A, Savinov V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space [J]. *Nature Materials*, 2016, 15 (3): 263-271.
- [37] Liu W, Li Z, Cheng H, et al. Momentum analysis for metasurfaces [J]. *Physical Review Applied*, 2017,8(1):014012.
- [38] 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.
- [39] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018,13(3):227-232.
- [40] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature communications*, 2017,8(1):187.
- [41] Maguid E, Yulevich I, Veksler D, et al. Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array [J]. *Science*, 2016,352(6290):1202-1206.
- [42] Li Z, Liu W, Cheng H, et al. Spin-selective transmission and devisable chirality in two-layer metasurfaces [J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1): 8204.
- [43] Phan T, Sell D, Wang E W, et al. High-efficiency, large-area, topology-optimized metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2019,8(1): 48.
- [44] Zhang Q, Liu C, Wan X, et al. Machine-learning designs of anisotropic digital coding metasurfaces [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2019,2 (2):1800132.
- [45] Malkiel I, Mrejen M, Nagler A, et al. Plasmonic nanostructure design and characterization via deep learning [J]. *Light: Science & Applications*, 2018,7(1):60.
- [46] Hemmatyar O, Abdollahramezani S, Kiarashinejad Y, et al. Full color generation with Fano-type resonant HfO<sub>2</sub> nanopillars designed by a deep-learning approach [J]. *Nanoscale*, 2019, 11 (44): 21266-21274.
- [47] Liu Z, Cui A, Li J, et al. Folding 2D structures into 3D configurations at the micro/nanoscale: principles, techniques, and applications [J]. *Advanced Materials*, 2019,31(4):1802211.
- [48] Yu P, Li J, Tang C, et al. Controllable optical activity with non-chiral plasmonic metasurfaces [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5 (7): e16096.
- [49] Flauraud V, Reyes M, Paniagua-Dominguez R, et al. Silicon nanostructures for bright field full color prints [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4 (8): 1913-1919.
- [50] Sun S, Zhou Z, Zhang C, et al. All-dielectric full-color printing with TiO<sub>2</sub> metasurfaces [J]. *ACS nano*, 2017,11(5):4445-4452.
- [51] 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.
- [52] Arbabi A, Arbabi E, Kamali S M, et al. Miniature optical planar camera based on a wide-angle metasurface doublet corrected for monochromatic aberrations [J]. *Nature Communications*, 2016,7: 13682.
- [53] Liu W, Li Z, Cheng H, et al. Metasurface enabled wide-angle fourier lens [J]. *Advanced Materials*, 2018,30(23):1706368. (下转 14 页)

## 参考文献:

- [1] 谢宁,李华振,张季. 千分表法测量金属线胀系数实验分析[J]. 大学物理, 2017, 36(12): 34-36.
- [2] 骆敏,骆泽如,陈蕾,等. 多重反射激光光杠杆测量金属线胀系数[J]. 物理实验, 2018, 38(7): 14-16.
- [3] 王军,秦永华,周开学,等. 测量金属材料线膨胀系数的两种新方法[J]. 物理实验, 1998, 18(4): 7-10.
- [4] 刘肖一,王文彦,平澄. 测金属线膨胀系数的 2 种方法[J]. 物理实验, 2018, 38(11): 54-57.
- [5] 张存恕,李德宽. 用激光散斑法测金属的杨氏模量[J]. 物理实验, 1983, 3(3): 97-98.
- [6] 刘晓. 金属线膨胀系数的智能检测实验[J]. 物理实验, 1998, 18(4): 23-24.
- [7] 张瑛,李尧. CCD 探测器在测量金属丝线膨胀系数中的应用[J]. 物理实验, 2002, 22(12): 38-39.
- [8] 王勤,黄丽清,王永昌. 利用散斑照相检测微小位移的实时方法[J]. 光子学报, 2003, 32(6): 1010-1012.
- [9] 房鑫,刘成森,张囡囡,等. 数字激光散斑照相技术测金属杨氏模量[J]. 物理实验, 2018, 38(3): 21-23.

## Measurement of lateral micro-displacement with laser speckle and its application

ZHANG Li, YANG Yi-fan, RONG Zhen-yu, QU Xiang-wen, JIANG Yi-mai

(School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** An improved method for measuring lateral micro-displacement based on laser speckle was proposed. The method overcame the shortcomings of previous laser speckle method such as low fringe contrast and high noise. Twice Fourier transform of the double-exposure speckle intensity distribution was carried out with fast Fourier transform algorithm. The lateral micro-displacement of the measured object could be calculated by measuring the spacing between two adjacent peaks of the auto-correlation intensity in the final light field. This method was applied to measure the linear expansion coefficient of metal. The experiment results demonstrated the feasibility of the method.

**Key words:** speckle photography; lateral micro-displacement; autocorrelation; fast Fourier transform

[责任编辑:尹冬梅]

(上接 10 页)

## Manipulating optical waves based on artificial nanostructures

LI Zhan-cheng, LIU Wen-wei, CHENG Hua, CHEN Shu-qi

- (1. The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physics and TEDA Institute of Applied Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;  
2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Starting from a brief introduction of development and research status of artificial nanostructures for optical wave manipulation, we presented the design strategy, research process and experimental method in this research area in detail and showed our recent advances. We expect that this article can guide research-based experimental teaching, and provide references for related scientific researchers.

**Key words:** artificial nanostructure; optical wave manipulation; nanophotonics; metamaterial; metasurface

[责任编辑:尹冬梅]