



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Subwavelength Optics—Article

面向光纤模式解复用与通信的神经超表面路由器

赵雨^{a,#}, 王慧娇^{a,#}, 李子乐^{a,b,#}, 黄天^a, 杨超^c, 邱英^c, 龚宇涵^c, 周舟^a, 梁聪玲^a, 余磊^{a,*}, 陶金^{b,c,*}, 余少华^b, 郑国兴^{a,b,d,*}

^a Electronic Information School & School of Microelectronics, Wuhan University, Wuhan 430072, China

^b Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

^c State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, China Information Communication Technologies Group Corporation (CICT), Wuhan 430074, China

^d Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 March 2024

Revised 3 November 2024

Accepted 11 November 2024

Available online 27 November 2024

关键词

超表面

深度学习

模分复用

光纤通信

摘要

为突破香农极限、提升传输容量,模分复用(MDM)技术在光纤通信领域备受关注,这也推动了对高质量复用器和解复用器的需求。然而,理想模式复用器/解复用器需满足高性能、可扩展、可兼容和可集成等要求,而传统大体积设备(如波导、光栅、自由空间光学器件)仅满足一部分要求,这一问题将限制MDM技术的应用。本文提出一种经深度学习优化的神经超表面路由器(NMR),可实现多模式分离并支持多通道通信,同时具备可扩展性、兼容性和超紧凑性。本文设计并通过实验验证了一种基于NMR器件的MDM通信系统,能够实现多数据集的同步且独立传输。在无何补偿技术或相关器件的条件下,传输容量高达100 Gbps,误码率低至 10^{-4} 量级。融合超表面、光纤通信和深度学习,本研究为智能超表面辅助的光互联以及全光模式识别与分类等潜在应用提供了新范式。

© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. 引言

人工智能、云计算、大数据、物联网和边缘计算等新兴技术的普及,将人类社会推向数据爆炸时代,信息传输容量需求日益增长[1–2]。几十年来,光通信技术飞速发展,支撑着当前的信息化社会。然而,现代光通信中多种编码技术的飞速发展,使得幅度、相位、偏振、时间和频率等多个物理维度的复用已接近香农极限。为应对这一挑战,空分复用技术被广泛研究,其利用横向空间域的自由度[3–4],通过多模光纤[5]、多芯光纤[6]和多模多芯光纤[7–8]等

技术方案提升通信容量。其中,少模光纤(FMF)适用于大容量光纤通信系统,与单模光纤(SMF)相比,其数据吞吐量显著提升,且在设计复杂度、能耗、集成成本和应用场景等方面特性相当。光纤模式复用器和解复用器是FMF系统的核心,其实现方法包括光栅[9]、波导[10–11]、定向耦合器[12–13]、自由空间光学[14–15]和光子灯笼[16]等。尽管如此,将兼具优越性能、可扩展性、可兼容性且设计与制造简洁的模式复用器/解复用器投入应用,仍面临一定的挑战。

超表面是一种平面光学器件,由亚波长尺度纳米散射

* Corresponding authors.

E-mail addresses: ly.wd@whu.edu.cn (L. Yu), taojin@wri.com.cn (J. Tao), gxzheng@whu.edu.cn (G. Zheng).

These authors contributed equally to this work.

2095-8099/© 2024 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 45(2): 88–96

引用本文: Yu Zhao, Huijiao Wang, Zile Li, Tian Huang, Chao Yang, Ying Qiu, Yuhang Gong, Zhou Zhou, Congling Liang, Lei Yu, Jin Tao, Shaohua Yu, Guoxing Zheng. A Neuro Metasurface Mode-Router for Fiber Mode Demultiplexing and Communications. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.012>

体构成[17], 可调控光的相位[18–21]、幅度[22–24]、偏振[25–28]和频率[29–30]等特性。迄今为止, 超表面已被广泛应用于光栅[31]、透镜[32–33]和全息图[34]等多种光学元件。与传统光学器件相比, 超表面作为空间复用和解复用的新平台, 在理论探索和实际应用中均具优势, 尤其在高通量、特定场景、实时任务中, 能实现光速操作、大范围集成和高密度传输[35–37]。尽管当前基于超表面的器件已成功实现基模转换[38–40]和模式分离[41–42], 但在高速模分复用(MDM)通信中仍存在困难。值得注意的是, 现有用于模式分离的超表面通常集成于光纤端口, 由于制造工艺复杂且高速通信性能指标不够优越, 尚未有效应用于光学实验和系统级通信验证。迄今为止, 能高效解复用光纤中的混合模式, 同时高速传输各个模式携带信息的超表面器件仍较为罕见。因此, 通过超紧凑结构及超简洁设计实现高速通信以满足实际应用需求, 仍是一项重大挑战。

深度学习技术作为优化工具在多种物理系统中得到广泛应用, 已被用于超表面的空间相位分布和纳米散射体几何结构尺寸设计[43–44]。与模拟退火、梯度下降等传统算法相比, 结合反向传播算法和Adam优化器的深度学习架构, 在数据容量和系统性能方面均有显著提升[45]。值得注意的是, 反向传播算法将性能指标作为损失函数的组成部分, 使优化过程具有目的性和方向性, 而非随机无序的, 从而提高了优化精度[46–48]。此外, 深度学习框架的优化和评估过程通常使用扩展数据集规模而获得的训练集和测试集, 这使得优化结果具有更高的鲁棒性[49–50]。再者, 深度学习架构可在多种物理系统中运行, 处理大体量物理模型, 同时实现高速度、高性能优化, 从而具备系统适用性、功能扩展性和设计灵活性[51–53]。

本研究将超表面材料、深度学习算法与光纤通信系统相结合, 提出一种神经超表面路由器(NMR)。值得注意的是, 该NMR仅包含单个超表面, 无需任何补偿技术或相关器件, 即可实现双模分离和双通道MDM通信。具体而言, 所设计的超表面作为傅里叶光栅, 对FMF中传输的两种模式光场进行相位调制, 由此这两种携带不同信息的模式可被路由至不同的空间区域。同时, 考虑到光纤物理特性易受环境干扰, 模式光场在位置平移、角度旋转、面积缩放和相位发散等多个维度易发生变换。因此, 本设计利用神经网络优化超表面的相位分布以提升鲁棒性。这有助于实现多维度变换模式的分离, 从而控制模间串扰, 同时满足实际场景中大容量通信的需求。并且, 本文通过实验验证了NMR的双模分离功能, 可将FMF的两种模式空间路由至各自对应的设计区域。进一步地, NMR集成式通信系统的运行证明了其应用于双通道MDM通信的有

效性, 能传输两种模式各自携带的两组信号。重要的是, 在NMR集成式通信系统中, 双通道传输容量达100 Gbps, 单通道达50 Gbps, 误码率低至 10^{-4} 量级。

2. 设计与结果

2.1. NMR的工作机制

在提出的NMR中, 光纤模式充当互联网协议(IP)地址, 每种模式携带一组信息。神经网络的算法框架相当于路由处理器, 超表面的调制能力相当于路由协议。超表面的结构分布、光纤的传输模式及其在空间中对应的接收位置共同构成路由表。因此, 多组信息可在独立通道中有序、高效地传输。与互联网中的交换结构网络不同, 该NMR中单个超表面即可实现整个交换组织的功能, 体现了光物联网的高效性。

基于MDM技术, 本文选择了FMF, 它能有效满足容量扩展需求, 且生产成本和应用兼容性与SMF相近。该FMF支持 LP_{01} 和 LP_{11} 模式(线偏振模式), 每种模式具有独特的复振幅分布, 且同时加载不同信号(详见附录A中的第S1节)。如图1所示, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的复振幅分布差异使NMR能通过相同的相位调制令光纤模式具有不同的空间路由。两种模式的横向复振幅分布作为NMR的输入, 目标区域的平面强度分布作为NMR的输出。同时投射至超表面的两种模式被路由至空间中不同的目标区域, 其各自携带的两组信息由目标区域位置处的光纤接收。

在MDM技术领域, 随着FMF中可传输模式数量的增加, 并行传输的模式易发生耦合, 且模式的横向分布可能因环境扰动(如弯曲、扭转、挤压、移动等)而变化。尽管特殊设计的对称圆柱型环芯光纤可在一定程度上减轻不同模式组之间的耦合, 但弱导光纤中同一模式组内的耦合仍会发生。目前, MDM系统常采用多输入多输出数字信号处理来减少模式耦合的影响。然而, 这种方法增加了系统设计的复杂性, 降低了功能调节的灵活性。此外, 光纤孔径与超表面区域的不完全对准(相当于模式场相对于超表面的空间位置变化)也会导致误差。为应对这些干扰, 本文研究了模式场的各种空间变换, 并将变换后的模式场数据集纳入超表面优化中, 如图1所示。本文利用神经网络训练超表面的相位分布, 以增强其抗干扰能力和对准容差, 从而提高系统的鲁棒性、稳定性和抗干扰能力。

2.2. NMR的设计

深度学习技术作为优化工具在多种物理系统中得到广泛应用。如图2(a)所示, 本文采用神经网络架构模拟

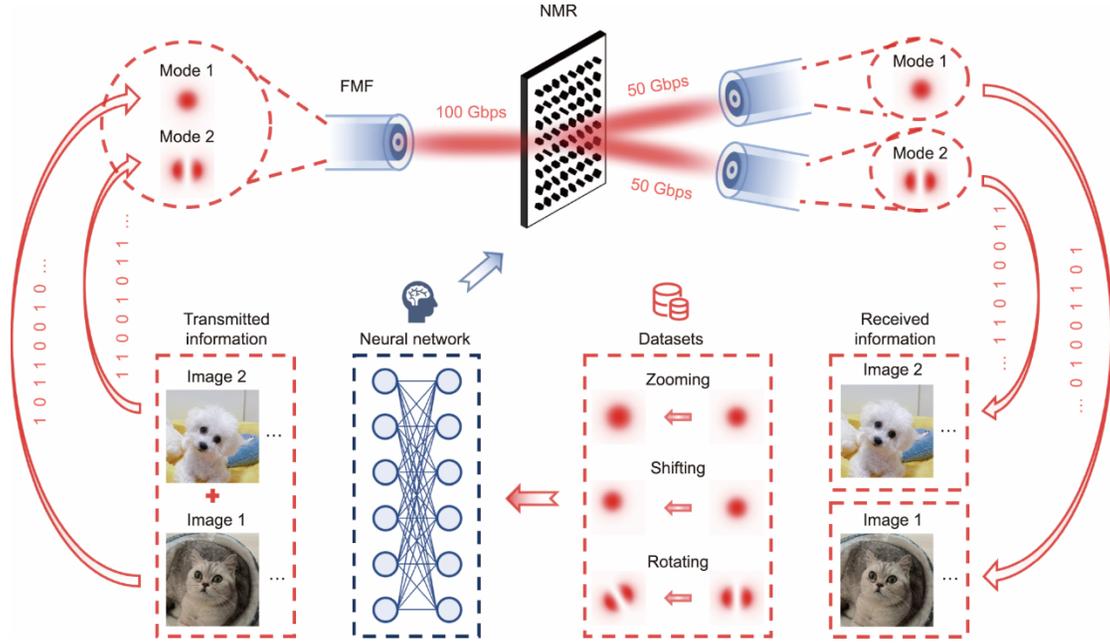


图1. 面向MDM的NMR概念及其在大容量光纤通信中的应用。该超表面通过神经网络训练，能够抵抗光纤模式波动（如缩放、平移和旋转）。

光信号在超表面中的传播过程（训练过程中应用的系统配置详见附录A中的第S2节），通过随机梯度下降算法更新超表面的相位分布（记为 P ），以实现优化。

在该架构中，网络的输入包含两个通道，分别为来自FMF的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式复振幅分布，可表示为

$$I = A(m, n)e^{i\varphi(m, n)} \quad (1)$$

式中， $A(m, n)$ 表示模式光场的振幅分布； $\varphi(m, n)$ 表示模式光场的相位分布； I 表示网络的输入分布； m 和 n 表示超表面平面上的坐标； i 为虚数单位。考虑到模式光场的易变性，本文为模式配置考虑了三种变换维度：位置平移、角度旋转和相位发散。沿 x 和 y 轴的平移导致模式场与超表面区域的对准偏移；沿 z 轴的平移和相位发散导致模式场相对于超表面区域的缩放；面内角度旋转导致模式场相对于超表面中心轴的角度偏移。因此，模式场有四种可能的变换类型：横向轴向平移、纵向轴向平移、角度旋转和面积缩放。在这四种变换类型的叠加下，本文生成两种光纤模式的输入分布数据集作为优化架构的训练集，在图2（a）中记为 I^0 和 I^1 （光纤模式的数据集生成详情见附录A中的第S3节）。

网络的实际输出 O_{actual} 包含 LP_{01} 和 LP_{11} 模式下的强度分布，表达式如下：

$$O_{\text{actual}}(m, n) = \left| F \left\{ A(m, n)e^{i[P(m, n) + \varphi(m, n)]} \right\} \right|^2 \quad (2)$$

式中， O_{actual} 表示网络的实际输出分布； F 表示傅里叶变换。优化架构中的两种模式具有不同位置的目标区域，其作为理想输出平面，在图2（a）中记为 O^0 和 O^1 。在理

想输出平面中，暗背景和亮目标的强度值分别设为0和1。本文的目标是使实际输出 O_{actual}^0 和 O_{actual}^1 分别接近甚至等于理想输出 O^0 和 O^1 。

如图2（a）所示，本文引入 $\text{Loss}_{\text{back}}$ 和 $\text{Loss}_{\text{corr}}$ 作为优化架构中反向传播的损失函数。 $\text{Loss}_{\text{back}}$ 用于降低背景噪声， $\text{Loss}_{\text{corr}}$ 用于减少模式间串扰（损失函数详情见附录A中的第S4节），使每种模式的能量仅集中在设计的目标区域。本文确保实际输出中的亮区域位于理想输出的目标区域内，从而使两种模式的能量能明确路由至各自的目标区域，且携带的两组图像能在设计位置精确接收。

超表面相位分布的最终训练结果如图2（b）所示，其左上角虚线框中尺寸为 20×20 像素的放大相位分布如图2（c）所示。几何相位（也称为Pancharatnam-Berry相位）可用于生成相位延迟为纳米结构取向角两倍的交叉偏振分量。为在 1550 nm 红外通信波长下实现交叉偏振分量的高透射率，本文采用全硅纳米结构制作超表面（纳米结构单元的设计详情见附录A中的第S5节）。

训练后，利用MATLAB（美国MathWorks公司）软件进行基尔霍夫衍射计算，评估超表面的鲁棒性。本文生成训练数据集之外的四维大尺度变换模式场作为测试集，以确保评估的有效性，如图2（d）所示。具体而言，模式场的长度和宽度均为 $860 \mu\text{m}$ ，作为变换参考。沿 x 轴正、负方向平移的尺度为 $50 \mu\text{m}$ （ $\Delta x_{1,2} = 50 \mu\text{m}$ ），沿 y 轴正、负方向平移的尺度为 $100 \mu\text{m}$ （ $\Delta y_{1,2} = 100 \mu\text{m}$ ）。平面内沿顺时针和逆时针方向旋转的尺度为 10° （ $\Delta \theta_{1,2} = 10^\circ$ ）。面积缩放的尺度为0.9倍和1.1倍，基于 0.2° 发散角对应于

沿 z 轴正、负方向平移 12.3 mm ($\Delta z_{1,2} = 12.3$ mm) (模式实际光分布的发散角详情见附录 A 中的第 S6 节)。随后, 本文计算经超表面相位调制后变换模式场的基尔霍夫衍射分布, 将其作为实际输出平面。如图 2 (d) 所示, 在各个变换模块中, 中间列显示原始模式场及其基尔霍夫衍射结果, 两侧显示变换后的模式场及其基尔霍夫衍射结果。结果表明, 超表面对大尺度变换模式的路由能力与对原始模式的路由能力相当, 均能精确路由至目标区域。因此, 即使外部环境变化, FMF 中两种模式携带的两组信号仍能以大容量平稳传输, 并在设计位置准确接收 (鲁棒性评估的数值仿真详情见附录 A 中的第 S7 节)。

2.3. NMR 的实验与光学表征

为验证该方法的可行性, 本文制作了超表面并搭建光路, 表征其光学响应以实现光纤模式路由 (超表面制作详情见附录 A 中的第 S8 节)。实验装置如图 3 (a) 所示。可调谐激光源 (TLX1, 美国 Thorlabs 公司) 提供工作波长为 1550 nm 的光。采用熔融型光纤模式耦合器生成 FMF 中传输的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式。FMF 的模式光场通过透镜

(PAF2-2C, Thorlabs 公司) 准直, 其发散角小于 0.2° , 在短距离内可忽略不计。透镜出射光从 1cm 远处入射至超表面。近红外探测卡 (VRC4, Thorlabs 公司) 沿光轴放置在距超表面 1 cm 处, 中间贴有黑色卡纸 (长和宽均为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$) 以防止探测零级光。

图 3 (b) 和 (c) 展示了 LP_{01} 和 LP_{11} 模式入射时在自由空间中的衍射光斑分布, 包含目标光斑和串扰光斑。由于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式并非完美的圆偏振, 其包含左旋和右旋圆偏振光, 导致每种模式的目标光斑均有与零级光斑相对称的共轭光斑。可利用起偏器和四分之一波片将模式的偏振态转换为完美的圆偏振, 从而消除共轭光斑。在模式衍射光斑分布中, 将另一模式目标位置处的光斑定义为串扰光斑。在图 3 (b) 和 (c) 中, 虚线勾勒出探测卡中间黑色卡纸的边缘。此外, 将另一块红外探测板 (IRDC1-200S-M-SP230614, 深圳市麓邦技术有限公司) 放置在距超表面 10 cm 处, 以捕获更远距离处的衍射分布。测得其中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的目标光斑与零级光斑之间的距离分别为 4.1 cm 和 5.2 cm, 对应衍射角分别为 22.3° 和 27.5° 。这些结果与理论仿真数值 (4.0 cm、5.1 cm、 21.9° 和 27.1°) 吻合。

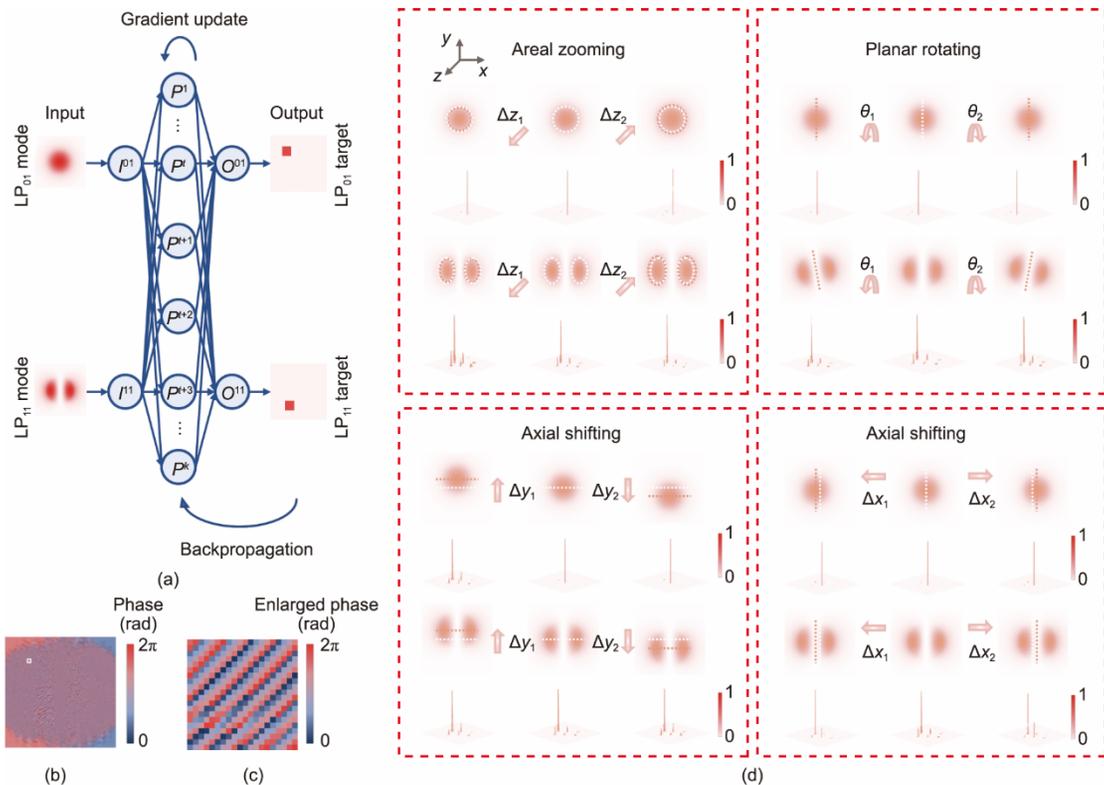


图 2. 集成于光纤通信系统的 NMR 优化架构与结果。(a) 用于优化 NMR 的神经网络架构; (b) NMR 的相位分布; (c) 图 (b) 左上角白色框内放大后的相位分布 (20×20 像素); (d) 用于鲁棒性评估的 NMR 数值仿真结果。在面积缩放方面, 白色和红色虚线分别标出了标准模式场和变换模式场的区域 (强度超过归一化 $1/e$ 水平)。对于平面旋转, 白色和红色虚线分别表示标准模式场和变换模式场的中心轴线。在 x 轴偏移时, 白色和红色虚线分别表示沿 y 轴的标准模式场和变换模式场的中心轴线; y 轴偏移时, 虚线表示沿 x 轴的中心轴线。 Δx_1 和 Δx_2 分别为沿 x 轴正、负方向偏移的尺度; Δy_1 和 Δy_2 分别为沿 y 轴正、负方向偏移的尺度; Δz_1 和 Δz_2 为面积缩放的尺度; θ_1 和 θ_2 为平面旋转的角度。输入模式与输出平面的能量均已归一化。 P^i : NMR 中第 i 个神经元的相位; P^k : NMR 中第 k 个神经元的相位。

为确定超表面的插入损耗和串扰，本文使用放置在距超表面 4 cm 处的光电二极管功率传感器（S122C，Thorlabs 公司），结合数字光功率和能量计（PM100D，Thorlabs 公司）测量目标光斑的功率。测得入射至准直透镜的 LP_{01} 模式功率为 10.7 dBm， LP_{11} 模式功率为 6.8 dBm。如图 3 (b) 和 (c) 所示， LP_{01} 模式入射时，测得目标光斑和串扰光斑的功率分别为 -1.3 dBm 和 -5.9 dBm； LP_{11} 模式入射时，其功率分别为 -6.6 dBm 和 -10.6 dBm。因此，计算超表面对 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的插入损耗分别为 -12.0 dB 和 -13.4 dB，与小型化器件的常见数值相近。此外，由于模式入射至超表面时在硅/空气界面发生反射，存在一定的能量损失，根据空气和硅的折射率计算该损失为 1.6 dB。因此，扣除反射损失后，超表面对于 LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式的插入损耗分别为 -10.4 dB 和 -11.8 dB。此外，超表面关于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的串扰值分别为 -4.6 dB 和 -4.0 dB。

为实验评估 NMR 的鲁棒性，本文将对应于图 3 (b) 和 (c) 所示光斑分布的光路状态定为标准状态。基于此，

对光路进行平移，以观察 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的目标光斑功率变化（即光路标准状态和变换状态下目标光斑能量的差异）。为实现模式的轴向平移和面积缩放，沿 x 轴、 y 轴和 z 轴平移超表面。由于光路需要对准，而通过旋转准直透镜来旋转模式分布会导致一定程度的失准，因此本文未采用该维度的变换进行实验验证。沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的平移单位分别设为 50 μm 、100 μm 和 1 mm。如图 3 (d) 和 (e) 所示， LP_{01} 和 LP_{11} 模式的目标光斑功率分别随三个轴向的平移而变化。在正、负方向一个单位范围内，两种模式在三个轴向平移中的目标光斑功率变化均保持在 0.2 dB 以下。此外，在两个单位范围内，两种模式的功率变化均小于 1 dB。再者，在三个单位范围内，功率衰减均保持在 3 dB 以内。

实验结果表明，该超表面实现了 FMF 两种模式的空间分离，具备分离准确、串扰较低且具有一定鲁棒性的特征。由此证明，该超表面是一种理想且优越的光纤模式路由器候选方案，可集成至光纤通信系统中。

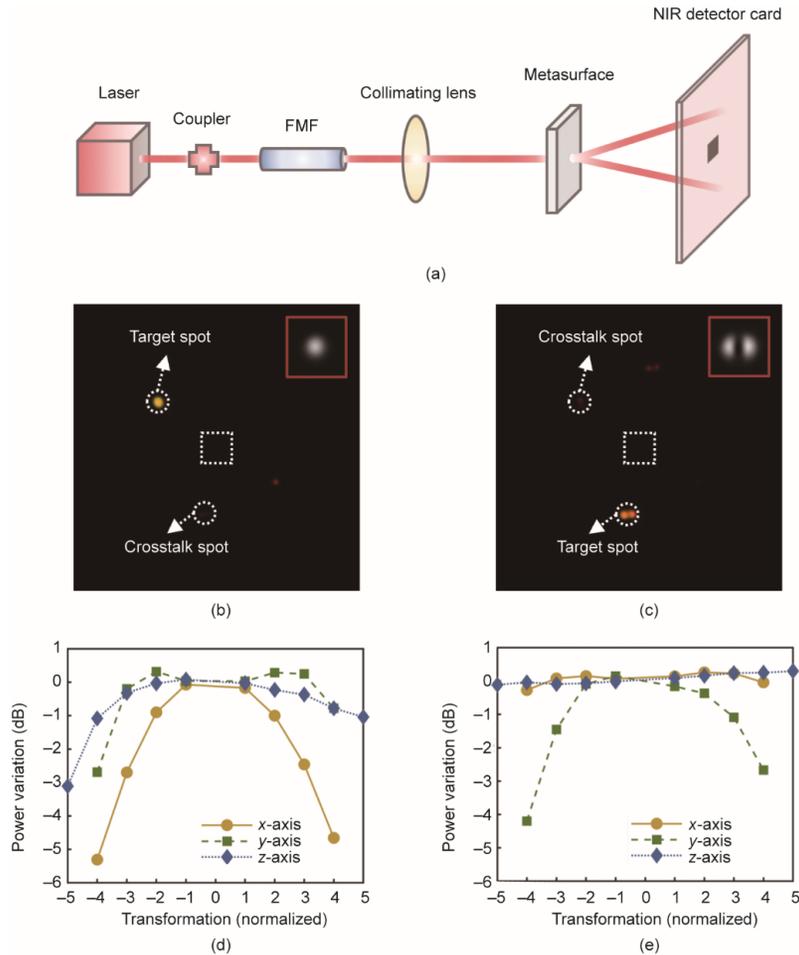


图 3. 用于光纤模式分离的 NMR 实验装置与结果。(a) 用于记录超表面在两种模式入射下衍射光斑分布的光学装置。(b) LP_{01} 模入射时的衍射光斑分布。(c) LP_{11} 模入射时的衍射光斑分布。插图为红外相机记录的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式横向场分布。中部虚线标示黑色卡纸边缘。(d) LP_{01} 模入射时目标光斑功率随位置移动的变化。(e) LP_{11} 模入射时目标光斑功率随位置移动的变化。NIR: 近红外。

2.4. 基于NMR的光通信系统实施

为说明本文方法的实用性，本文将NMR应用于MDM通信系统，并搭建信号传输平台以验证NMR的通信能力。如图4(a)所示，信号传输过程始于任意波形发生器(AWG)，生成长度为 $2^{31}-1$ 比特的同相位(I)和正交(Q)输入，采样率为 $120\text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ (每秒千兆采样次数)。同时，外腔激光器(ECL)提供 1550 nm 红外通信波长的光载波。这些输入随后通过IQ调制器进行相干调制，产生双偏振正交相移键控(DP-QPSK)信号。经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后，信号通过光延迟线(DL)分为两路，分别送入发射光纤，每路信号的功率为 17.5 dBm 。关键在于，双模通道可实现容量 50 Gbps 的两路信号并行传输，使MDM通信的总容量达到 100 Gbps 。

基于上述空间光路，光信号通过熔融型光纤模式耦合器接入FMF。FMF中的信号首先经透镜(记为“Col”)准直，后经超表面分离，实现从一路到两路的模式路由。因此，通过NMR， LP_{01} 和 LP_{11} 模式携带的信号经不同空间路径传输，后由不同空间位置的Col耦合至接收光纤中。

在信号接收端，本文测试了两根接收光纤的输出功率，以预估通道可实现的传输容量。当两路信号均送入FMF时， LP_{01} 模式的接收光纤输出功率为 -2.1 dBm ， LP_{11} 模式的接收光纤输出功率为 -6.6 dBm 。当 LP_{01} 模式携带的信号接入FMF时， LP_{01} 和 LP_{11} 模式的接收光纤输出功率分别为 -3.0 dBm 和 -12.1 dBm 。相反，当 LP_{11} 模式携带的信号接入FMF时， LP_{01} 和 LP_{11} 模式的接收光纤输出功率分别为 -15.3 dBm 和 -7.8 dBm 。由于模式耦合配置中熔融型光纤模式耦合器的不足，接收光纤中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式的输出功率存在差异。为观察误码率(BER)变化曲线，使用可变光衰减器(VOA)调整接收光功率。最终，接收的光信号由相干接收机解调，然后由采样率为 $256\text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数字存储示波器(DSO)显示。

图4(b)和(c)分别显示了 LP_{01} 和 LP_{11} 模式在双通道和单通道信号传输中，测得的信号BER随接收光功率的变化曲线。在接收功率为 -25.5 dBm 时，单通道传输下 LP_{01} 模式的BER低至 0.0011 ，双通道传输下 LP_{11} 模式的BER最高为 0.0033 。如图4(b)和(c)中箭头所示，

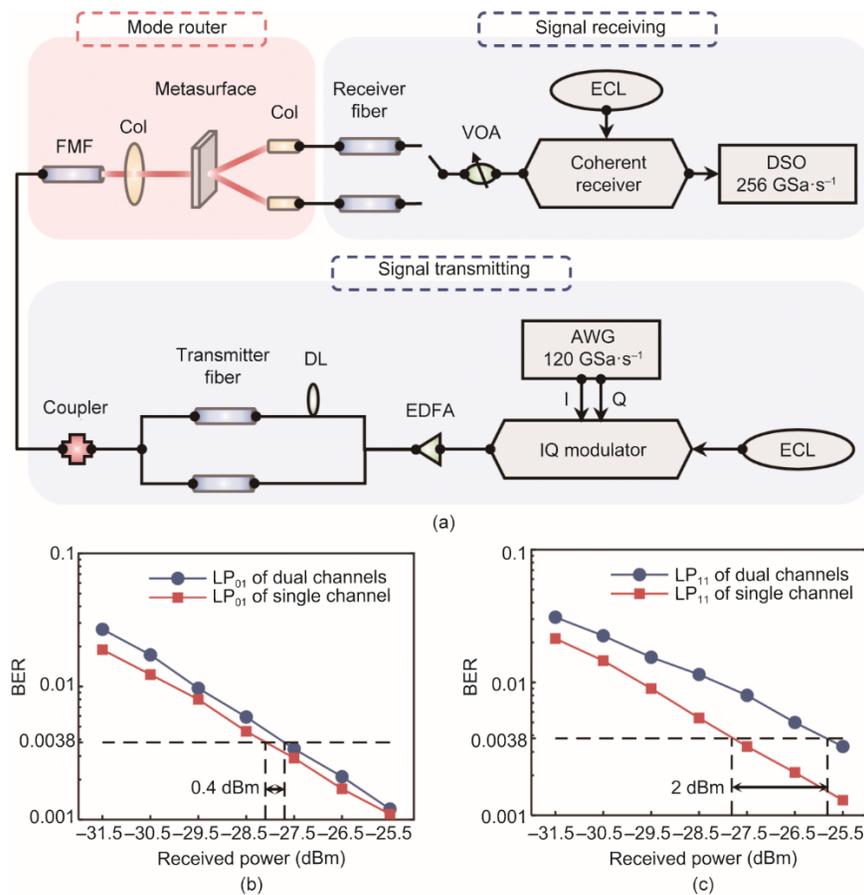


图4. 基于NMR的光通信系统在FMF两种传输模式下的实验配置与结果。(a) MDM通信的光学配置与实验装置；(b) LP_{01} 模式下双通道与单通道信号传输的实测BER随接收光功率变化的曲线；(c) LP_{11} 模式下双通道与单通道信号传输的实测BER随接收光功率变化的曲线。DSO: 数字存储示波器；ECL: 外腔激光器；VOA: 可调光衰减器；Col: 准直透镜；DL: 延迟线；EDFA: 掺铒光纤放大器；AWG: 任意波形发生器；I: 同相分量；Q: 正交分量；BER: 误码率； $\text{GSa}\cdot\text{s}^{-1}$: 每秒千兆采样次数。

在硬判决前向纠错 (HDFEC) 的阈值 0.0038 下, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的接收灵敏度代价分别为 0.4 dB 和 2.0 dB, 这对于容量为 100 Gbps 的 MDM 通信是可接受的。此外, 显然 NMR 对两种模式的性能一致, 其 BER 变化曲线的范围和幅度相近。值得注意的是, 本文建立的通信平台仅包含基本的信号调制、解调、放大和衰减器件、必要的发射和接收线路以及所设计的 NMR。如前所述, 在多模光纤的 MDM 传输中, 由于路径存在显著空间重叠, 信号在传输过程中易发生模式间随机耦合, 因此接收端需采用多输入多输出数字信号处理技术进行均衡, 以减轻线性损伤。重要的是, 本文的平台实现了并行且独立的双数据集传输, 无需任何补偿技术或相关器件, 大幅降低了设计复杂度, 同时保持了系统性能。

2.5. 基于 NMR 的光通信系统应用

为证明 NMR 集成式 MDM 通信系统的通用性和灵活性, 本文传输了多种表现形式的图像以评估传输性能 (图像与比特流的转换详情见附录 A 中的第 S9 节)。两组含不同信息的图像分别在 LP_{01} 和 LP_{11} 模式通道中传输。如

图 5 (a) 所示, 每组包含 7 幅图像, 呈现三种表现形式: 二进制、灰度和彩色, 依次编号为 1~7。 LP_{01} 通道传输的图像包括武汉大学校徽的二进制图像、武汉大学官网的二维码二进制图像、猫的灰度图像以及表情符号的彩色图像。 LP_{11} 通道传输的图像包括电子信息学院院徽的二进制图像、电子信息学院官网的二维码二进制图像、狗的灰度图像以及表情符号的彩色图像。

如图 5 (a) 所示, 从主观角度看, 对比传输图像和原始图像, 接收到的图像仅有少量像素失真。本文采用客观指标评估接收图像的质量, 测量了信号的 BER, 并计算了接收图像中的像素误差, 如图 5 (b) 和 (c) 所示 (图像评估详情见附录 A 中的第 S10 节)。即使在外部环境扰动和传输功率波动下, 测得的最低 BER 为 0.000156, 最高为 0.0068。这些结果表明, 两组图像通过 FMF 和 NMR 成功从发射模块并行且独立传输到接收模块。

实验结果表明, NMR 系统成功在 FMF 的两个模式通道中实现了 MDM 通信。所提出的 NMR 系统具备三个关键特性: 低误码的精确信号传输、高容量的高效系统运行以及简洁设计的小型器件集成。

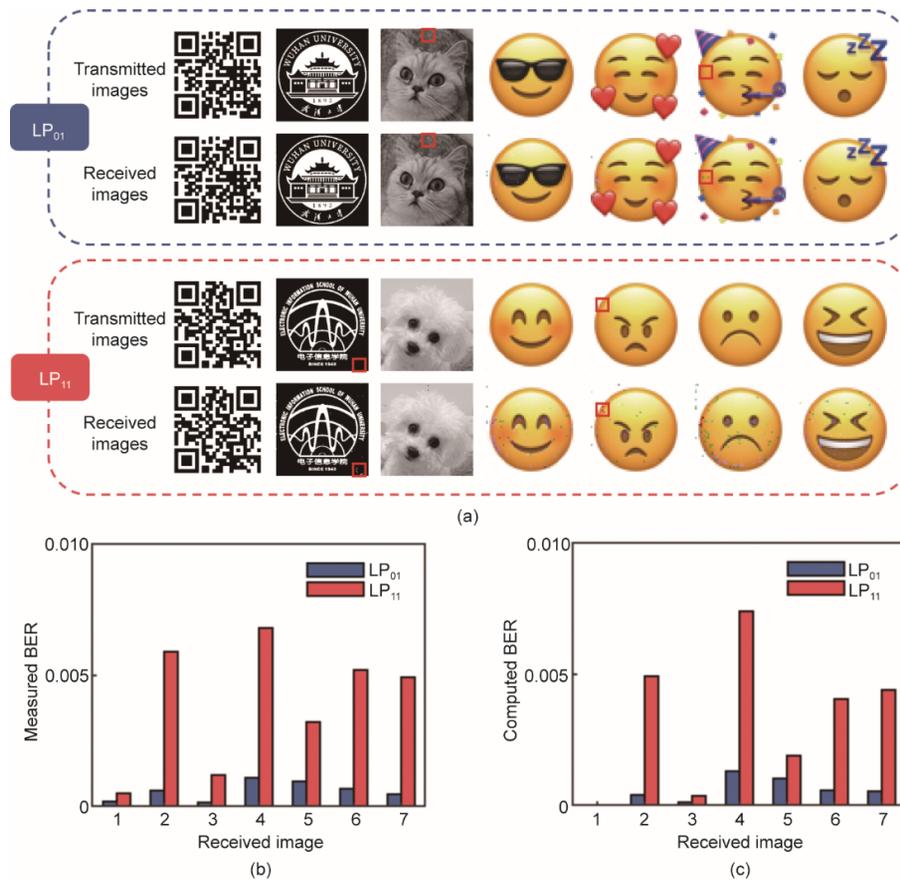


图 5. 基于 NMR 的光通信系统在 FMF 中传输两种模式的实际应用与结果。(a) LP_{01} 和 LP_{11} 模式下双通道信号传输的发送与接收图像集。红色方框标注了部分发射与接收图像间的像素误差作为示例。(b) LP_{01} 和 LP_{11} 模式下双通道信号传输的接收图像实测 BER。(c) LP_{01} 和 LP_{11} 模式下双通道信号传输的接收图像计算 BER。

3. 讨论

本文从理论上设计并实验验证了一种基于神经网络训练的超表面光纤模式路由框架，该框架具有系统兼容性、性能提升性、功能扩展性和器件紧凑性等优势。基于神经网络架构的计算能力和单层超表面的调制能力，理论上可针对更多模式扩展NMR的功能通道。例如，本文针对四种模式（ LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 和 LP_{21} 模式），采用了同样的优化过程。如图6（a）和（b）所示，四模式NMR可实现四种模式的空间分离，且尺寸与双模NMR相同。本质上，除优化过程外，纳米结构设计、制造工艺和系统配置可普遍适用于多模式NMR。

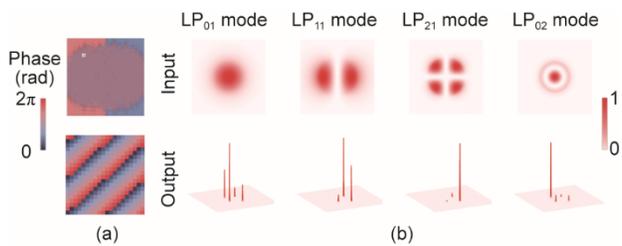


图6. 四模式NMR优化结果。(a) NMR相位分布图；左上角白色方框内放大后的相位分布（ 20×20 像素）。(b) NMR空间模式分离的数值仿真结果。输入模式与输出平面的能量均已归一化处理。

与传统光电解复用器件相比，本研究工作中的NMR完全以光形式运行，且高度集成于通信系统，实现光速传输和数据传输，同时保持超紧凑架构和超简洁设计。值得注意的是，该系统未采用任何补偿技术或相关器件，仅包含基本的信号调制、放大和衰减器件、必要的发射和接收线路以及所提出的NMR。此外，本研究方案在模式分离和信号传输方面表现优秀，具有高传输容量和低信号误差。并且，针对一定范围内的变换模式仍能进行有效分离，确保了鲁棒性和简洁性。本文从功能性、扩展性、构造和实施等多个角度将本研究与以往类似系统进行了对比分析（研究工作对比详情见附录A中的第S11节）。

此外，通过考虑超表面的调制维度、光纤中的传输模式和通信中的集成器件，可从多个方向扩展其功能通道。特别是，偏振敏感超表面能够独立且同步地实现两个正交偏振方向上光场模式的相位调制，从而实现光纤偏振模式的分离与偏振复用方案的结合。此外，由于超表面在其带宽范围内具有光学响应和调制能力，该系统有望进一步融入波分复用方案，即通过周期性调节入射光波长，在不同波长通道中传输多样化信息，这将显著提升传输容量。

4. 结论

本研究提出的架构融合了超表面、深度学习和光纤通信，为多种新兴应用（包括目标分类、图像显示和信息加密）中的高质量路由器提供了实用方案。超表面器件在多个方面具备扩展性。首先，可基于强度分布、相位分布和偏振方向增加FMF中传输模式的多样性。其次，超表面可采用多种调制自由度，包括幅度、相位、频率、光谱、偏振和轨道角动量。再次，超表面可集成至现有通信器件（如光纤和波导）。因此，可开发超紧凑、高质量、多功能的神经超表面平台，以替代各类传统的数据处理和信息传输器件。

致谢

本研究得到国家重点研发计划（2023YFB2804704）和国家自然科学基金（12174292、12374278、62105250）的支持。

Compliance with ethics guidelines

Yu Zhao, Huijiao Wang, Zile Li, Tian Huang, Chao Yang, Ying Qiu, Yuhan Gong, Zhou Zhou, Congling Liang, Lei Yu, Jin Tao, Shaohua Yu, and Guoxing Zheng declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.012>.

References

- [1] Mahdavinejad MS, Rezvan M, Barekatin M, Adibi P, Barnaghi P, Sheth AP. Machine learning for Internet of Things data analysis: a survey. *Digit Commun Netw* 2018;4(3):161–75.
- [2] Stergiou C, Psannis KE, Kim BG, Gupta B. Secure integration of IoT and cloud computing. *Future Gener Comput Syst* 2018;78(3):964–75.
- [3] Richardson DJ, Fini JM, Nelson LE. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nat Photonics* 2013;7(5):354–62.
- [4] Li G, Bai N, Zhao N, Xia C. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication. *Adv Opt Photonics* 2014;6(4):413–87.
- [5] Rademacher G, Puttnam BJ, Luis RS, Eriksson TA, Fontaine NK, Mazur M, et al. Peta-bit-per-second optical communications system using a standard cladding diameter 15-mode fiber. *Nat Commun* 2021;12:4238–44.
- [6] Kong D, Jørgensen AA, Henriksen MR, Klefs J, Ye Z, Helgason ÖB, et al.

- Single dark-pulse Kerr comb supporting 1.84 Pbit/s transmission over 37-core fiber. In: Proceedings of 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics; 2020 May 10–15; JoseSan, CA, USA. New York City: IEEE; 2020. p. 1–2.
- [7] Rademacher G, Puttnam BJ, Luis RS, Sakaguchi J, Klaus W, Eriksson TA, et al. 10.66 peta-bit/s transmission over a 38-core-three-mode fiber. In: Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition; 2020 Mar 8–12; DiegoSan, CA, USA. New York City: IEEE; 2020. p. 1–3.
- [8] Luis RS, Rademacher G, Puttnam BJ, Eriksson TA, Furukawa H, Ross-Adams A, et al. 1.2 Pb/s throughput transmission using a 160 lm cladding, 4-core, 3-mode fiber. *J Lightwave Technol* 2019;37(8):1798–804.
- [9] Benedikovic D, Cheben P, Schmid JH, Xu DX, Lapointe J, Wang S, et al. High-efficiency single etch step apodized surface grating coupler using subwavelength structure. *Laser Photonics Rev* 2014;8(6):93–7.
- [10] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, Matsui T, Tsujikawa K, Koshiba M, et al. Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission. *Opt Express* 2014;22(24):29321–30.
- [11] Wu Y, Chiang KS. Ultra-broadband mode multiplexers based on three-dimensional asymmetric waveguide branches. *Opt Lett* 2017;42(3):407–10.
- [12] Huang Q, Wu Y, Jin W, Chiang KS. Mode multiplexer with cascaded vertical asymmetric waveguide directional couplers. *J Lightwave Technol* 2018;36(14):2903–11.
- [13] Shen W, Du J, Xiong J, Ma L, He Z. Silicon-integrated dual-mode fiber-to-chip edge coupler for 2 100 Gbps/lambd MDM optical interconnection. *Opt Express* 2020;28(22):33254–62.
- [14] Labroille G, Denolle B, Jian P, Genevaux P, Treps N, Morizur JF. Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion. *Opt Express* 2014;22(13):15599–606.
- [15] Fontaine NK, Ryf R, Chen H, Neilson DT, Kim K, Carpenter J. Multi-plane light conversion of high spatial mode count. In: Proceedings of SPIE Laser Beam Shaping XVIII; 2018 Sep 14; San Diego, CA, USA. SPIE; 2018. p. 107440M. 1-6.
- [16] Velázquez-Benitez AM, Antonio-López JE, Alvarado-Zacarias JC, Fontaine NK, Ryf R, Chen H, et al. Scaling photonic lanterns for spacedivision multiplexing. *Sci Rep* 2018;8:8897.
- [17] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014;13(2):139–50.
- [18] Zhang F, Guo Y, Pu M, Chen L, Xu M, Liao M, et al. Meta-optics empowered vector visual cryptography for high security and rapid decryption. *Nat Commun* 2023;14:1946.
- [19] Wen D, Pan K, Meng J, Wu X, Guo X, Li P, et al. Broadband multichannel cylindrical vector beam generation by a single metasurface. *Laser Photonics Rev* 2022;16(10):2200206.
- [20] Li J, Wang Y, Chen C, Fu R, Zhou Z, Li Z, et al. From lingering to rift: metasurface decoupling for near- and far-field functionalization. *Adv Mater* 2021;33(16):2007507.
- [21] Chen MK, Liu X, Wu Y, Zhang J, Yuan J, Zhang Z, et al. A meta-device for intelligent depth perception. *Adv Mater* 2023;35(34):2107465.
- [22] Zhou Z, Wang Y, Chen C, Fu R, Guan Z, Li Z, et al. Multifold integration of printed and holographic meta-image displays enabled by dual-degeneracy. *Small* 2022;18(13):2106148.
- [23] Cai G, Li Y, Zhang Y, Jiang X, Chen Y, Qu G, et al. Compact angle-resolved metasurface spectrometer. *Nat Mater* 2024;23(1):71–8.
- [24] Liang X, Zhou Z, Li Z, Li J, Peng C, Cui H, et al. All-optical multiplexed meta-differentiator for tri-mode surface morphology observation. *Adv Mater* 2023;35(29):2301505.
- [25] Yang Z, Huang PS, Lin YT, Qin H, Zúñiga-Pérez J, Shi Y, et al. Creating pairs of exceptional points for arbitrary polarization control: asymmetric vectorial wavefront modulation. *Nat Commun* 2024;15:232.
- [26] Intaravanne Y, Wang R, Ahmed H, Ming Y, Zheng Y, Zhou ZK, et al. Color-selective three-dimensional polarization structures. *Light Sci Appl* 2022;11:302.
- [27] Feng Z, Shi T, Geng G, Li J, Deng ZL, Kivshar Y, et al. Dual-band polarized upconversion photoluminescence enhanced by resonant dielectric metasurfaces. *eLight* 2023;3:21.
- [28] Guo X, Zhong J, Li B, Qi S, Li Y, Li P, et al. Full-color holographic display and encryption with full-polarization degree of freedom. *Adv Mater* 2022;34(3):2103192.
- [29] Mao N, Zhang G, Tang Y, Li Y, Hu Z, Zhang X, et al. Nonlinear vectorial holography with quad-atom metasurfaces. *Appl Phys Sci* 2022;119(22):e2204418119.
- [30] Song M, Feng L, Huo P, Liu M, Huang C, Yan F, et al. Versatile full-colour nanopainting enabled by a pixelated plasmonic metasurface. *Nat Nanotechnol* 2023;18(1):71–8.
- [31] Feng F, Si G, Min C, Yuan X, Somekh M. On-chip plasmonic spin-hall nanograting for simultaneously detecting phase and polarization singularities. *Light Sci Appl* 2020;9:95.
- [32] Kim J, Seong J, Kim W, Lee GY, Kim S, Kim H, et al. Scalable manufacturing of high-index atomic layer-polymer hybrid metasurfaces for metaphotonics in the visible. *Nat Mater* 2023;22(4):474–81.
- [33] Xiao X, Zhao Y, Ye X, Chen C, Lu X, Rong Y, et al. Large-scale achromatic flat lens by light frequency-domain coherence optimization. *Light Sci Appl* 2022;11:323.
- [34] Qu G, Yang W, Song Q, Liu Y, Qiu CW, Han J, et al. Reprogrammable meta-hologram for optical encryption. *Nat Commun* 2020;11:5484.
- [35] Tao J, You Q, Li Z, Luo M, Liu Z, Qiu Y, et al. Mass-manufactured beam-steering metasurfaces for high-speed full-duplex optical wireless-broadcasting communications. *Adv Mater* 2022;34(6):2106080.
- [36] Zhang XG, Sun YL, Zhu B, Jiang WX, Yu Q, Tian HW, et al. A metasurface-based light-to-microwave transmitter for hybrid wireless communications. *Light Sci Appl* 2022;11:126.
- [37] Ouyang X, Xu Y, Xian M, Feng Z, Zhu L, Cao Y, et al. Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photonics* 2021;15(12):901–7.
- [38] Kruk S, Ferreira F, Mac Suibhne N, Tsekrekos C, Kravchenko I, Ellis A, et al. Transparent dielectric metasurfaces for spatial mode multiplexing. *Laser Photonics Rev* 2018;12(8):1800031.
- [39] Nazemosadat E, Mazur M, Kruk S, Kravchenko I, Carpenter J, Schröder J, et al. Dielectric broadband metasurfaces for fiber mode-multiplexed communications. *Adv Opt Mater* 2019;7(14):1801679.
- [40] Tao J, Wu L, Yang Y, Liu Z, Qiu Y, Zheng G, et al. Light spin angular momentum spatial mode converter based on dielectric metasurface. *J Lightwave Technol* 2021;39(8):2438–42.
- [41] Oh J, Li K, Yang J, Chen WT, Li MJ, Dainese P, et al. Adjoint-optimized metasurfaces for compact mode-division multiplexing. *ACS Photonics* 2022;9(3):929–37.
- [42] Chen R, Chang Y, Zhuang Z, Liu Y, Chen W, Dong J. Metasurface-based fiber-to-chip multiplexing coupler. *Adv Opt Mater* 2023;11(6):2202317.
- [43] Wright LG, Onodera T, Stein MM, Wang T, Schachter DT, Hu Z, et al. Deep physical neural networks trained with backpropagation. *Nature* 2022;601(7894):549–59.
- [44] Lin X, Rivenson Y, Yardimci NT, Veli M, Luo Y, Jarrahi M, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks. *Science* 2018;361(6406):1004–8.
- [45] Lillicrap TP, Santoro A, Marris L, Akerman CJ, Hinton G. Backpropagation and the brain. *Nat Rev Neurosci* 2020;21(6):335–46.
- [46] Qian C, Wang Z, Qian H, Cai T, Zheng B, Lin X, et al. Dynamic recognition and mirage using neuro-metamaterials. *Nat Commun* 2022;13:2694.
- [47] Bai B, Luo Y, Gan T, Hu J, Li Y, Zhao Y, et al. To image, or not to image: class-specific diffractive cameras with all-optical erasure of undesired objects. *eLight* 2022;2:14.
- [48] Luo Y, Meng D, Yardimci NT, Rivenson Y, Veli M, Jarrahi M, et al. Design of task-specific optical systems using broadband diffractive neural networks. *Light Sci Appl* 2019;8:112.
- [49] Luo X, Hu Y, Ou X, Li X, Lai J, Liu N, et al. Metasurface-enabled on-chip multiplexed diffractive neural networks in the visible. *Light Sci Appl* 2022;11:158.
- [50] Goi E, Chen X, Zhang Q, Cumming BP, Schoenhardt S, Luan H, et al. Nanoprinted high-neuron-density optical linear perceptrons performing near-infrared inference on a CMOS chip. *Light Sci Appl* 2021;10:40.
- [51] Getman F, Makarenko M, Burguete-Lopez A, Fratallocchi A. Broadband vectorial ultrathin optics with experimental efficiency up to 99% in the visible region via universal approximators. *Light Sci Appl* 2021;10:47.
- [52] Luo Y, Zhao Y, Li J, Çetintas E, Rivenson Y, Jarrahi M, et al. Computational imaging without a computer: seeing through random diffusers at the speed of light. *eLight* 2022;2:4.
- [53] So S, Kim J, Badloe T, Lee C, Yang Y, Kang H, et al. Multicolor and 3D holography generated by inverse-designed single-cell metasurfaces. *Adv Mater* 2023;35(17):2208520.