

# 2020年光学超材料热点回眸

孙竞博,文永正,王陈,赵世强,王菲翎,周济\*

清华大学材料学院,北京 100084

**摘要** 光学超材料一直是超材料学科中的重要组成部分之一,是超材料在信息科学领域中应用的重要体现。2020年,光学超材料领域的研究涌现出了一大批非常优秀的科技成果。围绕非线性光学超材料、人工智能超材料与光学超表面等方面回顾了光学超材料在2020年的研究热点。

**关键词** 光学超材料;非线性光学超材料;人工智能超材料;光学超表面

超材料作为一种新的材料学研究范式,可以发展出一系列具有奇异特性的新型人工材料系统。在超材料概念提出至今的20年里,其重大科学价值及在诸多应用领域呈现出的革命性应用前景得到了世界各国科技界、产业界、政府及国防部门的高度关注,有关超材料的前沿研究和工程化应用在近年来得到了迅速发展。光学超材料一直是超材料学科中的最重要组成部分之一,是超材料在信息科学领域中应用的重要体现。近年来,光学超材料的研究趋势呈现出线性向非线性拓展、经典系统向量子系统延伸、传统研究向机器学习与人工智能过渡等趋势;超材料实现光学非线性以及构建量子物理系统是对超材料思想的进一步提升;同时也使超材料领域本身得到了进一步的扩展;而机器学习与人工智能的融入,这使得超材料的设计提升到了一个新的层次。另一方面,整体行业发展也在从基础研究中解决科学问题转向实际应用中解决常规材

料所无法克服的问题,大量有关基于超材料或超表面的器件的报道以及应用场景的提出是本年度超材料研究的一大特点。中国在超材料领域也进行了大量布局,在“十二五”计划中的新材料技术领域,就支持了超材料及其相关器件关键技术研发,在“十三五”计划中将超材料列为战略性规划。目前,国内超材料的研究队伍已初具规模,在该领域进行了卓有成效的研究。2020年虽受疫情影响,但超材料领域的研究还是涌现出了一大批非常优秀的科技成果,本文对2020年国内外光学超材料领域的相关热点和重要进展进行回顾。

## 1 非线性光学超材料

超材料的奇特性质主要是源于其特殊的几何结构以及尺寸参数,受其化学成分的影响较小,因此通过合理设计超材料的几何参数和空间构型可

收稿日期:2021-12-23;修回日期:2021-01-05

基金项目:国家自然科学基金委员会基础科学中心项目(51788104)

作者简介:孙竞博,副教授,研究方向为光学超材料,电子信箱:jingbosun@tsinghua.edu.cn;周济(通信作者),教授,中国工程院院士,研究方向为超材料,电子信箱:zhouji@tsinghua.edu.cn

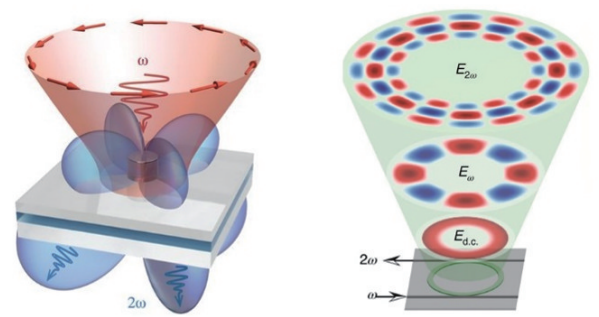
引用格式:孙竞博,文永正,王陈,等. 2020年光学超材料热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 192-200; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.01.016

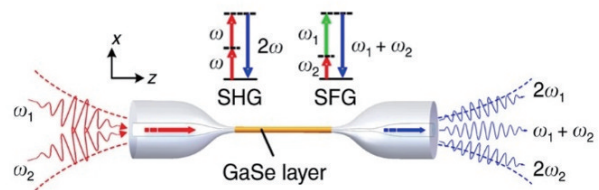
以突破自然材料非线性光学效应的一些局限性,还可以增强和调控自然材料的本征非线性效应。例如,利用金属等离激元共振结构产生偶次谐波<sup>[1-2]</sup>;在二聚体纳米结构中显著增强了三次谐波<sup>[3]</sup>;金属膜上的孔阵列超材料实现四波混频信号 $0\sim 2\pi$ 连续相位调制,可用于波束控制和聚焦<sup>[4]</sup>;基于贝里几何相位的非线性全息成像<sup>[5]</sup>等。

近年来,介质基超材料低损耗、高损伤阈值、大非线性极化系数等优点使其成为非线性超材料的前沿和热门研究方向。在非线性超材料器件小型化和集成化方面,澳大利亚国立大学的 Koshelev 等<sup>[6]</sup>利用连续体中束缚态(BIC)的光约束机制,在纳米级亚波长的 AlGaAs 独立圆柱体谐振器中获得增强的二次谐波产生(图 1(a)),这个工作提出了一种使用亚波长介电谐振子以显著增强光-物质的相互作用的方法,在纳米级激光器、量子光子和传感器等领域有广泛的应用前景,为开发集成非线性纳米光子器件提供了一个平台。在光纤非线性超材料方面,西北工业大学赵建林团队<sup>[7]</sup>研制了一种由具有强二阶非线性效应的层状二维材料硒化镱包覆微光纤构成的全光纤超材料波长转换器(图 1(b)),该转换器通过倍频与和频等非线性效应实现波长转换,利用该方案制备的波长转换器,仅需百微瓦量级光功率(远小于一支普通激光笔的输出光功率)即可将近红外光稳定地转换为可见光。这种在全光纤中实现的光波长高效转换,可为光纤激光器等拓展新波段光源,并且易于与目前的电信基础设施集成,在变频光纤光源、全光信号处理、光纤传感器等领域有着广泛的应用。美国国家标准和技术研究所的 Lu 等<sup>[8]</sup>在高 Q 值的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微环中结合光诱导的有效  $\chi^{(2)}$  非线性和共振增强的完美相位匹配器件实现了高效的二次谐波产生(图 1(c)),此微环共振器可产生毫瓦级的二次谐波输出,功率转换效率达  $(22\pm 1)\%$ 。这个工作在硅光子学中实现高效  $\chi^{(2)}$  非线性,为进一步集成自参考频率梳和光参考频率铺平了道路。

全光开关作为一种重要的非线性光学器件,其在超高速通信中的应用对低能耗、高速、强调制比、小体积和片上集成等性能有较高要求。尽管目前



(a) 纳米级亚波长的 AlGaAs 独立圆柱体谐振器中获得增强的二次谐波产生  
(b) 层状二维材料硒化镱包覆直径为微米量级的微光纤构成的全光纤波长转换器



(c) 高 Q 值的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微环中高效的二次谐波产生

图 1 介质基超材料示意

小体积和片上集成的全光开关有实现途径,但超低能量消耗和超快切换时间之间的平衡依然面临着巨大的挑战。针对这一问题,哈尔滨工业大学宋清海团队<sup>[9]</sup>在超快调制微激光器领域取得重要突破,提出了钙钛矿超表面中拓扑保护 BIC 全光开关原理(图 2(a)),保证了微型激光从径向极化的环形光束到线性极化的旁瓣光的相互超快切换,BIC 的极高品质因子能显著降低激光阈值,从而解决传统全光开关中超短切换时间与超低能耗之间的矛盾,有望成为最终实现光计算和量子计算的关键步骤。此外,暨南大学与台湾大学的合作研究<sup>[10]</sup>在全电介质超表面研究中也取得了重要进展,他们利用亚波长尺度的硅纳米盘所激发的光学 anapole 模态(图 2(b)),获得比体态硅高 3~4 个数量级的光热非线性,实现了对硅纳米盘光散射响应接近 100% 的调制幅度的高效动态的全光调控。进一步研究表明,利用扫描激光共聚焦显微系统对纳米硅盘散射成像,获得亚波长特征尺度的成像光斑,并对亚波长硅纳米盘进行了精度高达 40 nm 的远场超分辨定位成像,这种成像具有无损、非标记、突破衍射极限的超分辨定位能力,将有可能在晶圆光刻结构的无损原位检测等领域发挥重要作用。

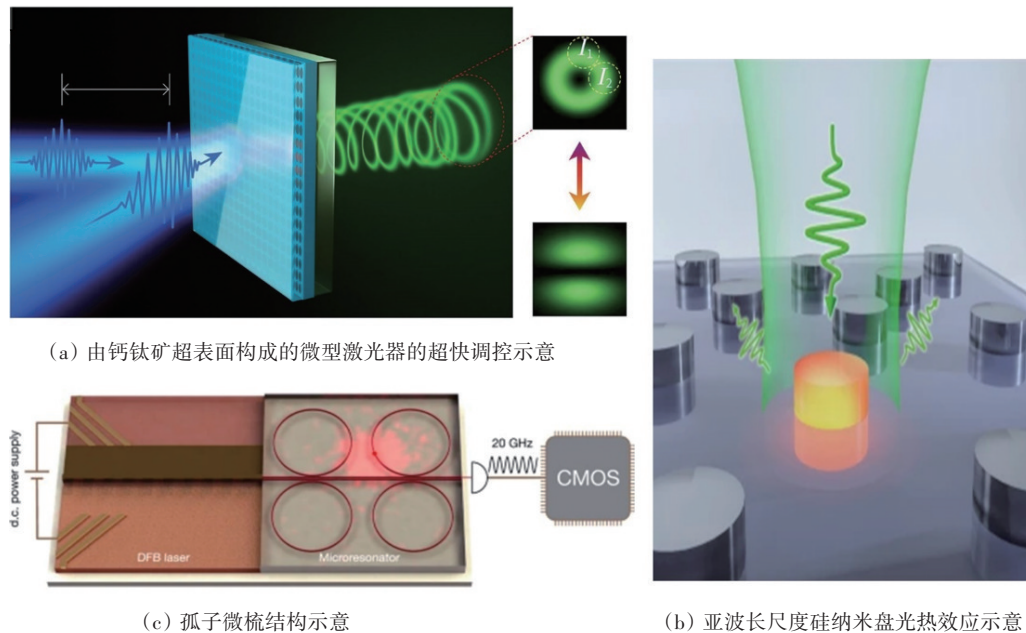


图 2 全光开关原理及材料示意

光学频率梳在计时、测距和光谱学等重要领域有着广泛的运用。传统的光频梳采用桌面级锁模激光器产生,它具有结构复杂、成本高昂,对使用环境的要求高等特点。近年来,多个研究团队一直致力于在集成光电子平台上搭建小体积、低能耗的芯片级光频梳。2020年6月,由美国加州理工学院、加州大学圣芭芭拉分校以及瑞士洛桑联邦理工学院组成的研究团队<sup>[11]</sup>,在芯片级光频梳的集成化上取得了突破性进展,他们将超低损耗的氮化硅微腔芯片与商用的分布式反馈(DFB)激光器芯片直接封装对接耦合来产生孤子微梳(图2(c))。这个器件去掉了光隔离模块,使得在微腔内背向散射的激光可以再次回到激光器里。基于自注入锁定机制,可将激光器的频率锁定在微腔的谐振频率处。光学微腔与无隔离器的激光器构成具有超高品质因子的激光系统,得益于自注入锁定反馈机制,激光器的噪声降低了30 dB以上,超越了目前最好的硅基集成激光器。更重要的是,考虑到微腔的非线性效应,整个系统仅有一个特殊的稳定点,无论初始条件如何变化,系统都可以自发地演化到全新的运行点上产生孤子微梳。此工作孤子微梳的激发既不需要耗能的电子控制电路和难以集成的光学隔离器,对光学频率梳的单片集成以及工业化生产

和应用具有划时代的意义。

非线性超材料具有自然材料难以比拟的光波调控能力,将极大推动受限于自然材料性质的非线性光学相关领域的快速发展,其结构紧凑、高设计自由度和高兼容性等优点使非线性超材料在拓宽激光器波长、光调制器和全光信息处理等重要领域有广阔的应用前景,但目前非线性超材料较低的转换效率限制了非线性超材料器件的实用性,研究者们还需探索新的材料、结构和机制去增强超材料的非线性转换效率,因此聚焦于提高超材料非线性转换效率的研究将持续受到关注。

## 2 人工智能与超材料

随着计算机技术的快速发展,人工智能技术已逐渐延伸到各个领域。光学超材料由于具备对光场独有的调控能力和高设计自由度,因此和人工智能结合具有广泛的研究和应用前景。目前的主要发展趋势集中在2个方面,一是人工智能计算辅助设计超材料结构,可以有效提高超材料设计效率和准确度;其二是利用超材料对光的调控能力实现模拟光计算,在处理大量数据时可以极大地降低能耗和减少运算时间。

由于超材料的性能主要取决于其结构特征,而很少依赖材料的具体性质,因此在其整体设计中,结构设计是最重要的环节。目前,研究者通用的方法是基于基本的物理动力学方程,从理论上推导或者采用商用数值仿真软件进行数值求解。前者只能限于简单结构,对于稍微复杂的结构,理论推导的方法将会变得极其复杂甚至无法实现;而后者在求解复杂的模型时也需要耗费大的计算资源和时间。可以看出,常规方法不光耗时,还可能错过最佳的超材料结构参数。在近几年,逐渐有研究人员尝试将深度学习网络引入到超材料的结构设计中,利用目前发展迅速的人工智能计算技术,可以为超材料结构设计带来诸多便利。

最近,东京大学的 Tamura 等<sup>[12]</sup>利用量子退火和因子分解算法规避了传统优化算法的穷举搜索问题,采用组合优化方式,以辐射制冷的品质因素为优化目标作为研究例子,理论上实现了品质因素为 0.724 的辐射制冷超材料,远大于此前报道的结构,图 3 展示了由正向设计路径和反向设计路径组成的双向多任务深度学习模型用于手性超材料设计<sup>[12]</sup>。电子科技大学的 Wang 等<sup>[13]</sup>借助于深度学习平台搭建了多任务等离子激元超材料设计模型,以较高的精度实现了三维手性超材料和其圆二色光谱之间的联系,可以快速实现正向预测光谱和反向反演结构参数,避免了复杂的理论求解过程,为生物传感领域、光电传感领域快速设计器件提供了一套便捷、高效的工具和方法(图 3)。在问题导向的超材料设计方面,美国空军实验室的 Mills 等<sup>[14]</sup>利用神经网络设计了一种全介质超表面,在中心波长为 1550 nm,带宽为 450 nm 范围内实现了大于 99% 的宽谱反射器件,很好地实现了预期性能指标。Sheverdin 等<sup>[15]</sup>基于全连接神经网络,规避了连续的迭代求解,建立了多层包裹颗粒的尺寸和散射谱之间的联系,同样可以根据目标散射谱直接确定所需的结构参数。对于这一类多层叠加的复杂结构,神经网络极大地降低了计算时间。

除了辅助单个结构的固定尺寸设计,人工智能还可以实现超材料的动态参数调节。浙江大学的 Chen 等<sup>[16]</sup>提出将深度学习作为动态算法嵌入到超

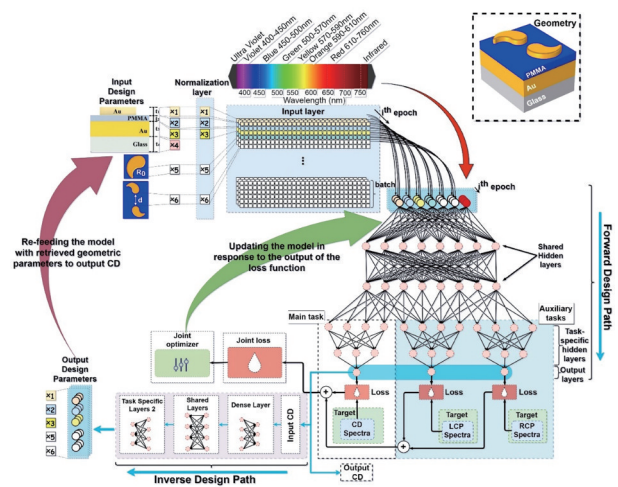
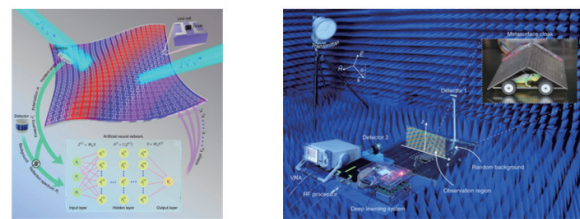


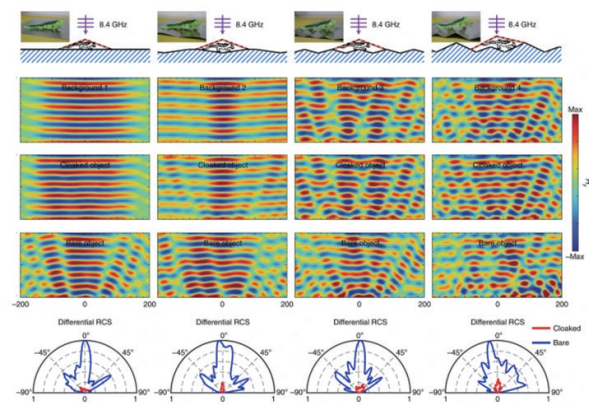
图 3 由正向设计路径和反向设计路径组成的双向多任务深度学习模型用于手性超材料设计

表面结构中,使得超表面对于外界入射光的角度变化自动调节自身参数,实现动态自适应隐身(图 4)。



(a) 自适应隐身斗篷示意图

(b) 实验装置



(c) 对不同背景噪声自动调控的实验结果

图 4 将深度学习作为动态算法嵌入到超表面结构中示意

针对高速发展的人工智能与超材料结合趋势,浙江大学和美国东北大学的研究人员<sup>[17]</sup>综述了深度学习算法用于光子结构设计(图 5),阐述了深度学习用于建立超材料、光子晶体等光子结构和波

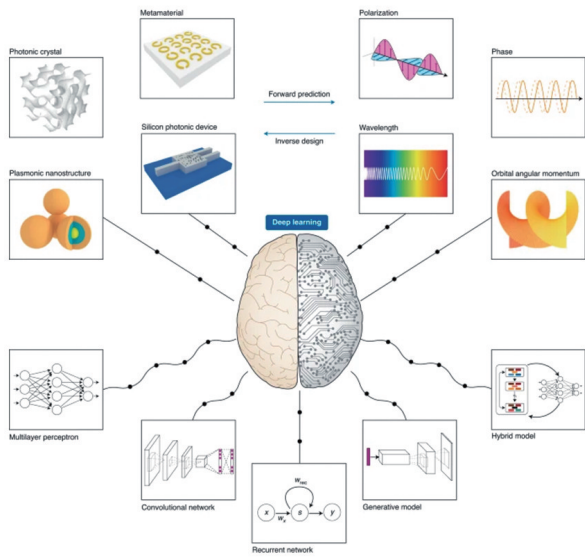


图5 深度学习用于光子结构设计框图

长、相位、轨道角动量等响应之间的联系的优势性,并明确指出,作为一种新的工具和方式,深度学习可以高效地辅助超材料设计。

在另一方面,超材料独特的光学物理场调控能力,使得其可以作为一种光计算器件,克服电子计算功耗大和运算速度限制的问题。范德比尔特大学 Zhou 等<sup>[18]</sup>利用超表面对光场幅值和相位的调控能力,构建了一种超薄超表面(图6),可以对照射到上面的光学图像进行二阶微分运算,即边缘提取。由

于这样的器件是无源的,且以光作为计算媒介,因此在功耗和处理速度上远远优于电子计算机。同时,他们将该微分器件与超透镜相结合,实现了一种超薄的微分成像镜头。杜克大学的 Smith 等<sup>[19]</sup>将超表面和神经网络集成,利用超表面对电磁波的滤波作用,提高了对物体特征参数的提取效率,加快图像识别训练过程和提高识别准确率。瑞士的 Farzad 和美国的 Andrea 等<sup>[20]</sup>综述了计算超材料的发展,阐述了光子晶体、光栅、以及各种谐振结构在光学模拟计算的研究进展,并且可以将超材料和人工智能结合在图像识别、模式检测或者成像方面有所应用。

超材料由于结构设计的高自由度,使得研究人员可以借助于现有各种智能算法来辅助超材料结构的设计,不仅在计算速度上有优势,同时还能发现一些研究人员未曾发现的结构。而且,由于超材料对物理场特有的调控能力,使得其在信息处理领域也有较大研究价值。目前在超材料实现光学模拟计算中,主要采用的是线性光学计算,因此处理任务受到限制,对于神经网络中非线性激活函数的光学模拟实现目前研究较少。因此,发展非线性超材料可以实现更为复杂的智能算法,实现更多场景下的光学计算,如复杂图像识别、光子计算机等。

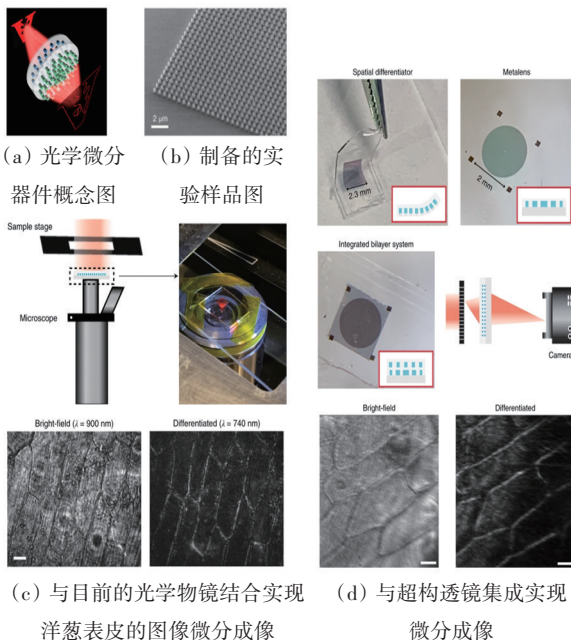


图6 超薄超表面示意

### 3 光学超表面

超表面作为一种二维的超材料,可以在很薄的一层亚波长结构上实现对入射光的调控。相比三维的体超材料,光学超表面在加工上具有很大的优势,可以通过电子束曝光、聚焦离子束刻蚀、激光直写、自组装、纳米压印等技术制备得到;同时由于其具有超轻、超薄的特点,易于集成在微型化设备中,减轻设备的重量和体积。超表面由于其优异的相位、振幅和偏振控制能力,可用于实现波前操控(光束偏折、聚焦、全息)以及偏振转换等应用,而通过相位的交错排列或者偏振多路复用的方法,可以实现集多种功能于一体的多功能超表面。本节将回顾2020年光学超表面方面一些重要成果和进展。

由于光子具有高速、长相干时间、可控性好以及信息容量高等优点,量子计算系统是下一代计算机的理想系统,有望替代现有的电子计算机,实现计算速度的显著提升。同时,利用纠缠光子可以实现严格证明无条件安全的量子通讯,有望应用于加密通讯领域。将超表面与量子光学领域结合起来,有望解决量子光学领域目前遇到的难题,推动量子光学研究的进一步发展。南京大学祝世宁团队和台湾大学蔡定平合作,通过将超透镜阵列和非线性晶体结合,可以在 $10 \times 10$ 的阵列上实现100个路径下的自发参量下转换双光子源<sup>[21]</sup>(图7),有望应用于高维量子纠缠以及双光子态的产生。通过在超透镜上编码不同的相位,可以实现二维、三维和四维的双光子路径纠缠,且具有较高的保真度(分别为98.4%、96.6%和95.0%)。此外,还观察到了4光子和6光子的产生,由不同超透镜产生的光子具有高不可分辨性。这种基于超透镜阵列的高维多光子量子源具有紧凑、稳定以及可控性好等优势,为集成量子设备提供了一个新的平台。

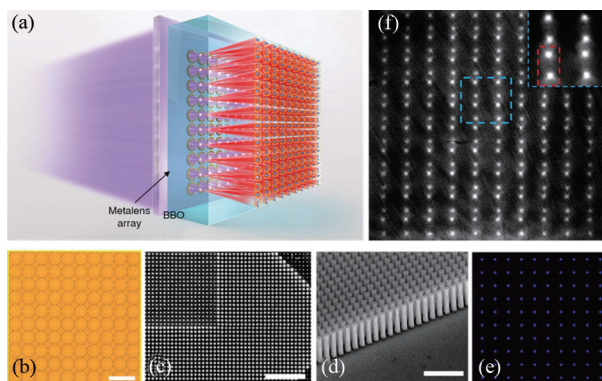
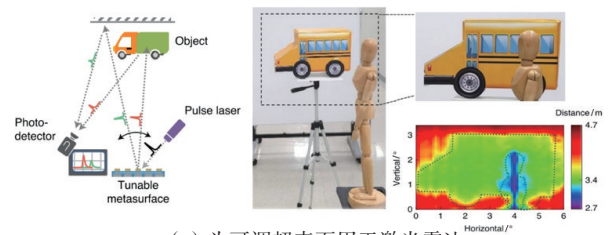


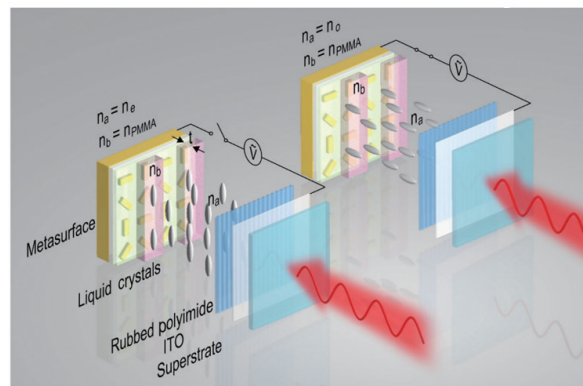
图7 基于超透镜阵列的高维多光子量子源

主动控制器件和设备在现代光学系统中具有重要的作用,通过引入外场调控,可以对超表面每个组成单元响应进行独立调控,从而实现超表面性能的主动控制。通常,可以利用热场、电场、磁场、光泵浦或力场等外场的引入进行调控,从而大大地扩宽单一超表面的应用范围,实现对入射光的有效控制。因此,主动控制型超表面作为研究热点一直为人们所关注。Park等<sup>[22]</sup>设计了一种全固态、电可调的反射型超表面(图8(a)),可以产生特定的相位、以5.4 MHz的速度进行 $0 \sim 360^\circ$ 的相位连续

扫描,同时实现独立的振幅调制,利用这种超表面可以实现对虚拟街景和人物的激光探测和测量。Liu等<sup>[23]</sup>使用多步电子束曝光的方法制备得到一种电可寻址的数字超表面器件(图8(b)),通过程序控制每个单元的0、1编码,可以实现对光强与相位的操控,实现任意全息图像之间的切换。这种方法具有高强度对比度,快响应速率(毫秒量级)以及极好的可重复性,有望应用于商业化的光投影设备等。



(a) 为可调超表面用于激光雷达



(b) 为电调控可寻址的数字超表面器件

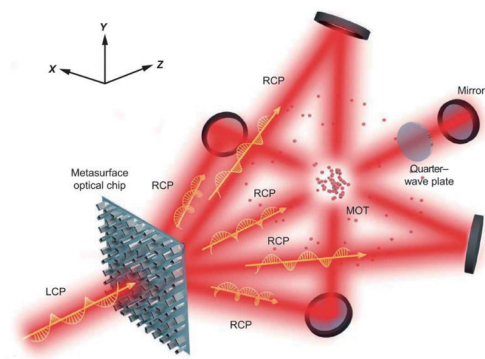
图8 主动控制型超表面及以此制备的器件

传统超表面的功能往往只有一种,通过相位的交错排列或是偏振多路复用的方法,可以实现多通道多功能的超表面,大大扩宽传统超表面的应用范围。相位交错排列的方式通过在每个周期性单元中引入多个纳米介质柱结构,单元的每个纳米介质柱分配一种独立的相位分布函数,这样就能实现集多种功能于一身的多路复用超表面。哈尔滨工业大学金鹏课题组<sup>[24]</sup>通过相位交错排列的方式,实现了四焦点四偏振的并行照明,通过光学系统的整合,可以精确地测定具有不同取向角铝光栅的透射光偏振角,有望应用于材料研究和生物医药等领域。偏振多路复用技术主要利用各向异性纳米介质柱在2个主轴方向上相位响应的差异,通过将不

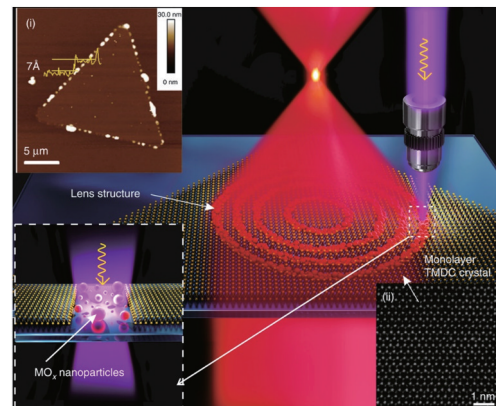
同偏振下的相位编码在超表面上,可以实现不同偏振入射下的差异化响应。湖南大学段辉高等<sup>[25]</sup>利用偏振多路复用技术,通过设计RGB三原色入射光分布在3个独立可调节强度的全息通道实现了无串扰的彩色矢量全息显示。Ren等<sup>[26]</sup>设计了一种动量空间的复振幅超表面,通过利用具有不同轨道角动量的光做傅里叶变换来提取信息,实现对入射光完全和独立的振幅和相位调控,这种方法可以实现200个独立轨道角动量通道的多路复用,实现全息视频的无透镜重构显示。

材料学的发展离不开新材料、新工艺的发展,而超表面的发展也离不开新材料体系的研究以及新的加工工艺的研究。同时,扩展现有超表面的应用范围,将超表面应用于其它新型领域中,也是超表面研究的热点。哈尔滨工业大学肖淑敏课题组<sup>[27]</sup>制备得到了一种高质量的钙钛矿垂直腔面发射激光器,可以产生不同拓扑荷下(拓扑荷 $q=-4\sim$

4)的高质量( $3^\circ$ 发散角)涡旋激光,有望将钙钛矿微型激光器应用于混合集成光子网络以及光学计算等领域。Lien等<sup>[28]</sup>利用超表面器件代替传统的光学元件,通过控制分裂波束的偏振状态,实现了原子的冷却(图9(a))。这种方式可以实现约 $10^7$ 个原子数及约 $35\ \mu\text{K}$ 温度的冷却,在量子传感、量子计算等领域中具有潜在的应用价值。华中科技大学张诚等<sup>[29]</sup>利用氧化铪制备得到了工作在深紫外光波段的超构表面,并实现了聚焦、自加速光速产生以及全息显示等功能,在光刻、成像、光谱学以及量子信息处理等方面具有重要的应用价值。Jia等<sup>[30]</sup>利用飞秒激光直写加工技术在单层二维材料上刻蚀得到局部散射介质(图9(b)),克服了单层二维材料对相位和振幅调控不充分的缺陷,利用波带片的原理实现了对可见光的高效亚波长分辨率以及衍射极限成像,该研究为基于二维材料的光学器件的研究奠定了基础。



(a) 为原子冷却超表面示意



(b) 为单层二维材料超表面透镜

图9 新型超表面

## 4 结论

当代的科技进步对材料性能的要求越发趋于极端与苛刻,自然材料的诸多瓶颈使得其越来越难以维持科技发展的步伐。超材料因其具有的独特物理性质与灵活的设计思想而在现代材料学领域崭露头角,极大地拓展了材料学的研究视野,为弥补常规材料性能短板提供了新思路。中国对超材

料的发展非常重视,已经提升到了战略高度。本文回顾了非线性光学超材料、人工智能超材料与光学超表面等光学超材料热点方向在2020年的主要进展。可以看出,2020年的光学超材料领域,从其自身概念的进一步拓展,到研究方法、研究思路的提升,以及向实际应用的逐渐推进,都有着非常丰硕的研究成果,有望对信息、量子、生物、医疗、通信等关键核心领域带来重要影响。

## 参考文献(References)

- [1] Klein M W, Enkrich C, Wegener M, et al. Second-harmonic generation from magnetic metamaterials[J]. *Science*, 2006, 313(5786): 502-504.
- [2] Wen Y, Zhou J. Artificial nonlinearity generated from electromagnetic coupling metamolecule[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(16): 167401.
- [3] Hentschel M, Utikal T, Giessen H, et al. Quantitative modeling of the third harmonic emission spectrum of plasmonic nanoantennas [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3778-3782.
- [4] Almeida E, Shalem G, Prior Y. Subwavelength nonlinear phase control and anomalous phase matching in plasmonic metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-7.
- [5] Almeida E, Bitton O, Prior Y. Nonlinear metamaterials for holography[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-7.
- [6] Koshelev K, Kruk S, Melik-Gaykazyan E, et al. Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics[J]. *Science*, 2020, 367(6475): 288-292.
- [7] Jiang B, Hao Z, Ji Y, et al. High-efficiency second-order nonlinear processes in an optical microfiber assisted by few-layer GaSe[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, doi: 10.1038/s41377-020-0304-1
- [8] Lu X, Moille G, Rao A, et al. Efficient photoinduced second-harmonic generation in silicon nitride photonics[J]. *Nature Photonics*, 2020, doi: 10.1038/s41566-020-00708-4.
- [9] Huang C, Zhang C, Xiao S, et al. Ultrafast control of vortex microlasers[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018-1021.
- [10] Zhang T, Che Y, Chen K, et al. Anapole mediated giant photothermal nonlinearity in nanostructured silicon[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3027.
- [11] Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 365-369.
- [12] Kital K, Guo J, Ju S, et al. Designing metamaterials with quantum annealing and factorization machines[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(1): 013319.
- [13] Ashalley E, Acheampong K, Besteiro L V, et al. Multi-task deep-learning-based design of chiral plasmonic metamaterials[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1213-1225.
- [14] Harper E S, Coyle E J, Vernon J P, et al. Inverse design of broadband highly reflective metasurfaces using neural networks[J]. *Physical Review B*, 2020, 101(19): 195104.
- [15] Sheverdin A, Monticone F, Valagiannopoulos C. Photonic inverse design with neural networks: The case of invisibility in the visible[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(2): 024054.
- [16] Qian C, Zheng B, Shen Y, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 383-390.
- [17] Ma W, Liu Z, Kudyshev Z A, et al. Deep learning for the design of photonic structures[J]. *Nature Photonics*, 2020, 1-14.
- [18] Zhou Y, Zheng H, Kravchenko I I, et al. Flat optics for image differentiation[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(5): 316-323.
- [19] Del Hougne P, Imani M F, Diebold A V, et al. Learned integrated sensing pipeline: Reconfigurable metasurface transceivers as trainable physical layer in an artificial neural network[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(3): 1901913.
- [20] Zangeneh-Nejad F, Sounas D L, ALù A, et al. Analogue computing with metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 10: 1-19.
- [21] Li L, Liu Z, Ren X, et al. Metalens-array - based high-dimensional and multiphoton quantum source[J]. *Science*, 2020, 368(6498): 1487-1490.
- [22] Park J, Jeong B G, Kim S I, et al. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 1-8.
- [23] Li J, Yu P, Zhang S, et al. Electrically-controlled digital metasurface device for light projection displays[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3574.
- [24] Chen C, Wang Y, Jiang M, et al. Parallel polarization illumination with a multifocal axicon metalens for improved polarization imaging[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 5428-5434.
- [25] Hu Y, Li L, Wang Y, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Letters*, 2019, 20(2): 994-1002.
- [26] Ren H, Fang X, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [27] Sun W, Liu Y, Qu G, et al. Lead halide perovskite vortex microlasers[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-7.
- [28] Zhu L, Liu X, Sain B, et al. A dielectric metasurface op-

- tical chip for the generation of cold atoms[J]. Science Advances, 2020, 6(31): eabb6667.
- [29] Zhang C, Divitt S, Fan Q, et al. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1–10.
- [30] Lin H, Xu Z Q, Cao G, et al. Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 1–11.

## Memorable sounds in the optical metamaterial in 2020

SUN Jingbo, WEN Yongzheng, WANG Chen, ZHAO Shiqiang, WANG Feilou, ZHOU Ji\*

School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** As a new concept originated in early 21st century, metamaterials have since attracted extensive attention of both scientific research and industry. Different from traditional materials, the properties of the metamaterials are created by artificial structures instead of intrinsic compositions of the materials, thus they exhibit many extrordinary properties beyond nature. Optical materials is one of the most important parts in this field, playing a significant role in information technology. In 2020, there were a lot of excellent research works in the optical metamaterials field. Here, we give a comprehensive review based on the works in nonlinear optical metamaterials, artificial intelligence metamaterials, and optical metasurface.

**Keywords** optical metamaterial; nonlinear optical metamaterial; artificial intelligence metamaterial; optical metasurface ●



(责任编辑 祝叶华)