

光学学报

超构表面赋能的导波辐射光场调控(特邀)

王志章¹, 方彬², 计吉焱¹, 祝世宁¹, 李涛^{1*}¹南京大学现代工程与应用科学学院, 固体微结构物理全国重点实验室, 江苏 南京 210093;²中国计量大学光学与电子科技学院, 全省光电计量及精密仪器重点实验室, 浙江 杭州 310018

摘要 聚焦于超构表面在导波辐射调控方面的研究进展, 系统地探讨了将片上导波高效辐射至自由空间并进行精细操控的机制与应用。首先阐述了导波辐射调控的基本原理, 随后深入分析了超构表面在导波辐射光场多维和动态调控方面的作用与能力。最后, 对该领域面临的挑战和新兴方向进行了展望, 旨在为片上超构表面在光子集成、信息处理、AR 显示和传感等领域的未来发展提供全面的视角与指导。

关键词 微纳光学; 超构表面; 集成光学; 多维光场; 动态调控

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS251985

1 引言

随着信息时代的飞速发展, 光子技术正日益成为驱动未来科技进步的核心力量。在追求更高性能、更小尺寸和更低能耗的背景下, 光子集成芯片(PICs)应运而生, 旨在将复杂的光学功能集成到微米甚至纳米尺度的芯片上。PICs通过在单一芯片上集成激光器、调制器、探测器和波导等元件, 极大地提升了光信号的处理能力和传输效率, 为数据通信、传感、计算等领域带来了革命性的突破^[1-3]。然而, 传统集成光子器件在实现片上导波模式与自由空间光场之间的高效耦合与灵活调控方面仍面临挑战。例如, 如何高效地将片上导波转换为自由空间光, 并对其进行精确的波前整形, 是实现片上全息显示、光束扫描等功能的关键。此外, 传统光学元件通常体积庞大, 难以与微型化的光子芯片兼容, 这限制了集成系统的整体性能和应用范围。在此背景下, 超构表面(Metasurfaces)作为一种具有亚波长结构单元阵列的人工微纳结构, 以其对光场振幅、相位、偏振等属性的超强操控能力, 为解决这些问题提供了新型的解决方案^[4-5]。超构表面通过对入射光的局部电磁响应进行精确设计, 能够实现传统光学元件难以企及的复杂功能, 催生出诸多的新型超构光学器件, 如超构透镜^[6-8]、全息成像^[9-10]、偏振转换和探测^[11-14], 以及光谱分析^[15-16]等。随着微纳制备工艺的不断成熟, 超构表面逐渐在增强现实(AR)/虚拟现实(VR)^[17-18]、光通信^[19-20]、生物传感^[21]和量子光学^[22-23]等

领域展现出巨大的应用潜力。

近年来, 研究人员将光学超构表面集成于光子芯片的波导和微环/腔中, 利用超构表面独特的电磁响应特性, 能够在亚波长尺度内精准操控波导光信号, 进一步优化器件性能、缩小尺寸并拓展其功能范围^[24-28]。经过特殊设计的片上超构表面, 可以实现对导波模式的波长解复用、偏振态的灵活操控, 以及多维度信息编码, 极大地拓展集成光子芯片的应用边界, 使其在模式转换器^[29-32]、波前整形^[33-34]、片上神经网络^[35-39]以及 AR/VR 显示^[40-43]等前沿领域展现出巨大的应用潜力。尤其在 AR 波导应用中, 结合逆向设计和人工智能算法的超构表面耦合器, 可以在 AR 波导视场角范围内实现消色差功能, 展现出优异的色彩准确性与均匀性, 并同时体现出超紧凑的优势, 极大地提升了器件集成度^[44-45]。在片上辐射光场调控中, 相比光栅等传统光学器件而言, 片上超构表面不仅完成了导波模式和自由空间光场模式之间的转换, 还实现了对辐射光场的振幅、相位和偏振等多个维度的全方位、多功能调控。同时, 超构表面对于集成光子芯片的赋能不仅体现在器件集成度的提高, 更在于器件功能上的开发拓展, 使得芯片能够具有传统方法难以实现的复杂光学功能^[46-49]。在此基础上, 通过引入电学、热学或光学生物材料等外部激励, 实现对辐射光场的实时、可重构操控, 极大地拓宽了其在可重构光子器件和自适应光学系统中的应用前景^[50-51]。片上超构表面将自由空间光学与集成光子学有机结合, 有望克服传统光子集成器

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2025-12-12; 录用日期: 2025-12-19; 网络首发日期: 2025-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1404301)、国家自然科学基金(62288101, 62325504, 92250304, 12204446)、江苏省重点研发计划(SBE2023030415)、江苏省青年基金(BK20251223)、南京大学登峰人才计划

通信作者: *taoli@nju.edu.cn

件在光束操纵、光场整形和多功能集成方面的局限性，为下一代高性能光子芯片的发展开辟新途径。

本综述旨在深入探讨超构表面在辐射光场调控方面的最新进展及其在集成光子芯片中的关键作用。本文详细阐述了导波辐射调控的基本原理和机制，以及片上超构表面在单、多端口输入条件下对辐射光场的调控能力，并展示其如何对光场多个维度进行精确操控。同时聚焦于超构表面导波辐射光场的动态调控技术，探讨通过外部激励实现实时、可重构光场操控的方法以及其在动态光束调控器件中的应用。最后，本综述将对该领域面临的挑战和未来的发展方向进行展望，以期为推动超构表面技术在未来集成光子学领域的创新与应用提供全面的视角和启发。

2 超构表面赋能的导波辐射调控机制

利用超构表面对导波辐射光场进行调控时，主要有两种设计思路。第一种思路是将超构表面直接集成在波导表面，超构表面具有将导波耦合辐射至自由空间，并同时对其波前进行调控的功能。如图 1(a) 所示，导波在波导中传输时，与超构表面单元发生相互作用。在导波的激励下，超构表面单元辐射出光波的相位可以表示成两部分之和(假设导波沿 x 方向传播)：1) 导波本身在面内沿传播方向积累的行进相位 βx ，其中 $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为导波模式的传播常数， n_{eff} 为导波模式的有效折射率， λ 为自由空间中光的波长；2) 超构表面单元在位置 x 处引入的突变相位 $\phi_{\text{meta}}(x)$ 。导波经超

构表面作用后辐射出的光波沿 x 方向的总相位分布可表示为 $\phi(x) = \beta x + \phi_{\text{meta}}(x)$ 。选定一个初始位置作为参考点，并且沿着 x 方向以周期 P 划分成均匀的空间进行超构表面排布，则辐射波沿 x 方向的相位分布可以重新表示为

$$\phi(x) = \phi_0 + \beta(n-1)P + \beta d_n + \phi_{\text{meta}} \quad (1)$$

式中： ϕ_0 为导波初始参考相位； $P = 2\pi/\beta$ 为超构表面结构的周期； βd_n 为第 n 个超构表面在一个周期内的位移引入的迂回相位。从式(1)可以发现，对超构表面辐射光的相位进行灵活操控，主要可以采用两种策略：一种是对超构表面的空间位移也就是迂回相位进行调制，另一种则是对超构表面本身的几何尺寸、转角等自由度引入的突变相位进行调制，包括共振相位、几何相位以及多种机制联合调控等。同时，不同尺寸的超构表面结构单元与导波光场的耦合强度不同，因此也可以通过改变超构表面单元的几何尺寸来调控辐射光的振幅。

除了将超构表面直接集成在波导表面外，还有一种思路则是借鉴自由空间中超构表面对入射光场的调控，首先在波导表面借助光栅耦合器等集成光学中常用的耦合器件，将导波光辐射至波导上方，然后集成超构表面器件，对辐射出的导波光进行波前调控，如图 1(b) 所示。在这类设计中，超构表面仅起到操控光波前的作用，其调控原理与自由空间基本一致，同样包括共振相位、几何相位、迂回相位以及多种机制联合调控等。

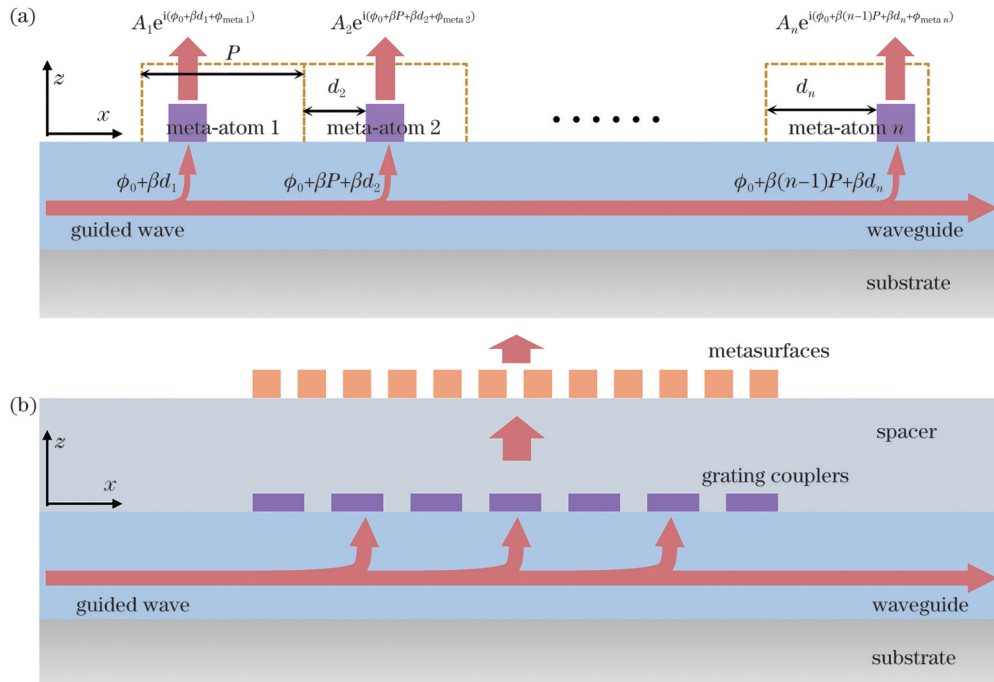


图 1 超构表面调控导波辐射原理。(a)波导与超构表面直接集成型；(b)波导与超构表面空间级联型

Fig. 1 Fundamental principles of metasurface-empowered guided wave radiation manipulation. (a) Direct integration of waveguides and metasurfaces; (b) spatially cascaded waveguide-metasurface architecture

几何相位(Pancharatnam-Berry 相位)调控的原理是通过旋转超构表面单元的中心取向角,将圆偏振态入射光转换为相反圆偏振态的出射光,同时提供 2 倍转角的附加相位^[52]。共振相位调控则是通过调节超构表面结构单元的几何尺寸,使其内部局域共振模式发生变化,从而实现 2π 相位覆盖^[53-54]。特别值得关注的是,与自由空间中的光场调控相比,迂回相位在实现片上辐射光场的调控方面发挥了尤为关键的作用。迂回相位调控主要通过超构表面结构在一个元胞周期内的横向(或纵向)位移 Δd 引入额外的相位延迟 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta d/p$,其中 p 是超构表面沿 x 或 y 方向的周期^[55-56]。在平板波导上表面可以设计周期排布且形状尺寸相同的超构表面单元阵列,每个纳米单元作为一个超构表面相位调控单元,通过空间位移来引入一个局部的相位 βdx ,其大小直接取决于该纳米单元相对于晶格元胞中心的偏移量 dx (或 dy)。结合优化算法,通过比对多幅目标全息图的相位分布,寻找相位值相近的像素点,并在这些位置放置“共用”的纳米结构来同时近似满足多种相位需求。通过精确设计每个超构表面单元的位置,在不需要复杂纳米结构形状的前提下,为 $\pm x$ 、 $\pm y$ 4 个方向的入射导波赋予各自所需的相位轮廓,从而实现多功能的波前调控。迂回相位调控与超构表面单元自身的共振模式或材料色散无关,仅通过位置偏移即可实现 $0\sim 2\pi$ 的相位覆盖,且适用于正交方向的独立调控,各通道之间串扰低,为独立调控多个光学参量(如振幅、偏振与相位)提供了额外的设计自由度。

尽管基于单一相位机制能够对辐射波前实现调控,但其难以同时满足复杂多维光场调控对带宽、效率与多功能性的需求^[57-62]。因此,通常需要采用多种机制联合调控的形式,例如将迂回相位与共振相位结合^[58]、几何相位与迂回相位结合^[60]等,来增加光场调控的自由度,以丰富器件的功能并提升器件的性能。此外,除了周期性、有序的超构表面外,实际上一些非周期性、无序的复杂亚波长结构也可以视为广义的超构表面用于调控导波辐射,例如全息光栅^[63-64]、逆向设计超构表面^[65]等。逆向设计超构表面与传统从“结构”到“模拟”再到“性能”的设计思路截然相反,而是从功能需求出发,让算法自动寻找最优的结构实现方式,同时能够优化多个性能指标。而且逆向设计能突破直接限制,探索非周期、非直观的复杂结构,从而找到性能远超传统设计的“超构原子”,完全跳出传统超构表面周期性结构的框架,极大地拓展多维光场调控的设计空间。因此,此类广义的超构表面也为片上导波辐射提供了新的解决方案。

3 超构表面赋能的多维光场调控

作为一种新型光子器件,将超构表面集成于片上,

不仅能将导波高效辐射至自由空间,还能在此过程中对光场的多个关键维度进行精细调控。除了将不同调控机理结合外,为了拓展器件更多的功能,可以利用更多维度实现更丰富的导波辐射复用功能,如入射端口的选择(单端口的输入,多端口的输入)、辐射光场属性(偏振态、衍射距离、衍射级次等)、导波照明条件(波长、模式、入射方向等)。这些多维度操控能力不仅极大地拓展了片上光子器件的功能边界,也为实现高集成度、多功能的光子系统提供了基础。

3.1 单端口输入的辐射光场多维调控

超构表面具有卓越的导波辐射光场多维调控能力,能够对导波辐射光场的振幅、相位、偏振等属性进行独立或联合调控,极大地提升信息容量和功能集成度。一般来说,波导中的本征模式可以自动分解为左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP),进而可以采用设计简单、宽带且具有鲁棒特性的几何相位型超构表面对光束的偏振特性进行调控。如图 2(a)所示,2022 年 Fang 等^[66]基于薄膜铌酸锂(LNOI)波导,设计了几何相位型超构表面,通过精确调控单元的旋转角,实现了对导波辐射场特定圆偏振态的精准调控。并且通过级联多个功能各异的片上超构表面,实现了独立调控且多通道复用的波前输出。2023 年, Fang 等^[67]提出了一种自旋解耦的耦合器,该耦合器能够同时实现导波辐射、偏振复用及双通道波前操控的功能。几何相位超构表面具有内禀对称性,即对 LCP 和 RCP 的激励光展现出相反的相位响应,可以巧妙地将两种不同的相位编码到同一个超构表面天线结构中,实现自旋解耦/独立操控的功能,重建具有不同偏振的目标光场,完成双焦点和全息复用的功能,如图 2(b)所示。此外, Yi 等^[68]也将非厄米光子学与集成光子学相结合,提出了一种偏振复用的片上拓扑超构表面。如图 2(c)所示,通过调控“T”形超构表面单元结构的几何参数(如臂长和位移),在可见光波段创建并环绕异常点(EP)实现 2π 拓扑相位积累,进一步结合几何相位,同样实现了左右旋圆偏振光的完全解耦与独立调控,并演示了双通道的矢量全息与 AR 显示。除了对光场属性进行独立调控外,超构表面也可以对辐射光场的振幅、相位和偏振进行联合调控。2023 年, Huang 等^[69]提出了一种基于对称破缺光子晶体平板的漏波超构表面(LWMs),通过改变超构单元中 4 个纳米孔的结构扰动程度以及相对转角,能够将波导中的导波转化为自由空间辐射,并精确控制其振幅、相位和偏振态。图 2(d)展示了 LWMs 生成聚焦庞加莱球光束的能力,该光束在传输横截面上展现了庞加莱球上的所有偏振态,实现了对矢量光场的精确调控。LWMs 还可以通过在两个正交偏振态的振幅和相位中编码信息,进一步证明其在偏振和空间维度上的复用能力。

与此同时,也可以对工作波长、衍射距离等属性进行操控。Huang 等^[70]在 2025 年展示了基于片上超构

表面实现三维数据加密的立方体存储,利用导波驱动的迂回相位操控,并结合角谱法与梯度下降算法优化光场,实现了多达 160 个空间独立的全息通道,等效存储密度超过 200000 dpi,成功地将具有多个切片信息通道的三维全息图投影在了芯片上方空间,如图 2(e) 所示。此方法通过精确控制超构表面单元的几何参数和排列,实现了对出射光波波前在空间上的精确整形,在不同深度上形成清晰的全息图像,并且抑制了零级衍射,提升了全息重建保真度。此外,波长选择是光通信和显示中的关键技术,集成于片上的超构表面能够

将不同波长的光路至特定路径,根据入射光的波长实现差异化功能^[71-72]。2025 年, Rao 等^[72]提出了一种片上级联超构表面的可见光波长解复用和颜色路由技术。该研究通过水平级联具有不同结构尺寸的片上超构原子,实现了对导波不同波长分量的选择性提取,从而实现了波长解复用功能,如图 2(f) 所示。该方法通过优化非晶硅超构原子结构参数,实现了对基模导波波长的选择性提取,进而实现了颜色纳米打印和全息显示,结果展示了芯片级超构表面在彩色显示和 AR 中的应用潜力。

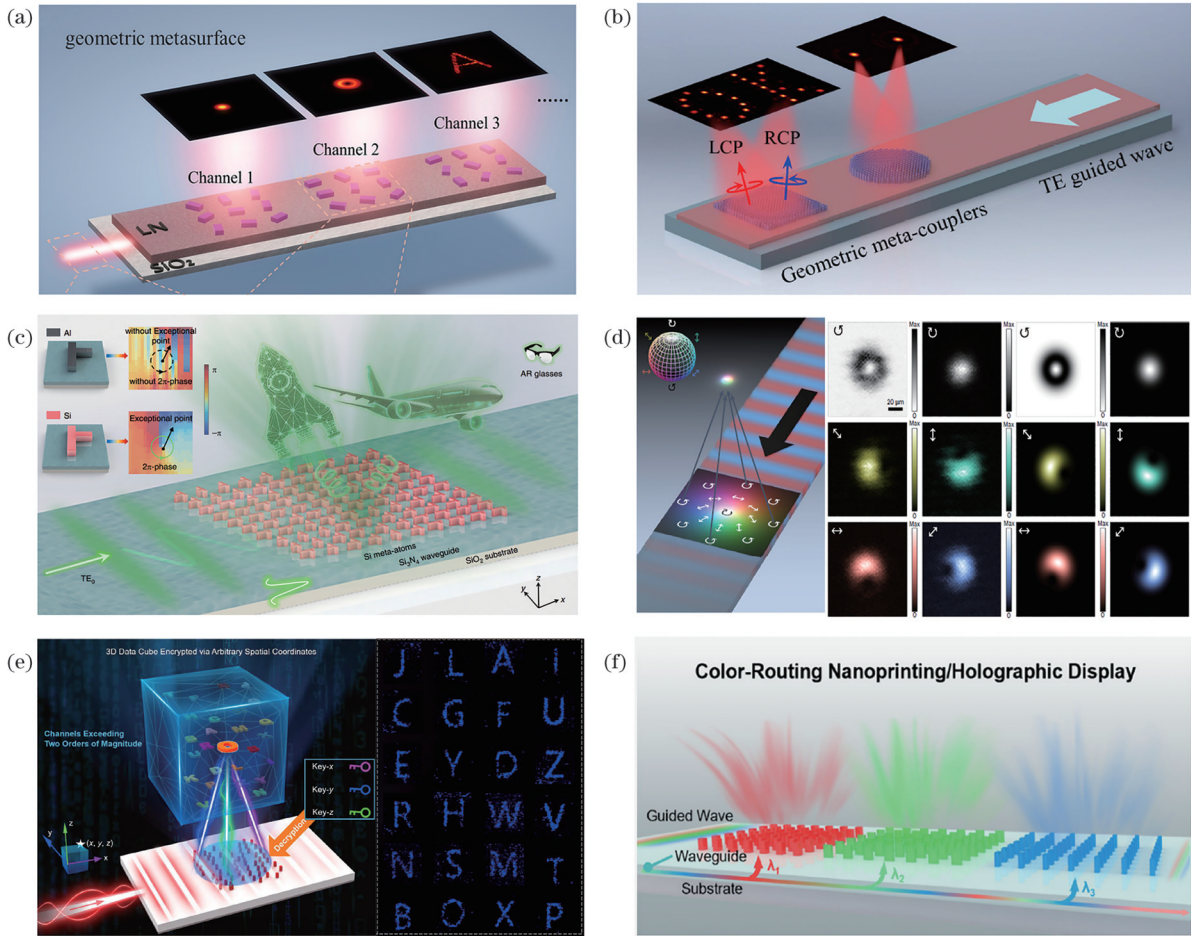


图 2 单端口输入的辐射光场多维调控。(a)级联复用^[66]; (b)(c)偏振复用^[67-68]; (d)振幅、相位和偏振联合复用^[69]; (e)空间复用^[70]; (f)级联和波长解复用联合调控^[72]

Fig. 2 Multidimensional manipulation of radiation light field with single-port input. (a) Cascaded multiplexing^[66]; (b)(c) polarization multiplexing^[67-68]; (d) joint multiplexing of amplitude, phase and polarization^[69]; (e) spatial multiplexing^[70]; (f) cascading and wavelength-demultiplexing joint manipulation^[72]

3.2 多端口输入的辐射光场多维调控

图 3 为多端口输入的辐射光场多维调控。在实现对光场辐射属性的调控后,进一步通过对输入端口的调控,增加复用通道。这为辐射光场提供了更多维度的调控自由度。这种多维度协同调控不仅能实现单一输入光场无法比拟的复杂功能,也为下一代集成光子器件的发展提供了解决思路。入射方向调控是指通过改变入射光的输入端口或入射方向来控制超构表面的

功能或输出光场。2022 年, Yang 等^[73]通过打破前向/后向导波传播的简并性,成功实现了四通道复用全息成像。当片上超构表面样品由不同方向($\pm x/\pm y$)的光波激发时,可以在菲涅耳区域分别获得不同的全息图像,如图 3(a) 所示。该方法利用导波入射方向(输入端口)的调控,为构建独立编码的全息通道提供了新途径,从而大幅提升了信息复用密度与存储容量。上述工作都是将入射方向限制在正交角,那么当在非正

入射的情况下,可以通过改变入射角度实现更多通道的复用^[74-76]。2024年,Liu等^[76]利用自旋复用和入射角度的复用,结合 k 空间平移的设计策略,通过将波导内全反射光携带的相位梯度与超构表面的相位调控叠加,将编码的多个目标图像在 k 空间的传播波区域和倏逝波区域自由切换,根据导波的自旋和方位角(即入射角度)选择性地投影6个独立的无串扰全息显示通道,如图3(b)和图3(d)所示。当全息图在特定自旋和方位角的导波照射下, k 空间平移策略允许每个目标图像被选择性地移动至传播波区域的中心,并投影到自由空间中,实现多个目标图像在传播波区域和倏逝波区域自由切换,这为实现多通道、多功能的超构全息提供了一种新思路。光的偏振属性可以带来更多的调控自由度,对于超构表面而言,其偏振响应特性可以由一个 2×2 的等效琼斯矩阵来描述,但其可独立调控的自由度通常被限制在6个及以下,远没有达到理论极限值。在自由空间中,实现琼斯矩阵全参数调制通常需要多层超构表面结构以打破面内对称性。2024年,

Ji等^[77]提出了一种基于超胞结构的片上超构表面,结合迂回相位和几何相位,在双端口导波照明条件下构建出非对称、非幺正的等效琼斯矩阵,实现了琼斯矩阵全参数调制的功能。如图3(e)所示,在沿 $+x$ 和 $+y$ 方向的导波照明下,近远场呈现具有偏振特性的8个(希腊和英文)字母,这充分展示了琼斯矩阵全参数调制功能,其打破了面内对称性,显著拓展了多通道复用能力。

在入射方向调控基础上,还可以增加诸如波长等自由度的调控。2024年,Liu等^[78]提出了一种基于片上超构表面的离轴复用全息技术。该研究通过端到端逆向设计框架,实现了波长、衍射距离和导波入射方向的联合复用。如图3(f)所示,该超构表面能够根据不同波长(红、绿、蓝三色)和不同重建距离(三个平面)生成RGB彩色全息图,并结合导波的4个人射方向($\pm x/\pm y$),最终实现了36个独立全息通道。这种方法通过优化超构原子位置,利用导波模式的色散特性和自由空间衍射的空间色散,在不完全解耦的波长通道中仍实现了高效复用,显著提升了片上全息显示的信

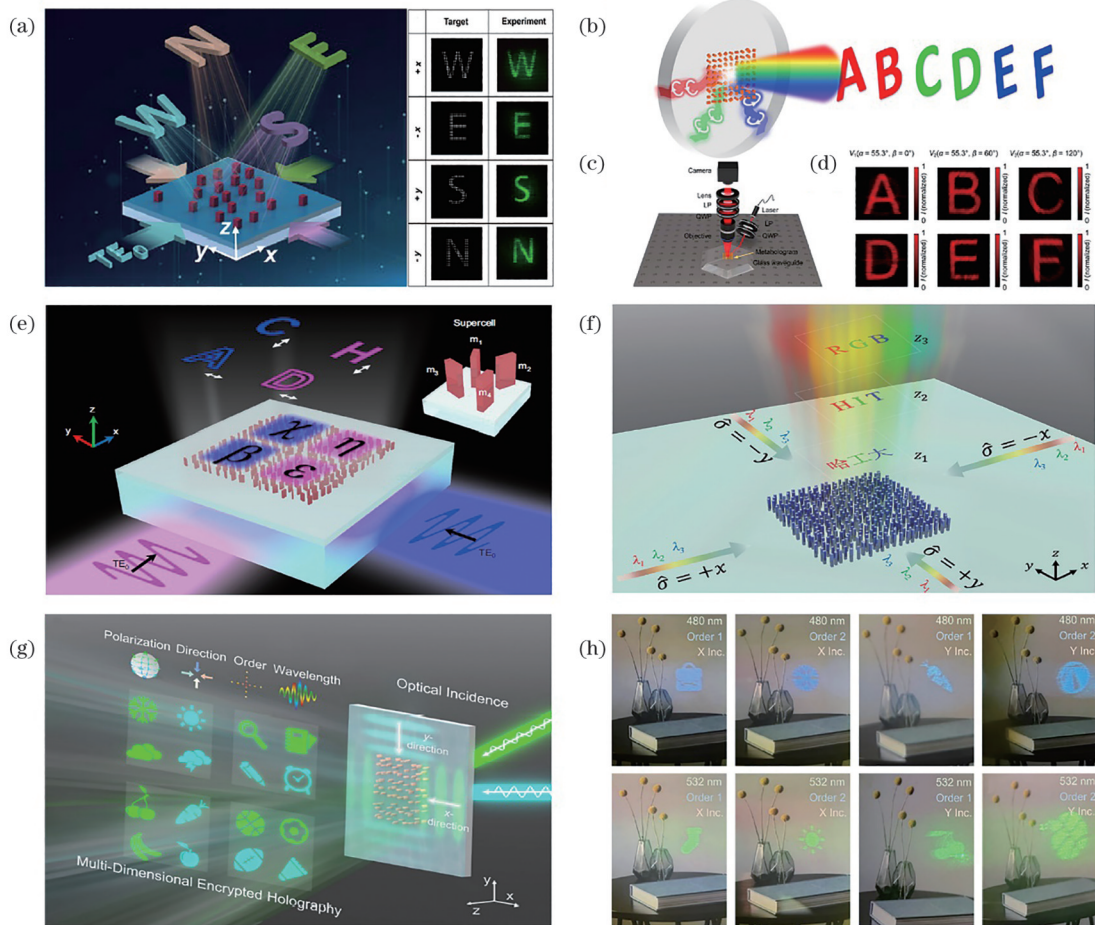


图3 多端口输入的辐射光场多维调控。(a)入射方向复用^[73]; (b)~(d)入射角度复用^[76]; (e)入射方向和偏振联合复用^[77]; (f)入射方向、衍射距离和波长联合复用^[78]; (g)入射方向、波长、衍射级次和偏振联合复用^[79]; (h)重建的八通道AR全息图像^[79]
 Fig. 3 Multi-dimensional multiplexed manipulation of radiation light fields with multiple-port input. (a) Incident direction multiplexing^[73]; (b)~(d) incident angle multiplexing^[76]; (e) joint multiplexing of incident direction and polarization^[77]; (f) joint multiplexing of incident direction, diffraction distance, and wavelength^[78]; (g) joint multiplexing of incident direction, wavelength, diffraction order, and polarization^[79]; (h) reconstructed eight-channel AR holographic images^[79]

息密度。在此基础上,Zhao等^[79]在2025年将衍射级次和偏振也加入调控,实现了更多维度加密的超构光学存储系统。该方法通过分析不同衍射级次相位之间的数学关系,优化迂回相位结构,使得能够对不同衍射级次进行独立编码。通过结合迂回相位和几何相位,以及精细的色散工程和级次解耦策略,超构表面能够同时操控波长、波矢方向、偏振和衍射级次4个光学复用维度,实现了16个独立通道的全息图,如图3(g)所示。图3(h)展示了实验得到的不同波长、衍射级次和偏振属性的八通道全息图像在真实环境中的图像,表明此方法在显著提升信息存储安全性的同时,为增强现实显示、光学加密与防伪等领域开辟了崭新的技术途径。

前述研究已经通过采用多端口输入的方式实现了多维复用的导波辐射光场调控。需要强调的是,此时多端口输入的光之间仍然是互不影响的,分别独立作用于超构表面,从而实现波长、传播方向、入射角度等复用功能。事实上,在波导体系中,还可以通过同时输入导波进行干涉合成的方式,来实现多维以及动态光场调控。如图4(a)所示,两个传播常数分别为 β_1 和 β_2 的TE导波模式,在平板波导中沿 $+x$ 方向和 $+y$ 方向正交传播。鉴于沿 y 方向传播的TE模式的主导电场分量为 E_x ,沿 x 方向传播的TE模式的主导电场分量为 E_y ,它们分别可以等效为 x 方向的线偏振(LP)光和 y 方向的线偏振光。因此,当两个导波模式同时传输并交会时,在波导内任意位置 (x,y) 处的总电场可以描述为两个模式的电场叠加:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i\beta_2 y} \\ A_y e^{i(\varphi_0 + \beta_1 x)} \end{bmatrix} = e^{i\beta_2 y} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y e^{i\Delta\varphi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: A_x 、 A_y 分别表示 $+x$ 方向和 $+y$ 方向导波的振幅;

φ_x 、 φ_y 分别表示 $+x$ 方向和 $+y$ 方向导波的相位; $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \varphi_0 + \beta_1 x - \beta_2 y$ 为两个模式传播过程中积累的相位差; φ_0 为两个模式的初始相位差。通过改变两个人射导波的振幅以及相位差,便可以在波导中构建出庞加莱球上的任意偏振态光。例如:当 $A_x = A_y$ 、 $\Delta\varphi = m\pi$ (m 为整数)时,可以通过合成得到线偏振光;当 $A_x = A_y$ 、 $\Delta\varphi = \pm\pi/2 + 2m\pi$ 时,可以通过合成得到左旋和右旋圆偏振光。因此将超构表面集成到波导表面时,超构表面便能将波导中具有特定偏振态的导波光辐射至空间并进行波前调控。需要特别强调的是,片上集成超构表面能够与调制器进行联合调控,利用调制器动态改变波导输入端的光场振幅及相位差,从而可实现动态波前调控。

2015年Li等^[80]提出了利用双端口同时输入产生多偏振态的方案,通过利用表面等离子激元(SPPs)平面场的干涉合成,结合精心设计的纳米孔阵列作为散射体,实现了对输入偏振态的重构和路由,如图4(b)所示。该工作的核心在于两个端口同时输入,其优势在于能够在一个紧凑的片上器件中同时生成并路由多种偏振态光束(如实验中展示的8种),极大地拓展了光场调控的维度和自由度。此外,2023年Ji等^[81]也利用双端口同时输入的方案生成了高阶庞加莱球光束(HOPBs),通过构建双端口的铌酸锂波导交叉结构,基于导模面内干涉合成任意面内偏振态,并通过调节导模之间的相对强度和相位差,演示了所生成的庞加莱球光束沿赤道和经线的状态演化过程,如图4(c)所示。这种方法通过改变入射端口的相对振幅和相位,可以实现对输出光场空间分布和偏振态的调控,为多功能集成光子器件提供更多设计自由度。

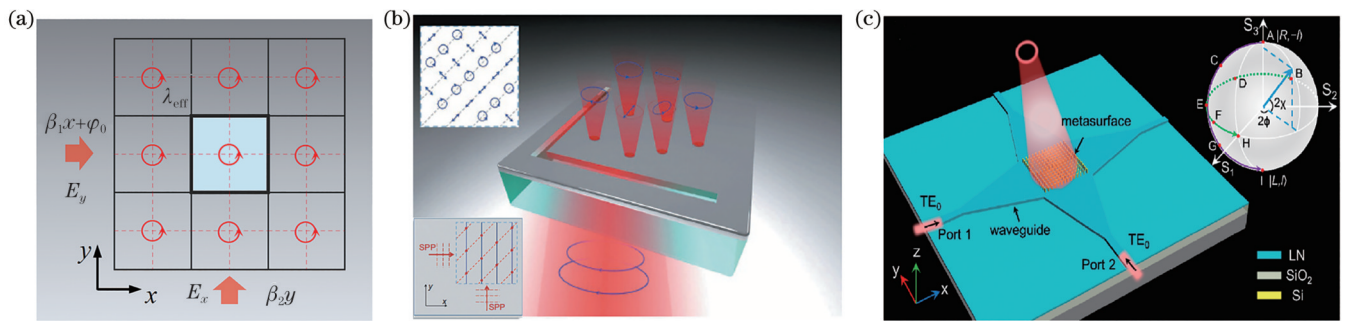


图4 双端口同时输入的辐射光场多维调控。(a)双端口同时输入的干涉合成原理示意图;(b)双端口同时输入的偏振态重构^[80];
(c)双端口同时输入产生高阶庞加莱球光束^[81]

Fig. 4 Multidimensional manipulation of radiation light fields via double ports. (a) Schematic diagram of interference synthesis via simultaneous input at double ports; (b) reconfiguration of polarization states via simultaneous input at double ports^[80];
(c) generation of higher-order Poincaré sphere beams via simultaneous input at double ports^[81]

4 超构表面赋能的动态光场调控

超构表面在片上静态光场调控方面取得了显著进展。然而,为了满足日益增长的实时、可重构光学应用需求,动态调控能力成为片上超构表面研究的关键前

沿。图5为基于超构表面的片上动态辐射光场调控。通过引入外部激励(如电、热、光、湿度等),能够实现对超构表面导波辐射光场的实时、动态操控,从而拓展其在动态显示、可重构光学系统、光通信等领域的应用潜力。2024年,Shi等^[82]提出并演示了一种电学驱动的

液晶集成的超构表面,用于动态矢量 AR 显示。该研究通过在片上设计双原子超构表面,实现了对辐射光波任意偏振和相位的同步调制,生成 9 个通道的全偏振矢量全息图。结合电学驱动的液晶调谐平台,超构表面能够实时动态切换在真实世界场景中浮动的全息图像,如图 5(a)所示。除液晶材料之外,其他外部刺激如湿度也可以用于实现片上超构表面的动态调控。Li 等^[83]展示了一种基于水凝胶波导的片上超构光学器件,用于动态多色全息显示。该研究利用水凝胶材料对湿度的响应特性(吸水膨胀/失水收缩),实现了对波导厚度的动态调节,进而改变局部纳米沟槽的折射率。通过简单的呼气过程,该水凝胶超构表面能够在 310 ms 内实现光学隐藏信息的开启/关闭以及双通道全息图像的动态切换,如图 5(b)所示。此外,利用水凝胶波导的色散特性以及提取效率与相对湿度之间的关联,该器件还能在特定湿度条件下加密并动态显示混色全息图像。这种基于水凝胶的片上平台具有良好的湿度响应性、高集成度、全彩潜力以及无零级衍射干扰等优点,在主动光学信息隐藏/加密、全彩全息和下一代可穿戴 AR 设备等方面有很大的应用潜力。

电学驱动是实现片上超构表面动态调控最直接且响应速度最快的方法之一。通过将超构表面与光电材料集成,可以实现对光场振幅、相位、偏振等参数的高

速调制。近些年来,LNOI以高速、低功耗和低损耗的动态调控能力,成为了实现动态全息、高速光通信和片上神经网络的重要光子平台之一^[84-85]。2024年,Zhong等^[86]展示了一种 GHz 速率可切换的波前整形技术,将超构表面集成在 LNOI 光子集成芯片上,通过马赫-曾德尔干涉仪(MZI)动态控制两个输入端口导波的振幅和相位,从而实现了对辐射光偏振态的任意操控,如图 5(c)和图 5(d)所示。该研究利用 LNOI 平台的高速电光响应和多端口同时输入,实现了对聚焦光束任意偏振态的可重构生成、焦点的横向位置和焦距的可切换调控,以及 OAM 光束和贝塞尔光束的生成,展现了超构表面在光子芯片中高速控制光场的通用性和高效性。2025年, Ji 等^[87]提出了一种基于 LNOI 的可寻址片上超构表面网络,实现了动态全息显示功能。该研究利用 LNOI 平台的高速电光响应和片上超构表面的复用能力,通过两级铌酸锂光开关和 2×2 的交叉波导,构建了一个可寻址的片上超构表面网络。该系统能够以纳秒级的响应速度,根据施加的电压和偏振态检测,通过动态寻址切换 8 个全息图像,如图 5(f)所示。该工作突显了超构表面在 LNOI 光子集成平台实现大规模、像素级和高速动态调控方面的巨大潜力,为片上全息显示、大容量光通信和集成光子信息处理提供了可扩展的动态操控方案。

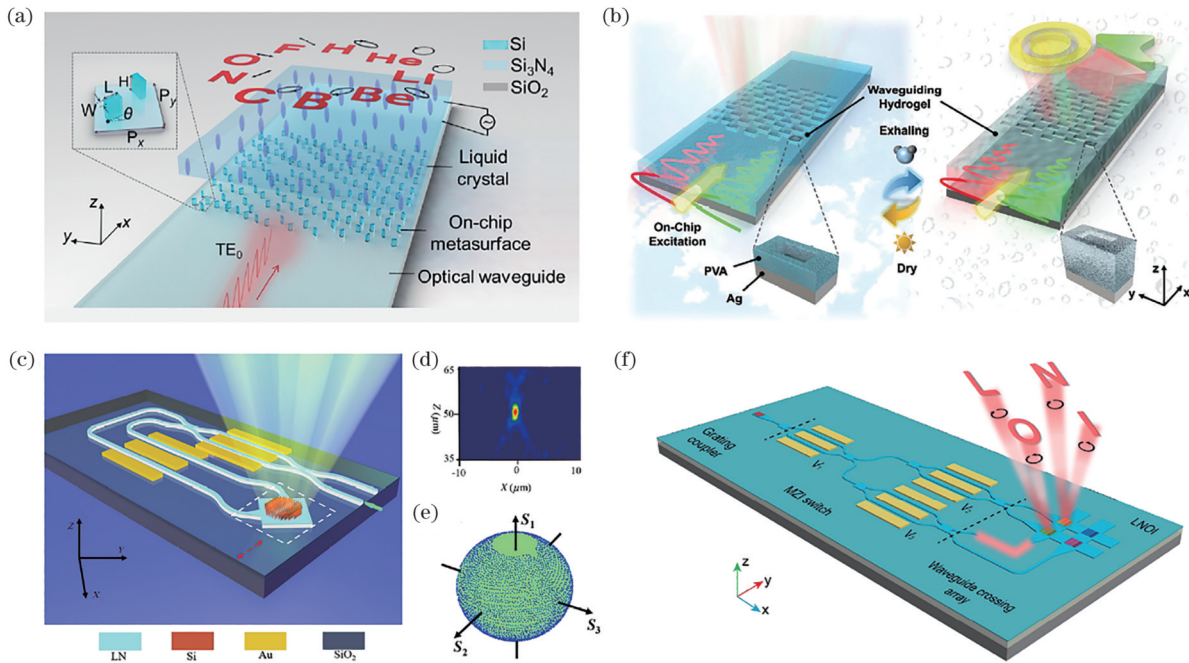


图 5 基于超构表面的片上动态辐射光场调控。(a)基于液晶材料的超构表面动态全息^[82];(b)水凝胶波导片上超构表面动态多色全息^[83];(c)~(e)高速可切换的超构表面片上波前整形^[86];(f)可寻址片上集成超构表面网络动态全息^[87]

Fig. 5 Dynamic manipulation of radiation light fields based on metasurfaces. (a) Dynamic holography of metasurfaces based on liquid crystal materials^[82]; (b) dynamic multicolor holography of hydrogel waveguide-integrated metasurfaces^[83]; (c)~(e) high-speed switchable wavefront shaping with metasurfaces^[86]; (f) dynamic holography using addressable on-chip metasurface networks^[87]

在集成光子芯片的光场辐射动态调控中,光学相控阵可以实现芯片级光束的偏转和动态扫描^[88-89]。而

将超构表面集成于光学相控阵上,通过对超构表面灵活巧妙的设计,可以进一步提升光学相控阵器件的相

关性能。2021年,Chang等^[90]提出了一种基于二维硅基微环发射器阵列和超构透镜的波束扫描方案,如图6(a)所示,其中,超构透镜集成于微环阵列发射器上方,可以将不同微环对应的发射位置信息转换为不同的远场辐射角度。在此方案中,超构表面以其超薄的平面特性和可灵活设计的特点,在扫描器件微型化和高精度光束操纵中极具优势。在提升光束转向效率和视场方面,Wang等^[91]于2022年提出了一种超构表面赋能端口选择型光学相控阵的方案,将超构表面集成于相控阵辐射天线上方,基于几何相位超构单元不同偏振响应实现双光束扫描,将扫描角度扩大到原扫描视场的两倍,如图6(b)~(d)所示。同年, Lee等^[92]提出了一种基于双层超构表面(MD)扩大光学相控阵

视场的方案,该方案利用一个超构表面,其上集成了一对焦距不同的凸透镜和凹透镜,从而将光学相控阵的光束偏转角扩大了三倍。如图6(e)所示。虽然此工作可以实现视场角较大的放大倍数,但也存在双层超构表面与光学相控阵仍是分离器件以及放大倍数在较大的辐射角度下效率比较低等问题。2023年,Wang等^[93]通过逐层制备工艺将双层超构表面集成在光学相控阵上,实现了1.54倍的视场扩大,如图6(f)所示,其中双层超构透镜采用二次相位设计,使得其在光学相控阵较大辐射角度下仍能以较高效率扩大视场。可以看到,从单层到多层超构表面的演进,不仅为光学相控阵带来了更宽广的扫描范围与更高的工作效率,同时也为动态光束操控技术的实现提供了硬件基础。

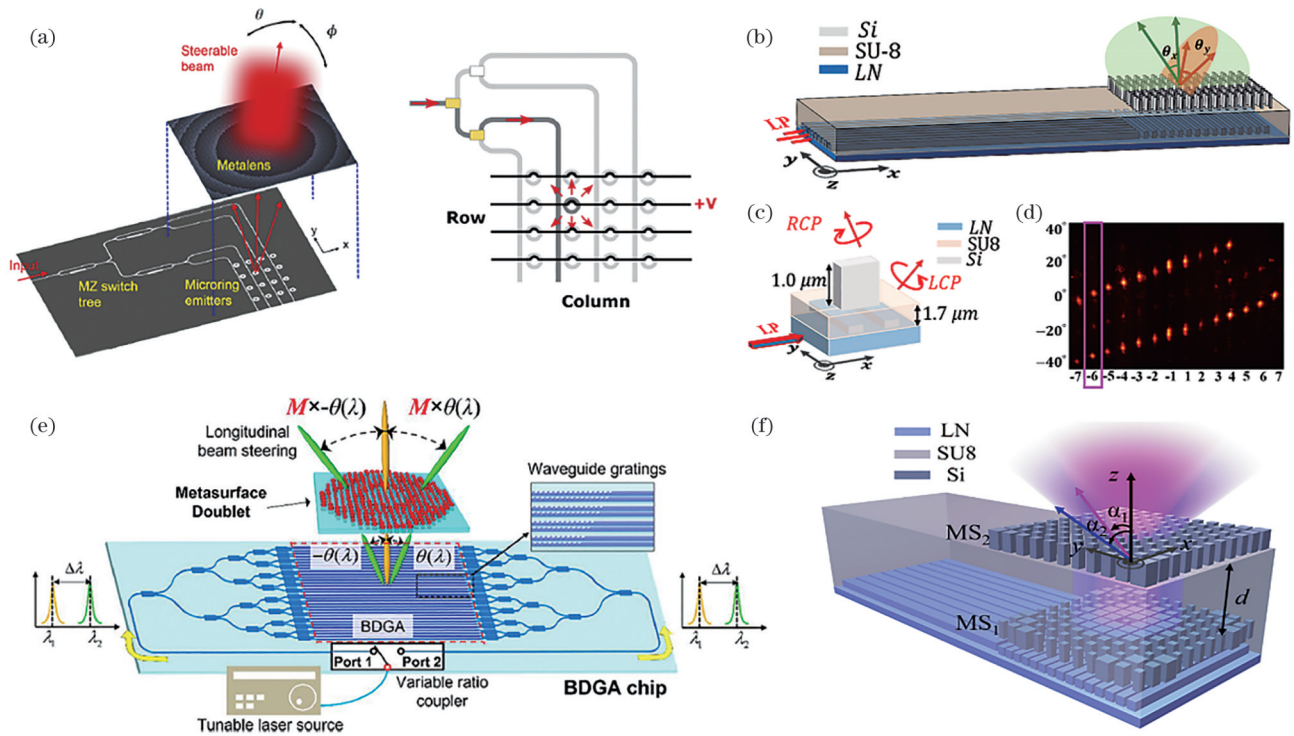


图6 光学相控阵集成的超构表面动态光场调控。(a)基于硅基光子开关网络与超透镜的波束扫描^[90]; (b)~(d)基于超构表面的偏振复用扩大扫描视场^[91]; (e)基于空间集成的双层超构表面扩大扫描视场^[92]; (f)基于片上集成的双层超透镜增大扫描视场^[93]

Fig. 6 Dynamic light field manipulation based on metasurface integrated with optical phased array. (a) Beam steering based on silicon photonics switch network and metalens^[90]; (b)~(d) expanded scanning field of view through metasurface-enabled polarization multiplexing^[91]; (e) spatially integrated double-layer metasurface for field-of-view expansion^[92]; (f) field-of-view expansion via on-chip integrated double-layer metasurface^[93]

5 总结与展望

超构表面具有高集成度、调控灵活、可扩展等独特优势,为导波与自由空间光场之间的转换提供了一个通用、灵活且功能强大的平台。本综述全面回顾了超构表面在导波辐射光场调控领域的最新进展。首先探讨了导波辐射调控的基本原理和机制,揭示了超构表面如何通过亚波长结构单元实现对片上光场振幅、相位和偏振的精确操控。在此基础上,详细阐述了片上集成超构表面在多维辐射调控(包括输入端口、入射角

度、波长、偏振和空间的多维联合调控等)方面的功能与应用,实现了复用通道的扩展和信息容量的显著提升。此外,本综述还重点介绍了超构表面应用于导波辐射光场动态调控的各种方案和实现途径,展示了其在实时、可重构光场操控以及与光学相控阵器件相结合方面的应用潜力。虽然片上超构表面在导波辐射中还存在材料损耗、模式失配和反向辐射导致的辐射效率低以及加工工艺难度较大等问题,但未来随着设计方案的创新和制备工艺的突破(如采用高折射率对比度材料、优化耦合结构和逆向设计等方案),片上超构

表面将在 AR、新型显示、激光雷达等新兴领域展现出广阔的应用前景,为下一代高性能集成光子器件提供关键技术支撑。

鉴于目前该领域的发展趋势和所面临的问题,本文就未来一些比较有前景的研究和发展方向进行初步展望:

1) 智能化设计。通过将片上超构表面与人工智能和机器学习深度融合,有望突破传统经验和直觉的限制,发展新型超构表面结构和调控机制,从而平衡或打破复用通道的制约关系,获得高效操控能力。

2) 应用拓展。片上超构表面在 AR、全息显示、激光雷达等领域展现出巨大的潜力,尤其在集成光子芯片方面,其在高速光通信、片上神经网络和光计算等领域具有独特的优势,将进一步推动集成光子技术的进步。

3) 片上量子超构表面芯片。通过对超构表面的精确设计,能够在芯片上实现量子态的生成、操控与探测,例如片上纠缠光子对的产生、量子态的传输及量子门操作。该技术在超紧凑量子光源、高维量子态操控和片上量子测量等领域展现出广阔的应用前景,从而为构建可扩展的片上量子计算与通信系统提供了全新路径,有望显著加速量子技术的芯片化与集成化进程。

综上所述,超构表面赋能的导波辐射光场调控是一个充满活力和前景的研究领域。随着新材料、新原理和新技术的不断涌现,片上超构表面将在未来的光子技术中扮演越来越重要的角色,在推动集成光子学领域和信息社会的发展方面具有重要的作用。

参 考 文 献

[1] Jalali B, Fathpour S. *Silicon photonics*[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615.

[2] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. *Subwavelength integrated photonics*[J]. Nature, 2018, 560(7720): 565-572.

[3] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, et al. *Programmable photonic circuits*[J]. Nature, 2020, 586(7828): 207-216.

[4] Yu N F, 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.

[5] Huang L L, Chen X Z, Mühlender H, et al. *Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation*[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5750-5755.

[6] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. *Broadband achromatic optical metasurface devices*[J]. Nature Communications, 2017, 8: 187.

[7] Arbabi A, Faraon A. *Advances in optical metalenses*[J]. Nature Photonics, 2023, 17(1): 16-25.

[8] Li T, Chen C, Xiao X J, et al. *Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens*[J]. Photonics Insights, 2023, 2(1): R01.

[9] Zheng G X, Mühlender H, Kenney M, et al. *Metasurface holograms reaching 80% efficiency*[J].

Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.

[10] Zhao R Z, Huang L L, Wang Y T. *Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies*[J]. Photonix, 2020, 1(1): 20.

[11] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. *Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera*[J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.

[12] Deng J, Shi M D, Liu X S, et al. *An on-chip full-Stokes polarimeter based on optoelectronic polarization eigenvectors*[J]. Nature Electronics, 2024, 7(11): 1004-1014.

[13] Hu Y Q, Jiang Y T, Zhang Y, et al. *Achromatic full Stokes polarimetry metasurface for full-color polarization imaging in the visible range*[J]. Nano Letters, 2024, 24(41): 13018-13026.

[14] Wang Z Q, Li F J, Deng Q M, et al. *Inverse-designed Jones matrix metasurfaces for high-performance meta-polarizers*[J]. Chinese Optics Letters, 2024, 22(2): 023601.

[15] Lin C H, Huang S H, Lin T H, et al. *Metasurface-empowered snapshot hyperspectral imaging with convex/deep (CODE) small-data learning theory*[J]. Nature Communications, 2023, 14: 6979.

[16] He H Y, Zhang Y Z, Shao Y J, et al. *Meta-attention network based spectral reconstruction with snapshot near-infrared metasurface*[J]. Advanced Materials, 2024, 36(23): 2313357.

[17] Ding Y Q, Yang Q, Li Y N, et al. *Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges*[J]. eLight, 2023, 3(1): 24.

[18] Li Y, Chen S Y, Liang H W, et al. *Ultracompact multifunctional metalens visor for augmented reality displays*[J]. Photonix, 2022, 3(1): 29.

[19] Tao J, You Q, Li Z L, et al. *Mass-manufactured beam-steering metasurfaces for high-speed full-duplex optical wireless-broadcasting communications*[J]. Advanced Materials, 2022, 34(6): 2106080.

[20] Wu Y, Chen J, Wang Y, et al. *Tbps wide-field parallel optical wireless communications based on a metasurface beam splitter*[J]. Nature Communications, 2024, 15: 7744.

[21] Pahlevaninezhad H, Khorasaninejad M, Huang Y W, et al. *Nano-optic endoscope for high-resolution optical coherence tomography in vivo*[J]. Nature Photonics, 2018, 12(9): 540-547.

[22] Li L, Liu Z X, Ren X F, et al. *Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source*[J]. Science, 2020, 368(6498): 1487-1490.

[23] Zhang J H, Ma J Y, Neshev D N, et al. *Photon pair generation from lithium niobate metasurface with tunable spatial entanglement*[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(1): 010005.

[24] Wang Z, Xiao Y H, Liao K, et al. *Metasurface on integrated photonic platform: from mode converters to machine learning*[J]. Nanophotonics, 2022, 11(16): 3531-3546.

[25] Meng Y, Chen Y Z, Lu L H, et al. *Optical meta-waveguides for integrated photonics and beyond*[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 235.

[26] Yang Y W, Seong J H, Choi M, et al. *Integrated metasurfaces for re-envisioning a near-future disruptive*

- optical platform[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 152.
- [27] 廖琨, 甘天奕, 胡小永, 等. 基于介质超表面的片上集成纳米光子器件[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823001.
Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. On-chip nanophotonic devices based on dielectric metasurfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823001.
- [28] 王艳春, 张跃变, 程化, 等. 片上集成人工微结构光场调控[J]. *光学学报*, 2024, 44(10): 1026004.
Wang Y C, Zhang Y B, Cheng H, et al. Light field manipulation based on on-chip integrated artificial microstructures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(10): 1026004.
- [29] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [30] Li Z Y, Kim M H, Wang C, et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(7): 675-683.
- [31] Wang C, Li Z Y, Kim M H, et al. Metasurface-assisted phase-matching-free second harmonic generation in lithium niobate waveguides[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2098.
- [32] Wu C M, Yu H S, Lee S, et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 96.
- [33] Wang Z, Li T T, Soman A, et al. On-chip wavefront shaping with dielectric metasurface[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3547.
- [34] Liao K, Gan T Y, Hu X Y, et al. AI-assisted on-chip nanophotonic convolver based on silicon metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3315-3322.
- [35] Zarei S, Marzban M R, Khavasi A. Integrated photonic neural network based on silicon metalines[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36668-36684.
- [36] Wang Z, Chang L, Wang F F, et al. Integrated photonic metasystem for image classifications at telecommunication wavelength[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2131.
- [37] Fu T Z, Zang Y B, Huang Y Y, et al. Photonic machine learning with on-chip diffractive optics[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 70.
- [38] Huang Y Y, Liu W C, Sun R, et al. Diffraction-driven parallel convolution processing with integrated photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(4): 2400972.
- [39] Deng L, Cai Z Q, Liu Y M. Functionality expansion of guided mode radiation via on-chip metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(29): 9042-9049.
- [40] Li Z, Shi Y Y, Dai C J, et al. On-chip-driven multicolor 3D meta-display[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(10): 2301240.
- [41] Liu Z Y, Wang D Y, Gao H, et al. Metasurface-enabled augmented reality display: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(3): 034001.
- [42] Moon S, Kim S, Kim J, et al. Single-layer waveguide displays using achromatic metagratings for full-colour augmented reality[J]. *Nature Nanotechnology*, 2025, 20(6): 747-754.
- [43] 杨慧, 文成峰, 翁嘉承, 等. 用于增强现实显示的大角度均匀衍射超表面光栅的设计[J]. *光学学报*, 2025, 45(11): 1105001.
Yang H, Wen C F, Weng J C, et al. Design of large-angle uniform diffraction metasurface gratings for Augmented Reality display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(11): 1105001.
- [44] Gopakumar M, Lee G Y, Choi S, et al. Full-colour 3D holographic augmented-reality displays with metasurface waveguides[J]. *Nature*, 2024, 629(8013):791-797.
- [45] Tian Z T, Zhu X L, Surman P A, et al. An achromatic metasurface waveguide for augmented reality displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 94.
- [46] Li Z, Liu Y, Zhang C, et al. On-chip direction-multiplexed meta-optics for high-capacity 3D holography[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(16): 2312705.
- [47] Wang Y L, Rao R L, Wang Z J, et al. Multidimensional meta-optics storage via nonorthogonal-angular guided-wave incidence[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(29): 11413-11419.
- [48] 陈宜臻, 潘威康, 金相宇, 等. 片上光学近场的远场辐射调控[J]. *光电工程*, 2023, 50(8): 230173.
Chen Y Z, Pan W K, Jin X Y, et al. Far-field radiation manipulations of on-chip optical near-fields[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(8): 230173.
- [49] Jia W H, Xu C, Li X L, et al. Full-color AR holography by chip-integrated meta-optics[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(32): 12269-12275.
- [50] Wang Z J, Wan S, Shi Y Y, et al. Vectorial fluorescence control with light-emitting metasurfaces for unidirectional emission and incoherent holography[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(33): 2502682.
- [51] Wang Z J, Wan S, Dai C J, et al. Direction-decoupled light-emitting metasurface via guided-photoluminescence manipulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(8): 2415823.
- [52] Xi K L, Fang B, Ding L, et al. Terahertz Airy beam generated by Pancharatnam-Berry phases in guided wave-driven metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16699-16711.
- [53] Guo X X, Ding Y M, Chen X, et al. Molding free-space light with guided wave-driven metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2020, 6(29): eabb4142.
- [54] Xie C K, Huang L R, Liu W B, et al. Bifocal focusing and polarization demultiplexing by a guided wave-driven metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25709-25719.
- [55] Ha Y L, Guo Y H, Pu M B, et al. Monolithic-integrated multiplexed devices based on metasurface-driven guided waves[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2021, 4(2): 2000239.
- [56] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100638.
- [57] Hsieh P Y, Fang S L, Lin Y S, et al. Integrated metasurfaces on silicon photonics for emission shaping and holographic projection[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4687-4695.
- [58] Zhao K Y, Ha Y L, Guo Y H, et al. On-chip integrated metasurface empowered multi-channel multiplexed three-

- dimensional hologram[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(15): 2303009.
- [59] Li W W, Zhou Y C, Ye C, et al. Multifunctional metasurface for simultaneous light manipulation under both guided-wave and free-space incidence[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(4): 1724-1733.
- [60] Fang B, Shu F Z, Wang Z Z, et al. On-chip non-uniform geometric metasurface for multi-channel wavefront manipulations[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3119-3122.
- [61] Wan S, Qu K N, Shi Y Y, et al. Multidimensional encryption by chip-integrated metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(28): 18693-18700.
- [62] Hsieh P Y, Fang S L, Lin Y S, et al. Metasurfaces on silicon photonic waveguides for simultaneous emission phase and amplitude control[J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 12487-12496.
- [63] Zhou N, Zheng S, Cao X P, et al. Ultra-compact broadband polarization diversity orbital angular momentum generator with $3.6 \times 3.6 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaau9593.
- [64] Zheng S, Zhao Z Y, Zhang W F. Versatile generation and manipulation of phase-structured light beams using on-chip subwavelength holographic surface gratings[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(1): 55-70.
- [65] Xie Z W, Lei T, Li F, et al. Ultra-broadband on-chip twisted light emitter for optical communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 18001.
- [66] Fang B, Wang Z Z, Gao S L, et al. Manipulating guided wave radiation with integrated geometric metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 1923-1930.
- [67] Fang B, Wang Z Z, Li Y T, et al. Spin-decoupled meta-coupler empowered multiplexing and multifunction of guided wave radiation[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(12): 2194-2201.
- [68] Yi C, Wang Z J, Shi Y Y, et al. Creating topological exceptional point by on-chip all-dielectric metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 262.
- [69] Huang H Q, Overvig A C, Xu Y, et al. Leaky-wave metasurfaces for integrated photonics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(6): 580-588.
- [70] Huang Q, Wang Z J, Shi Y Y, et al. Toward ultra-high-capacity meta-optics storage: 3D data cube encrypted via arbitrary spatial coordinates[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36: e12017.
- [71] Liu Y, Shi Y Y, Wang Z J, et al. On-chip integrated metasystem with inverse-design wavelength demultiplexing for augmented reality[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1268-1274.
- [72] Rao R L, Shi Y Y, Wang Z J, et al. On-chip cascaded metasurfaces for visible wavelength division multiplexing and color-routing meta-display[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(6): 2452-2458.
- [73] Yang R, Wan S, Shi Y Y, et al. Immersive tuning the guided waves for multifunctional on-chip metaoptics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2200127.
- [74] Xu C, Shi Y Y, Wan S, et al. Omnidirectional angular-multiplexed meta-holography via arbitrary spatial rays[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(24): e00765.
- [75] Zhao Z R, Shi Y Y, Wang Z J, et al. Azimuth-resolved on-chip meta-hologram[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(21): e01642.
- [76] Liu Z Y, Gao H, Ma T G, et al. Broadband spin and angle co-multiplexed waveguide-based metasurface for six-channel crosstalk-free holographic projection[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 7.
- [77] Ji J T, Li J, Wang Z Z, et al. On-chip multifunctional metasurfaces with full-parametric multiplexed Jones matrix[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 8271.
- [78] Liu X J, Ma Z Y, Zhang D S, et al. Hypermultiplexed off-chip hologram by on-chip integrated metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(28): 2401169.
- [79] Zhao Z R, Wang Z J, Shi Y Y, et al. Multidimensional-encrypted meta-optics storage empowered by diffraction-order decoupling[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(21): 2570147.
- [80] Li L, Li T, Tang X M, et al. Plasmonic polarization generator in well-routed beaming[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(9): e330.
- [81] Ji J T, Wang Z Z, Sun J C, et al. Metasurface-enabled on-chip manipulation of higher-order Poincaré sphere beams[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(7): 2750-2757.
- [82] Shi Y Y, Dai C J, Wan S, et al. Electrical-driven dynamic augmented reality by on-chip vectorial meta-display[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(5): 2123-2130.
- [83] Li X L, Dai C J, Shi Y Y, et al. Hydrogel-waveguiding on-chip meta-optics for dynamic multicolor holography [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(49): 2408958.
- [84] Zheng Y, Wu R B, Ren Y, et al. Photonic neural network fabricated on thin film lithium niobate for high-fidelity and power-efficient matrix computation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(10): 2400565.
- [85] 陈旭, 秦怀泽, 宋于坤, 等. 铌酸锂光计算芯片的研究与应用进展(特邀)[J]. *中国激光*, 2025, 52(18): 1803010. Chen X, Qin H Z, Song Y K, et al. Research and application progresses of lithium niobate based optical computing chips (Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(18): 1803010.
- [86] Zhong H Z, Zheng Y, Sun J C, et al. Gigahertz-rate-switchable wavefront shaping through integration of metasurfaces with photonic integrated circuit[J]. *Advanced Photonics*, 2024, 6(1): 016005.
- [87] Ji J T, Ye Z L, Wang Z Z, et al. Dynamic holographic display with addressable on-chip metasurface network based on lithium niobate photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 332.
- [88] Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 93-107.
- [89] Kim I, Martins R J, Jang J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(5): 508-524.
- [90] Chang Y C, Chul S M, Phare C T, et al. 2D beam steerer based on metalens on silicon photonics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 854-864.
- [91] Wang Z Z, Song W G, Chen Y X, et al. Metasurface empowered lithium niobate optical phased array with an enlarged field of view[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): B23-B29.
- [92] Lee W B, Im C S, Zhou C Y, et al. Metasurface doublet-integrated bidirectional grating antenna enabling

enhanced wavelength-tuned beam steering[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 248-255.
[93] Wang Z Z, Ji J T, Ye X, et al. On-chip integration of

metasurface-doublet for optical phased array with enhanced beam steering[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2425-2432.

Metasurface-Empowered Manipulation of Light Field of Guided-Wave Radiation (Invited)

Wang Zhizhang¹, Fang Bin², Ji Jitao¹, Zhu Shining¹, Li Tao^{1*}

¹*College of Engineering and Applied Sciences, National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;*

²*College of Optical and Electronic Technology, Zhejiang Province Key Laboratory of Optoelectronic Metrology and Precision Instruments, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China*

Abstract

Significance With the rapid development of the information age, photonic technology has become a central driver of future technological advancement. In the pursuit of higher performance, smaller footprint, and lower power consumption, photonic integrated circuits (PICs) have emerged to integrate complex optical functionalities onto chips at the micron or even nanoscale. By incorporating components such as lasers, modulators, detectors, and waveguides on a single chip, PICs significantly enhance optical signal processing and transmission efficiency, enabling transformative advances across multiple domains. However, conventional integrated photonic devices still face challenges in achieving efficient coupling and flexible control between on-chip guided modes and free-space optical fields. Moreover, traditional optical components are often bulky and incompatible with miniaturized photonic chips, constraining the overall performance and application scope of integrated systems. In this context, metasurfaces, artificial microstructures composed of subwavelength unit cells, offer a promising solution by enabling exceptional control over the amplitude, phase, polarization, and spectral properties of light. Through precise engineering of the local electromagnetic response to incident light, metasurfaces can realize complex optical functionalities that are difficult or impossible to achieve with conventional components, leading to a new generation of meta-optical devices.

In recent years, researchers have integrated optical metasurfaces into waveguides and micro-rings/cavities on photonic chips. By exploiting the unique electromagnetic response characteristics of metasurfaces, subwavelength-scale manipulation of guided optical signals can be achieved, further enhancing device performance, reducing physical footprint, and expanding functional capabilities. Through specially designed on-chip metasurfaces, functionalities such as wavelength demultiplexing of guided modes, polarization state manipulation, and multi-dimensional information encoding can be realized, significantly broadening the application potential of integrated photonic chips. On-chip metasurfaces, by bridging free-space optics and integrated photonics, offer a pathway to overcome the limitations of traditional photonic integrated devices in beam steering, optical field shaping, and multifunctional integration, thereby enabling new paradigms for next-generation high-performance photonic systems.

Progress We systematically summarize the fundamental principles underlying metasurface-enabled guided-wave radiation control (Fig. 1). Furthermore, we provide a comprehensive overview of the capabilities of on-chip metasurfaces in manipulating radiated light fields under both single- and multi-port configurations (Figs. 2–4), highlighting their ability to achieve precise, multi-dimensional control over emitted optical fields. The review also examines dynamic control strategies for guided-wave radiation using metasurfaces (Fig. 5 and Fig. 6), analyzing various approaches to realize real-time, reconfigurable manipulation of light through external stimuli.

Conclusions and Prospects This review summarizes recent advances in metasurfaces for guided-wave radiation manipulation. We begin by examining the fundamental principles and underlying mechanisms of guided-wave radiation control. Building on this foundation, the review details the robust capabilities of on-chip metasurfaces in multidimensional light field manipulation, along with significant enhancements in information capacity through joint control and multiplexing of optical channels. Furthermore, various strategies and implementation methods for dynamic manipulation of radiated light fields using on-chip metasurfaces are highlighted, demonstrating their potential for real-time, reconfigurable light field engineering.

Considering current trends and challenges, this review outlines several promising research and development directions. Integrating on-chip metasurfaces with artificial intelligence and machine learning can overcome the limitations of traditional empirical and intuition-based design approaches, enabling the discovery of novel metasurface architectures and control paradigms. On-chip

metasurfaces hold significant promise for applications in augmented reality (AR), holographic displays, and encrypted optical storage. In photonic integrated circuits, their advantages in high-speed optical communication, on-chip neural networks, and optical computing are expected to accelerate the development of advanced integrated photonic systems. In quantum photonics, precise metasurface engineering enables on-chip generation, manipulation, and detection of quantum states. These capabilities open new pathways toward scalable on-chip quantum computing and quantum communication platforms, thereby advancing the chip-scale realization of quantum technologies.

In summary, guided-wave radiation manipulation via on-chip metasurfaces represents a dynamic and highly promising research frontier. With the continuous emergence of new materials, physical principles, and fabrication technologies, on-chip metasurfaces are poised to play an increasingly pivotal role in future photonic systems, contributing significantly to the evolution of integrated photonics and the broader information society.

Key words micro-nano optics; metasurface; integrated optics; multidimensional light field; dynamic manipulation