

文章编号 1004-924X(2026)09-1453-15

基于通道注意力增强网络的高效消色差 超透镜逆向设计

容仕翰^{1,2,3}, 王启安^{1,2,3}, 蔡云霄^{1,3}, 张琬皎^{1,3*}, 徐卫明^{1,2,3}, 张楠^{4*}

- (1. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;
2. 中国科学院 上海技术物理研究所 空间有源光电子技术重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 北京理工大学 光电学院 混合现实与先进显示工程研究中心, 北京 100081)

摘要:超单元相位光谱响应的快速精准预测是超透镜逆向设计的关键, 针对传统电磁仿真方法存在计算成本高、效率低, 且难以满足超表面器件智能设计需求的问题, 提出一种基于通道注意力机制的卷积神经网络(ECANet), 以实现像素化超单元结构的相位光谱前向预测。基于像素化超单元仿真数据集, 对ECANet进行训练与验证的结果表明, 模型在设计波段内的相位预测平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)低于0.06 rad; 将训练完成的ECANet嵌入粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法, 构建了高效的消色差超透镜逆向设计框架。仿真结果显示, 所设计的超透镜在工作波段内焦距波动小于2%, 实现了良好的消色差聚焦性能。该设计框架以ECANet的快速相位预测替代传统时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真, 使超透镜设计的整体计算效率提升约两个数量级, 在保证设计精度的同时大幅缩短研发周期。本研究为可见光超表面器件的高效智能设计提供了新的技术路径, 在集成光学、微型成像系统等领域具有良好的应用前景。

关键词:深度学习; 消色差超透镜; 逆向设计; 粒子群优化算法

中图分类号: TP391; TH703 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263409.1453

CSTR: 32169.14.OPE.20263409.1453

Inverse design of efficient achromatic metalens based on channel attention enhanced network

RONG Shihan^{1,2,3}, WANG Qi'an^{1,2,3}, CAI Yunxiao^{1,3}, ZHANG Wan-jiao^{1,3*},
XU Weiming^{1,2,3}, ZHANG Nan^{4*}

- (1. School of Physical and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study,
University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of
Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: nanzhang@bit.edu.cn

收稿日期: 2026-02-06; 修订日期: 2026-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62575023)

Abstract: Rapid and accurate prediction of the phase spectral response of meta-units is essential for the inverse design of metalenses. Conventional electromagnetic simulation methods are computationally intensive and inefficient, making them inadequate for the intelligent design of metasurface devices. To address this limitation, a convolutional neural network incorporating an efficient channel attention mechanism (ECANet) is proposed for forward prediction of the phase spectrum of pixelated meta-atom structures. Training and validation on a simulated dataset demonstrate that the mean absolute error of phase prediction within the design bandwidth is below 0.06 rad. The trained ECANet is further integrated into a particle swarm optimization (PSO) algorithm to establish an efficient inverse design framework for achromatic metalenses. Simulation results indicate that the designed metalens achieves a focal length variation of less than 2% across the operating bandwidth, demonstrating excellent achromatic focusing performance. By replacing conventional finite-difference time-domain (FDTD) simulations with rapid phase predictions from ECANet, the proposed framework improves computational efficiency by approximately two orders of magnitude while maintaining design accuracy. This work presents a novel and efficient approach for the intelligent design of pixelated metasurface devices in the visible regime, with significant potential for applications in integrated optics, micro-imaging systems, and related fields.

Key words: deep learning; achromatic metalens; inverse design; particle swarm optimization algorithm

1 引 言

超表面器件是由亚波长尺度纳米结构阵列构筑的新型平面光学器件,能够精准调控光的振幅、相位及偏振等特性,兼具多功能单片集成的核心优势,在 AR/VR 光学、生物传感、量子光子学与无线通信等前沿领域均展现出重要的应用价值^[1-16]。尽管超表面在微纳光子学领域展现出巨大应用潜力,但它在宽带光学场景中受固有色散效应的制约,影响了器件的成像质量与稳定性^[17-19]。为突破这一技术瓶颈,Wang 等提出一种相位补偿策略,该方法在一定带宽范围内可实现有效的消色差调控^[20],Hu 等人提出渐近色散工程方法,该方法可提供极大的设计自由度,可实现各种类型的定制色散方案^[21];Chi 等人提出了一种神经网络辅助的端到端设计方法,用于实现超表面器件的全光场控制^[22]。然而,为了获取覆盖宽带应用需求的群延迟调控范围,该策略往往依赖研究人员的人工经验设计并筛选多种规则构型的超单元,设计自由度受限且流程繁琐低效。时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)等仿真手段虽能精准计算超单元的光学响应,但迭代运算量大、仿真总耗时久,进一步制约了超表面器件的研发效率与设计周期^[1-2]。此外,该方案对

超单元的尺寸精度提出了较高的要求,这给超透镜的制造,尤其是大规模生产带来了巨大挑战。电子束光刻(Electron Beam Lithography, EBL)技术虽能满足消色差超透镜的高精度加工要求,但其逐点扫描模式难以适配大规模生产需求^[23]。标准半导体制备工艺(如深紫外(Deep Ultraviolet, DUV)光刻、蚀刻和薄膜沉积)可实现超透镜的规模化制备,但工艺流程复杂、成本高昂,并不适用于可见光波段超透镜的批量生产^[24-25]。纳米压印光刻(Nanoimprint Lithography, NIL)技术作为一步式微纳加工技术,为超透镜的低成本规模化生产提供了理想方案^[26-27],但该技术所用纳米压印胶的折射率(约为 1.9)显著低于可见光超透镜常用的 TiO_2 材料(约为 2.4)^[28-37],进一步增加了人工设计的难度,难以实现高性能超透镜的大批量研发目标。

近年来,深度学习技术凭借强大的非线性映射拟合能力,已成为微纳光子学领域加速器件设计流程的核心技术手段。深度学习模型可通过海量仿真数据集完成训练,高效学习超单元结构参数与电磁光谱响应之间的内在关联规律,实现毫秒级的光学响应前向预测,为解决传统仿真方法计算效率低下的问题提供了有效路径^[38-43]。在超表面设计相关研究中,全连接网络(Fully Connected Networks, FCNs)^[44-46]、生成对抗神经网络

(Generative Adversarial Networks, GANs)^[47-49]、双向神经网络(Bidirectional Neural Networks, BNNs)^[50]及神经张量网络(Neural Tensor Networks, NTNs)^[51-52]等多种模型被相继提出并应用。然而,FCNs参数量偏大,同时因缺乏对结构空间拓扑特征的有效提取能力,相位预测精度较低,且易出现过拟合问题,推理效率偏低^[53];GANs更适用于结构逆向生成场景,在光谱回归任务中易出现梯度消失问题,且参数量与推理耗时均较高^[54];BNNs与NTNs结构复杂、参数量庞大,训练收敛周期长,虽在预测精度上有一定优势,但推理效率不足。卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNNs)凭借空间特征提取的网络特性,在模型参数量、预测精度与推理速度上实现了相对均衡的表现,参数量相较于BNNs,NTNs更精简,推理速度更优,同时依托结构特征的有效挖掘,预测精度也优于FCNs, GANs在光谱回归任务中的表现,但其网络特性决定了对光谱序列全局依赖关系的捕捉能力不足,在宽带波长范围内难以精准拟合相位随波长连续变化的整体趋势。为此,通过引入注意力机制对CNNs进行性能增强,成为弥补其技术短板的有效方案。注意力机制可对卷积提取的高维特征进行自适应加权与筛选,强化对相位光谱预测贡献度高的关键特征,弱化冗余特征干扰,实现超表面结构的局部关键特征挖掘与光谱全局关联特征整合的双向优化^[55-57]。

本研究提出一种基于CNNs的深度学习框架,用于宽带消色差超透镜的高效精准逆向设计。首先,为适配折射率为1.9的纳米压印胶超单元设计需求,搭建了一个由不同拓扑构型的像素化超单元组成的数据集,包含像素化超单元的二维矩阵及其对应的FDTD仿真相位光谱数据,并构建了一个高效通道注意力(Efficient Channel Attention, ECA)增强机制的前向预测模型ECANet。ECANet以该数据集为输入,无需额外多结构适配模块,通过精简卷积特征提取层与ECA机制的协同作用,在保证模型轻量化的前提下,同步捕捉超单元的空间拓扑特征与相位光谱的全局变化规律。该模型结构简洁、参数量少且推理效率高,在设计波段内实现了优异的相位光谱预测精度,可作为超表面前向设计的高效

替代模拟器。随后,将ECANet与粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法集成,验证了该框架在宽带消色差超透镜设计中的可行性,为基于纳米压印技术的消色差超透镜快速研发提供了可靠的技术支撑。

2 基本原理

为构建超透镜的统一逆向设计框架,开发了基于ECA增强的网络模型ECANet,并将其与PSO策略相结合,如图1所示。

图1(a)展示了基于PSO的逆向设计优化框架,该框架嵌入预训练的ECANet模型,对候选超单元的相位响应进行快速预测,再将预测相位与理想目标相位进行误差计算,使该误差结果作为反馈传入PSO优化模块,驱动结构与参考相位迭代更新。通过多轮优化迭代,最终获得最优的超单元结构分布,经FDTD仿真验证,该超透镜能够实现有效的聚焦性能与色散控制,满足消色差设计需求。图1(b)呈现了ECANet的核心工作流程。该网络以 8×8 像素化超单元结构图案的二维矩阵为输入,经标准化预处理后,特征提取模块针对 8×8 网格图案进行高维特征挖掘与维度提升;随后,ECA增强模块作为网络的核心感知单元,设计兼顾通道关联捕捉与轻量化需求,通过自适应调整卷积核尺寸,实现对不同通道依赖关系的精准建模;最终,通过特征映射和输出解码,输出预测的相位光谱响应。图1(c)展示了消色差超透镜的聚焦机制:通过亚波长尺度纳米结构阵列的有序排布,对入射光波前的相位进行精准调制,使多波长入射光能够会聚于同一焦平面,实现消色差聚焦。

2.1 材料介绍

本研究采用一种纳米压印光刻胶(O2190),其成分包含丙烯酸酯聚合物、 TiO_2 纳米颗粒、硅灰石及甲基丙烯酸功能化硅灰石,对其进行表征以用于后续实验,相关结果见图2。其中,硅灰石与甲基丙烯酸功能化硅灰石的作用是增强光刻胶强度,减少收缩,提升显影对比度与基底附着力;而 TiO_2 纳米颗粒的作用是提高光刻胶的折射率,纳米颗粒的混合比例越高,光刻胶的折射率越大,但过高的混合比例会降低其流动性。因此,需选择最优的组分混合比例以平衡这两种性

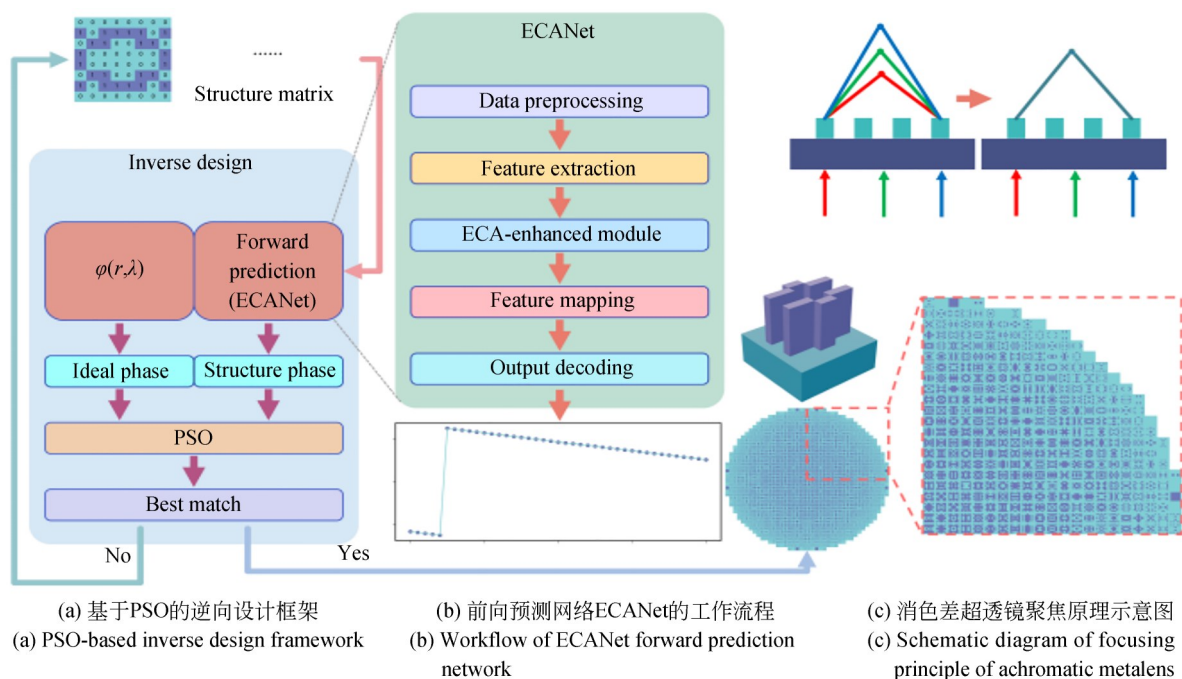


图1 基于ECANet前向建模与PSO优化的超透镜智能设计

Fig. 1 Intelligent design for metalenses based on ECANet forward modeling and PSO optimization

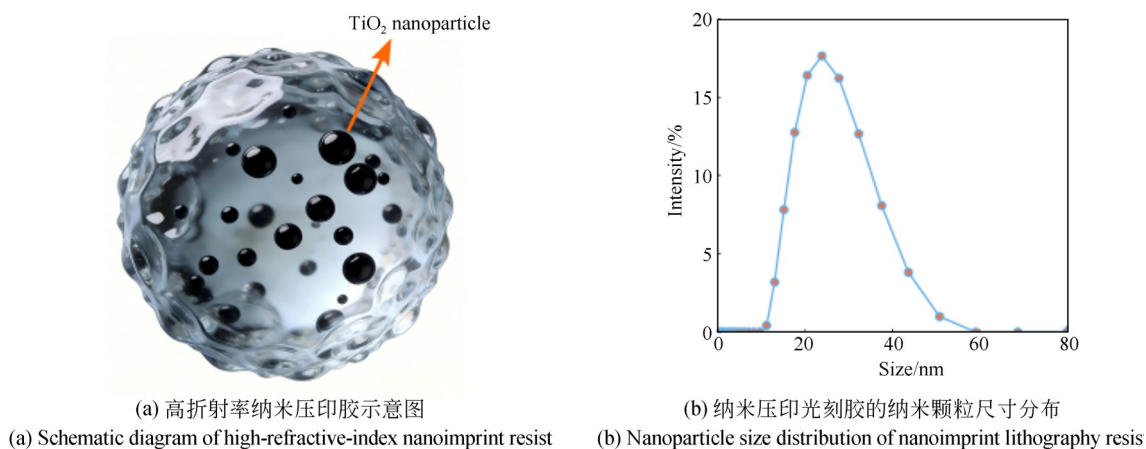


图2 高折射率纳米压印光刻胶(O2190)的光学表征结果

Fig. 2 Optical characterization results of high-refractive-index nanoimprint lithography resist (O2190)

能。为了在纳米压印过程中实现纳米结构(超原子)的有效填充,纳米颗粒需具备合适的尺寸。如图2(a)所示,该光刻胶中的 TiO_2 纳米颗粒尺寸分布在10~60 nm之间,平均尺寸为26 nm。这些纳米颗粒可均匀分散在聚合物基体中,确保纳米压印过程中纳米结构的完整填充与超原子结构的精准图案化。

通过椭偏仪(RC2-XI, J. A. Woolam公司)测量了该纳米压印光刻胶的折射率与消光系数,结果见图2(b)。在520~560 nm波长内,光刻胶的折射率为1.92~1.97,消光系数近乎为0,表明其无明显光吸收。

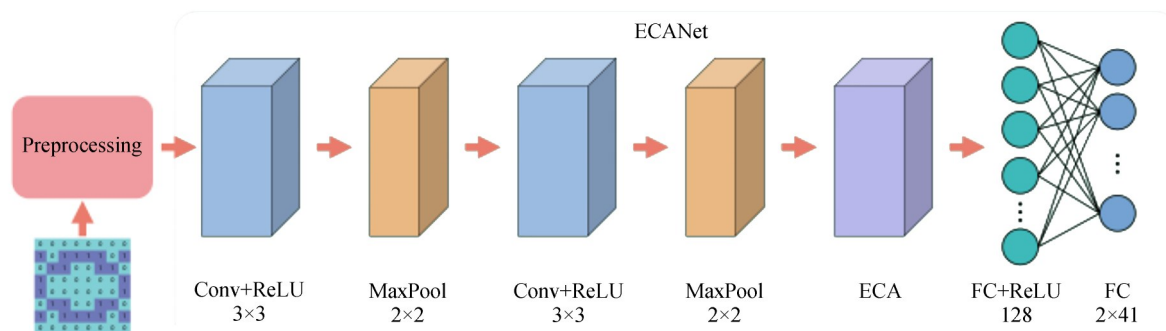
为进一步验证光透射率,将1 μm 厚的光刻胶薄膜旋涂在玻璃基底上,通过UV-Vis-NIR分光光度计(UV-3600 Plus, 岛津公司)测量了涂覆纳米压印胶基底与纯玻璃基底的透射率。如图2(c)所示,两者在480~640 nm内的透射率曲线高度重合:纯玻璃的平均透射率为82.29%,涂覆纳米压印胶基底的透射率为82.13%。这表明

1 μm 厚的光刻胶薄膜的透射率超过99%,证实其具备优异的可见光透射性能。

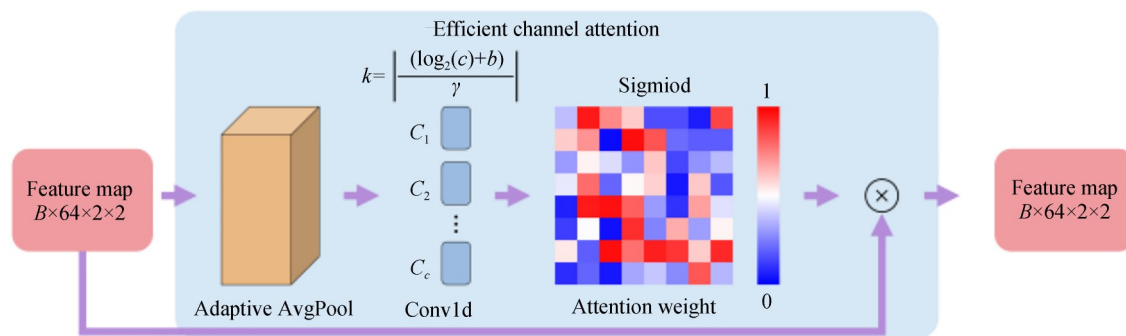
2.2 前向预测

为实现 8×8 网格图案与相位光谱响应的精准映射,提出一种高效通道注意力增强网络ECANet。该架构依托ECA的高效通道感知能力,在轻量化前提下捕捉光谱序列的非线性特征与通道间关联,其整体结构如图3所示。ECANet通过数据预处理、特征提取、ECA增强、特征映射及输出解码五大功能模块的协同作用,构建从图案特征到相位光谱的端到端预测链路,兼顾预测精度与计算效率,适配超单元前向预测的实际需求。

数据预处理模块为后续建模提供标准化输入。对于 8×8 网格图案输入,首先通过数据格式校验确保输入维度为 $1 \times 8 \times 8$ (通道数 $\times$ 高度 $\times$ 宽度),随后采用Min-Max归一化将图案像素值映射至 $[0, 1]$ 区间,消除量纲差异对模型训练的影响。对于标签相位数据,为消除相位缠



(a) ECANet整体架构
(a) Overall architecture of ECANet



(b) ECA增强模块结构
(b) Structure of ECA enhancement module

图3 前向预测网络ECANet的架构

Fig. 3 Architecture of ECANet forward prediction network

绕导致的模糊性,采用三角函数编码策略将原始相位 θ 转换为 x - y 投影特征对 $(\cos \theta, \sin \theta)$,该编码方式通过将周期性相位值映射到二维笛卡尔坐标系中的单位圆上,保留了相位的真实周期性信息。编码后的数据维度为 $2 \times N$ (N 为波长采样点数,本研究中 $N=41$,对应 520~560 nm 波长的等间隔采样),其中第一通道为余弦投影 (x 分量),第二通道为正弦投影 (y 分量),最后对 x - y 投影特征分别进行归一化处理,确保两通道特征处于相同数值范围,提升模型收敛效率。

特征提取模块针对预处理后的 8×8 网格图案进行高维特征挖掘与维度提升。首先,通过 3×3 卷积核的卷积层将 1 通道输入图案映射为 32 维特征图,卷积步长设为 1,填充方式为 SAME,确保特征图尺寸保持 8×8 ,以避免边缘信息丢失;经 ReLU 激活函数引入非线性后,通过 2×2 最大池化将特征图尺寸压缩至 4×4 ,提升特征密度与计算效率。随后,通过第二层卷积将特征维度提升至 64 维,再次经过 ReLU 激活与 2×2 最大池化,得到 $2 \times 2 \times 64$ 的高维特征表示。为缓解训练中的过拟合问题,该模块在每轮卷积与激活后引入 dropout 正则化,通过随机丢弃部分神经元抑制冗余特征学习,提升模型泛化能力。

ECA 增强模块是网络的核心感知单元,其设计兼顾通道关联捕捉与轻量化需求,通过自适应调整卷积核尺寸,实现对不同通道依赖关系的精准建模。如图 3(b) 所示,该模块首先对 $2 \times 2 \times 64$ 的输入特征图进行全局自适应平均池化,将空间维度压缩为 1×1 ,生成 64 维通道特征向量,聚合每个通道的全局信息,再基于通道数自适应计算一维卷积核尺寸 k ,计算公式为:

$$k = \left\lceil \frac{(\log_2(c) + b)}{\gamma} \right\rceil, \quad (1)$$

其中: $c=64$ 为通道数, $\gamma=2$, $b=1$ 为 ECA 机制的核心超参数,前者用于调节通道数与卷积核尺寸的映射比例,控制 k 值随通道数变化的速率,后者作为偏置项微调 k 值结果,两者共同确保卷积核尺寸与通道依赖范围匹配;通过该一维卷积对通道特征向量进行非线性转换,捕捉通道间的局部关联;最后经 Sigmoid 激活函数将特征向量映射

为 $[0, 1]$ 区间的通道注意力权重,将权重值广播至原始特征图的通道维度,通过逐元素相乘实现对关键通道特征的增强与冗余通道的抑制。此机制无需降维操作,避免特征信息丢失,同时大幅降低计算开销,使网络能精准聚焦与相位光谱响应强相关的通道特征,为后续特征映射提供高辨识度输入。

特征映射模块将注意力增强后的高维特征转换为与相位光谱匹配的输出维度。首先,将 $2 \times 2 \times 64$ 的特征图展平为 256 维一维向量,通过第一层全连接层将其映射为 128 维隐藏特征,经 ReLU 激活函数引入非线性表达能力,同时通过 dropout 正则化进一步抑制过拟合,避免模型在训练集上过度拟合噪声信息。随后,通过第二层全连接层将 128 维隐藏特征映射为 2×41 的输出向量,对应 x - y 投影特征的预测结果,完成从图案高维特征到相位光谱特征的端到端映射。

输出解码模块负责相位恢复与模型训练引导。为从预测的 x - y 投影特征中恢复原始相位信息,采用相位解码机制,通过反正切函数计算得到相位值 $\theta_{\text{pred}} = \arctan 2(y_{\text{pred}}, x_{\text{pred}})$,其中 x_{pred} 和 y_{pred} 分别为模型预测的余弦投影和正弦投影值, θ_{pred} 为解码后的预测相位。

由于超单元相位预测的核心需求是降低整体误差,网络采用 L1 损失 (MAE) 作为训练损失函数,定义为:

$$L_{\text{MAE}} = \frac{1}{M \times 2 \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^N |O_{i,j,k} - T_{i,j,k}|, \quad (2)$$

其中: M 为批量样本数, $O_{i,j,k}$ 为模型预测的 x - y 投影值, $T_{i,j,k}$ 为编码后的真实 x - y 投影值, $j=1, 2$ 分别对应 x 通道和 y 通道, $N=41$ 为波长采样点数。模型性能的定量评估采用解码后相位的平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE), 计算方式为:

$$E_{\text{CANet}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N |\theta_{\text{pred}}(i, k) - \theta_{\text{true}}(i, k)|, \quad (3)$$

其中: $\theta_{\text{true}}(i, k)$ 表示第 i 个样本在第 k 个波长处的真实相位值, $\theta_{\text{pred}}(i, k)$ 为对应的预测相位值。

2.3 逆向设计

逆向设计的目的是通过迭代搜索获得在所

设计波长范围内产生理想光谱相位响应的最优纳米结构参数。为实现这一目标,将提出的 ECANet 前向预测网络与 PSO 相结合。

2.3.1 消色差超透镜的设计原理

聚集型超透镜的相位分布遵循几何光学的光程差补偿原理,其理想单波长相位分布为:

$$\varphi(r, \omega) = -\frac{\omega}{c} \left(\sqrt{r^2 + f^2} - f \right), \quad (4)$$

其中: r 是超透镜上任意位置到其中心的距离, f 是焦距, ω 为角频率。

要实现宽带消色差超透镜,在宽波长范围内需要提供焦距保持不变的群延迟。通常假设在宽波长范围工作的超单元相位响应是线性的,则超透镜相位 $\varphi(r, \omega)$ 可以写为一般的形式:

$$\varphi(r, \omega) = -\frac{\omega}{c} \left(\sqrt{r^2 + f^2} \right) + C_1(\omega) + C_2, \quad (5)$$

其中: $C_1(\omega)$ 是与 r 无关的常数,用于调控群延迟以抵消结构色散, C_2 是与 r 和 ω 都无关的常数,仅影响相位的整体偏移,不改变波前调制效果。

为保证群延迟大于零,可令:

$$C_1(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{r_0^2 + f^2}, \quad (6)$$

其中: r_0 为波前与透镜表面相交的径向位置。

将式(6)代入式(5),最终相位分布构建为:

$$\varphi(r, \omega) = -\frac{\omega}{c} \left(\sqrt{r^2 + f^2} - \sqrt{r_0^2 + f^2} \right) + C_2. \quad (7)$$

在消色差设计中,当 $r < r_0$ 时,该方法可对结构色散进行近似线性拟合,从而在一定带宽内补偿色差。

2.3.2 基于 PSO 的逆向设计策略

超透镜逆向设计的主要目标是最小化理想相位分布与各波长下实际结构产生的相位波前之间的偏差。在多波长入射场景下,总波像差定义为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \Delta\varphi_{\text{total}} = \left| \Delta\varphi_{\text{real}}(r, \omega_i) - \Delta\varphi_{\text{ideal}}(r, \omega_i) \right|, \quad (8)$$

其中: T 是迭代次数, $\Delta\varphi_{\text{real}}$ 为实际结构生成的相位波前, $\Delta\varphi_{\text{ideal}}$ 为式(7)计算得到的理想相位波前,而 $\Delta\varphi_{\text{total}}$ 则代表每个位置、每个波长下的波像差总和。

粒子群优化模块通过持续迭代更新粒子的运动速度与空间位置,完成参数域内的寻优过

程,其迭代更新关系可描述为:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega \cdot v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_d - x_{id}^k), \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (9)$$

其中: r_1, r_2 为 $(0, 1)$ 区间内生成的独立随机数, ω 代表惯性权重,用于调控粒子对自身历史运动状态的保留程度, c_1, c_2 为加速系数,分别引导粒子向个体最优与全局最优位置移动, p_{id} 是第 i 个粒子在第 d 维上的个体最优位置, g_d 则为整个粒子群在第 d 维的全局最优位置。

在优化过程中,预训练的 ECANet 前向预测模型作为物理感知替代模型,用于预测候选单元结构的相位响应。

3 分析与讨论

3.1 数据库生成

为训练并验证所提出的 ECANet 模型性能,构建了专用数据集,样本由 8×8 像素化超单元结构的二维矩阵及其对应的宽带光谱响应共同构成。本研究中超透镜的设计目标为:在 520~560 nm 可见光波段实现高效聚焦与消色差调控,同时兼顾纳米压印工艺的可加工性。据此,选用纳米压印胶(O2190)作为超单元材料,该材料在可见光波段具备高透光率的特性,其材料特性可见图4。选取二氧化硅(SiO_2)作为基底材料,其高光学透明性与优异的材料兼容性,也是波导型超表面结构的经典优选方案。

超单元采用二进制像素化排布方案:以周期 P 为 500 nm 的 SiO_2 作为衬底,在单元区域内有序排布 8×8 阵列的纳米柱结构,且每个纳米柱的横截面均为方形,边长 D 和高度 H 均一致。其中,像素值“0”代表空气区域,像素值“1”代表纳米压印胶填充的纳米柱区域,如图4(a)所示。结合现有微纳制造工艺水平,以及宽带消色差设计所需的群延迟调控需求,将阵列中单个纳米柱的边长设定为 57 nm,高度设定为 798 nm,工作波段为 520~560 nm。相较于传统固定几何构型的超单元设计方法,本文所采用的二进制像素化设计方案可大幅提升超单元的结构设计自由度,进而能够挖掘更宽的群延迟调控范围,为宽带消色差性

能的实现奠定基础。

数据集的光谱响应均由 FDTD 仿真计算得出,在 520~560 nm 波长内均匀选取 41 个离散波长点,获取各像素化结构对应的相位与群延迟响应,

构建的相位-群延迟空间如图 4(b)所示。从图中可见,数据集在覆盖的 2π 相位范围的前提下,群延迟为 6~9.5 fs,且数据点分布密集、覆盖充足,可有效支撑后续消色差超透镜的设计与模型训练。

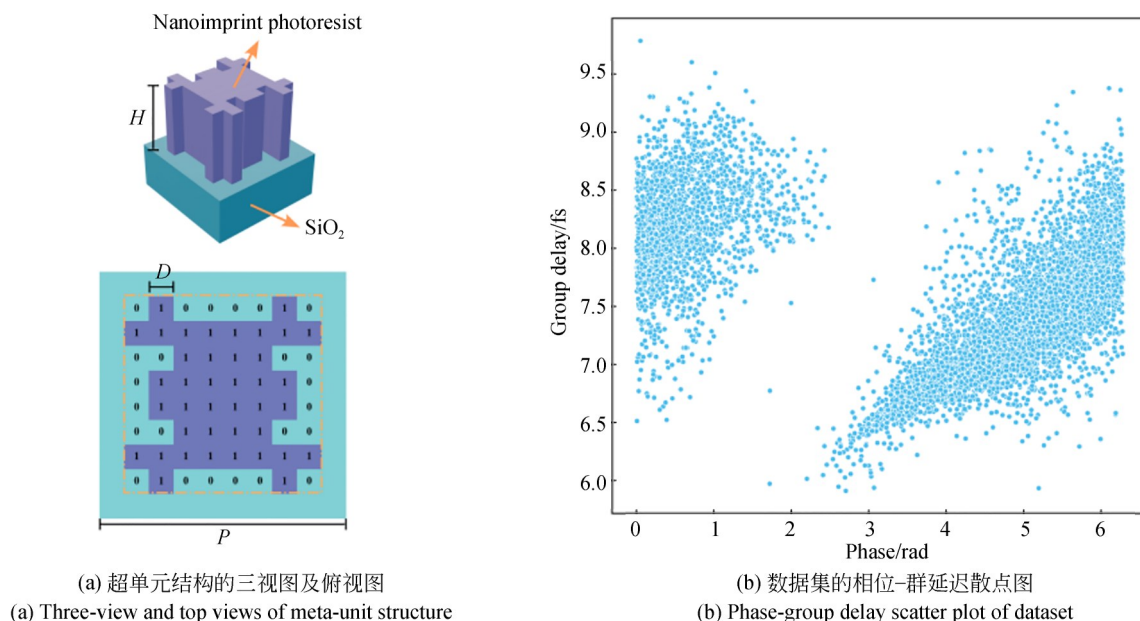


图 4 超单元设计示意图及其由 FDTD 仿真得到的相位-群延迟空间

Fig. 4 Schematic diagram of meta-unit design and its phase-group delay space obtained by FDTD simulation

3.1 ECANet 评估

3.1.1 前向预测结果

图 5 展示了 ECANet 模型在数据集上的预测性能与误差分析结果,验证了其在超表面相位光谱预测任务中的有效性与泛化能力。

图 5(a)对比了数据集内多种 8×8 像素化超单元的预测相位响应与 FDTD 仿真结果。结果表明,在 520~560 nm 波长内,ECANet 的预测相位谱与 FDTD 模拟结果吻合度较高。即使对于存在相位突变的复杂结构,模型仍能精准捕捉其光谱变化趋势。这一结果表明,ECANet 不仅学习到了超单元“结构-相位”的全局映射关系,还能有效拟合局部非线性的相位响应,体现了模型对复杂结构的表征能力。

图 5(b)的 MAE 分布揭示了误差的波长依赖性。短波长区域(520~530 nm)和长波长区域(550~560 nm)的 MAE 波动更大且峰值更高,这是由于该波段内材料色散效应更强,存在非线性的相位数据点,增加了模型的拟合难度。尽管存

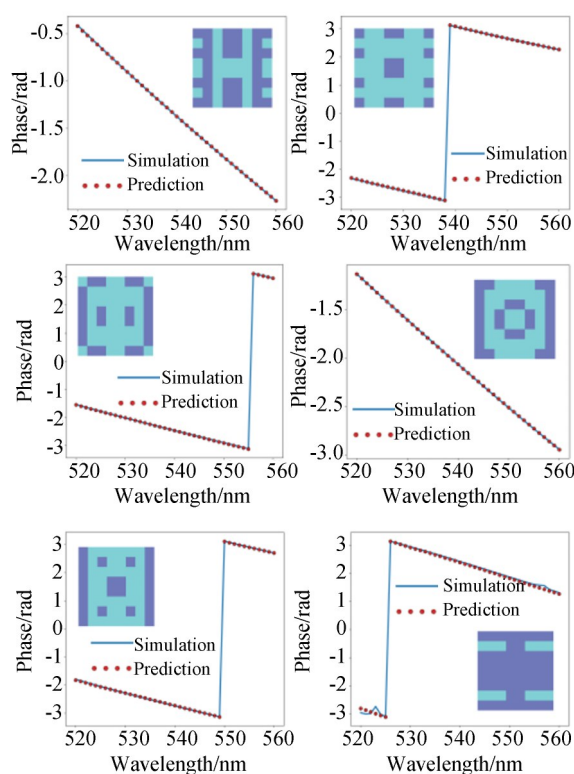
在波长维度的误差差异,全波段总体 MAE 仍小于 0.059 701 rad,证实了 ECANet 的高精度特性。

综上所述,ECANet 模型在不同结构的超单元上实现了全波长范围内的低相位预测误差,证实了其学习复杂高维结构关系及准确建模光谱响应的能力,为后续超透镜逆向设计提供了稳健可靠的基础。

3.1.2 消融实验

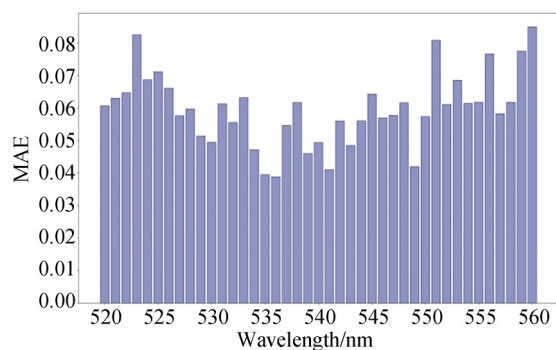
为系统评估 ECA 增强模块及卷积层对 ECANet 预测性能的贡献,本研究开展了消融实验,对比完整 ECANet 架构、移除 ECA 增强模块的变体模型,以及既无注意力模块也无卷积层的 baseline FCN 模型的性能差异(图 5)。

图 6(a)的损失曲线显示,完整 ECANet 模型(紫色曲线)在整个训练过程中始终保持最低的验证损失,收敛速度更快且损失波动更小,凸显其在学习光谱响应规律方面的卓越能力。相比之下,移除 ECA 增强模块的变体模型验证损失



(a) 数据集内典型像素化超单元的预测相位响应与FDTD仿真结果对比

(a) Comparison of predicted phase response of a typical pixelated meta-unit in dataset with FDTD simulation results



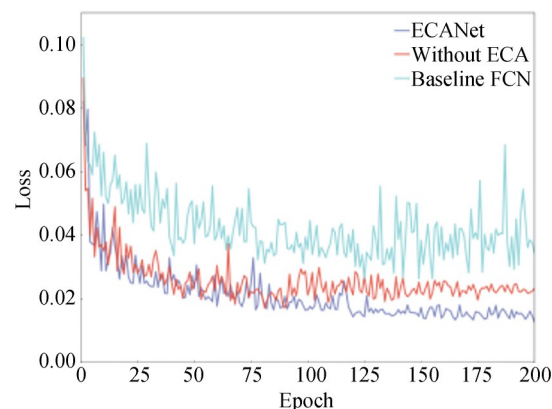
(b) 测试集在520~560 nm波长内的平均绝对误差(MAE)分布
(b) Distribution of the mean absolute error (MAE) of the test set in the wavelength range of 520~560 nm

图5 基于ECANet的超表面相位光谱预测性能与误差分析

Fig. 5 Phase spectral prediction performance and error analysis of metasurface based on ECANet

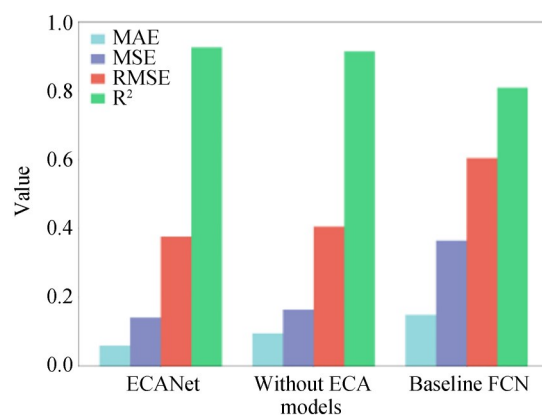
更高,而 baseline FCN 模型的误差不仅更大,且波动剧烈,表明传统全连接架构难以有效建模光谱序列的全局依赖关系。

图6(b)的量化指标对比进一步验证了模块



(a) 训练过程中验证损失随迭代次数的变化曲线

(a) Variation curve of validation loss with number of iterations during training



(b) 不同模型的预测误差与拟合优度量化对比,包含MAE, MSE, RMSE与 R^2 指标

(b) Quantitative comparison of prediction errors and goodness of fit for different models, including MAE, MSE, RMSE and R^2 metrics

图6 消融实验性能对比

Fig. 6 Performance comparison of ablation study

的有效性。完整 ECANet 模型在 MAE、均方误差 (Mean Squared Error, MSE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 等误差指标上均低于变体模型与 baseline FCN 模型,且决定系数 (R^2) 最高,说明其对结构-相位映射关系的拟合精度最高。移除 ECA 增强模块后,模型的各项误差指标上升, R^2 系数下降,证实 ECA 增强模块可通过自适应捕捉通道间依赖关系,有效提升了模型的特征表征能力与拟合精度。

消融实验表明, ECANet 系统中各模块对性能提升均具有关键作用。完整架构在准确率、收敛速度及训练稳定性方面全面超越简化版本与基线模型,充分验证了整体设计的有效性。

3.2 逆向设计结果评估

为验证所提逆向设计框架在消色差超透镜场景下的适用性,这里设计了一款工作于520~560 nm可见光波段的消色差超透镜。该超透镜由多种结构形态的像素化超单元组合构成,直径为21 μm ,目标焦距为100 μm ,数值孔径(Numerical Aperture, NA)为0.10,设计目标为在工作带宽内维持恒定焦距、最小化色焦移并保持稳定的聚焦性能。采用FDTD对该超透镜的聚焦性能进行仿真,结果如图7所示。

图7(a)展示了520~560 nm波段内多个离散波长下的 x - z 平面归一化光强分布,白色虚线标注了各波长的实际焦距位置。可见在全光谱范围内,焦斑始终维持在目标焦距附近,呈现出对称且良好的光斑轮廓,表明该结构实现了多波长下的有效相位调制,焦距随波长增加几乎保持不变,凸显了超透镜优异的消色差聚焦性能。图7(b)展示了不同波长下焦平面的电场强度分布,结果表明所有波长的焦点均保持良好对称性且无明显形态畸变,验证了超透镜良好的聚焦能

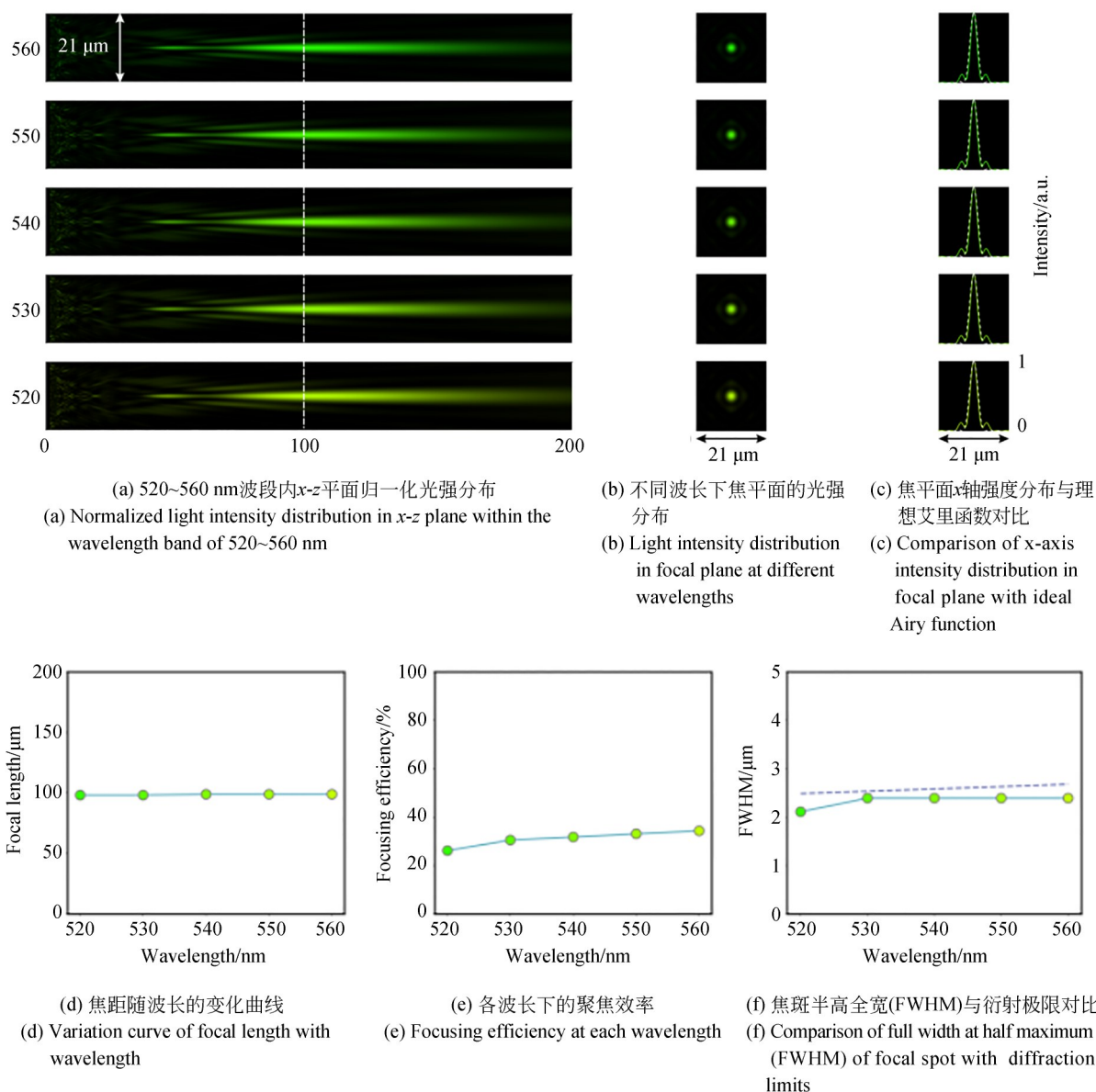


图7 消色差超透镜FDTD仿真结果

Fig. 7 FDTD simulation results of achromatic metalens

力。图7(c)为焦平面水平截面的归一化强度曲线(实线)与理想艾里函数(虚线)的对比分析,结果显示消色差超透镜 x 轴的强度分布与理论衍射极限高度吻合,焦平面对称性保持在理想水平。

图7(d)展示了消色差超透镜的焦距变化曲线,焦距从98.33 μm 变化至99.00 μm ,变化范围仅0.67 μm ,在整个设计波长范围内,最大偏差小于设计焦距的2%。图7(e)展示了各波长下的聚焦效率,其定义为焦斑3倍半高全宽(Half-Height Full-Width, FWHM)范围内的功率与入射光总功率的比值,模拟结果表明,平均聚焦效率约为31.26%。图7(f)展示了焦斑半高全宽(FWHM)与衍射极限的对比,计算得到的FWHM为4.07 λ 至4.52 λ ,接近理论衍射极限 $\frac{\lambda}{2NA}=4.79\lambda$,接近理论衍射极限,表明焦点直径在工作波长范围内得到有效控制。

综上所述,宽带仿真结果验证了所提设计框架在多波长聚焦任务中的可行性,该超透镜在520~560 nm波段内实现了焦距稳定、光斑对称、效率优异的消色差聚焦效果,凸显了其在宽带消色差超透镜应用中的潜力。

3.3 方法局限性与未来展望

本研究提出的ECANet-PSO逆向设计框架在消色差超透镜设计中展现出良好的效率与精度优势,但当前研究仍存在一定局限性,后续可针对相关问题进一步优化与拓展,具体分析如下:

(1)工作带宽受限。本研究设计的消色差超透镜工作带宽仅为40 nm(520~560 nm),若向全可见光波段拓展仍面临多重挑战。在全可见光波段,材料色散与结构色散表现更复杂,需构建覆盖更宽波长范围、结构拓扑类型更丰富的像素化超单元数据集,数据生成的计算成本将显著增加;同时,宽波段相位光谱的非线性特征更突出,现有ECANet的网络容量需针对性优化,同时需平衡模型复杂度与推理效率;最后,全可见光波段对群延迟调控范围的需求大幅提升,需进一步挖掘像素化超单元的设计自由度。后续我们将进一步丰富数据库的结构多样性,同时探索结合Transformer等架构以增强模型对复杂特征的建模能力,从而进一步提升预测性能的普适性与精度。

(2)聚焦效率仍有提升空间。本研究设计的超透镜聚焦效率约为31%,尚未达到理想水平。其一,未对超原子的几何参数进行针对性优化,通过超原子参数扫描可获得适配目标波段的最优透过率尺寸参数,本研究暂未开展相关优化工作,导致其透过率未达最优;其二,实际相位分布与理想相位分布存在微小匹配偏差,PSO优化算法的搜索空间与迭代次数限制了相位匹配的精准度。未来工作可引入多目标优化算法替代PSO算法,在优化相位匹配的同时,将超单元透过率或整体衍射效率作为直接优化目标,以协同提升性能。

(3)缺乏实验制备与测试验证。本研究目前仅通过FDTD仿真完成了超透镜的性能验证,尚未开展实际的实验制备与光学测试,这是当前工作的重要缺口。仿真结果与实际器件性能可能存在偏差,例如纳米压印光刻工艺的加工误差会导致超单元的尺寸、形貌偏离设计值,进而影响相位调制精度;当前超单元的深宽比为14:1,较高的深宽比也会增加实际加工的难度,降低器件制备的可行性。后续研究将先优化超单元深宽比以提升工艺兼容性,再结合纳米压印光刻工艺完成器件制备,并开展光学性能测试,验证仿真结果的可靠性,同时根据实验结果进一步优化模型与设计框架。

4 结 论

本研究以像素化超单元及其相位光谱数据构成的数据库为基础,提出一种基于CNN的高效前向预测模型ECANet,并构建其与PSO算法耦合的逆向设计框架,实现了可见光波段消色差超透镜的高效设计。ECANet以8×8像素化超单元结构的二维矩阵为输入,通过ECA机制强化特征表征能力,可精准捕捉超表面空间结构与相位光谱之间的非线性映射关系。在520~560 nm目标波段内,模型对各类像素化超单元的相位预测平均绝对误差低至0.059 701 rad。消融实验结果进一步验证了ECA模块的关键作用,完整模型在收敛速度、预测精度及训练稳定性上全面优于无注意力增强的变体模型与全连接基线模型,证实了架构设计的合理性。将ECANet集成至PSO逆向设计框架后,完成了一款直径

21 μm 、焦距 100 μm 的消色差超透镜设计。FDTD 仿真结果表明,该超透镜在 520~560 nm 波段内焦距波动小于 2%,FWHM 为 4.07λ 至 4.52λ ,接近理论衍射极限,展现出优异的消色差聚焦性能。相比于传统依赖 FDTD 仿真的设计流程,在 NVIDIA RTX A5000 GPU 单卡计算条件下,设计本文所述消色差超透镜时,传统 FDTD 结合 PSO 方法需约 40 GPU 小时,而本框架的一次性数据集生成与模型训练总计仅需约 0.5 GPU 小时,整体计算效率提升约两个数量级,在保证设计精度的同时显著缩短了研发周期。这一设计方案不仅适配纳米压印光刻工艺的可加工性需求,也为多波长、高性能超表面光学器件的智能设计提供了可行路径,在集成光学、成像系统等领域具有广阔的应用前景。

值得注意的是,本研究所用数据库的结构拓

扑类型覆盖范围相对有限,且模型对部分强非线性相位光谱响应的拟合精度仍有提升空间。后续研究将进一步丰富数据库的结构多样性,同时探索结合 Transformer 等架构以增强模型对复杂特征的建模能力,从而进一步提升预测性能的普适性与精度。未来也可拓展模型的波长覆盖范围,并结合多目标优化算法,探索更复杂的超表面器件设计方案,以满足更广泛的工程应用需求。

作者贡献声明:

容仕翰:实验方法的提出,论文构思和撰写;
王启安:调查研究及数据整理和分析;
蔡云霄:调查研究及实验验证;
张琬皎:提供资源和实验指导;
徐卫明:论文写作指导;
张楠:思路、资源提供和论文写作指导。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] KHORASANINEJAD M, CAPASSO F. Metalenses: Versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, 358(6367): eaam8100.
- [4] WU H T, SHAO R W, XU Z X, *et al.* A programmable metasurface antenna that approaches the wireless information mapping limit[J]. *Nature Electronics*, 2025, 8(2): 179-191.
- [5] CHOI M, KIM J, MOON S, *et al.* Roll-to-plate printable RGB achromatic metalens for wide-field-of-view holographic near-eye displays[J]. *Nature Materials*, 2025, 24(4): 535-543.
- [6] NAN L, MANCINI A, WEBER T, *et al.* Angular dispersion suppression in deeply subwavelength phonon polariton bound states in the continuum metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(6): 615-623.
- [7] KAN Y H, THRANE P C V, LIU X J, *et al.* Ångström-tunable polarization-resolved solid-state photon sources[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(9): 960-967.
- [8] LEE J, WU Y N, SINEV I, *et al.* Plasmonic biosensor enabled by resonant quantum tunnelling[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(9): 938-945.
- [9] ZOTEV P G, BOUTEYRE P, WANG Y D, *et al.* Nanophotonics with multilayer van der Waals materials[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(8): 788-802.
- [10] SOMA G, ARIU K, KARAKIDA S, *et al.* Sub-volt high-speed free-space modulator with electro-optic metasurface[J]. *Nature Nanotechnology*, 2025, 20(11): 1625-1632.
- [11] ZHU J A, GU Z, MA Q, *et al.* A self-controlled reconfigurable intelligent surface inspired by optical holography[J]. *Nature Electronics*, 2025, 8(11): 1108-1118.
- [12] AIGNER A, POSSMAYER T, WEBER T, *et al.* Optical control of resonances in temporally symmetry-broken metasurfaces[J]. *Nature*, 2025, 644(8078): 896-902.
- [13] YOUSEF K M A, D'ALESSANDRO M, YEH M, *et al.* Metasurface quantum graphs for general-

- ized Hong-Ou-Mandel interference [J]. *Science*, 2025, 389(6758): 416-422.
- [14] ZENG Y X, SHA X B, ZHANG C, *et al.* Metasurfaces with arbitrarily shaped wavefront [J]. *Nature*, 2025, 643(8074): 1240-1245.
- [15] HOLMAN A, XU Y, SUN X M, *et al.* Trapping of single atoms in metasurface optical tweezer arrays [J]. *Nature*, 2026, 649(8098): 859-865.
- [16] 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.
- [17] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, *et al.* A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
- [18] SHRESTHA S, OVERVIG A C, LU M, *et al.* Broadband achromatic dielectric metalenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 85.
- [19] LIN R J, SU V C, WANG S M, *et al.* Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14 (3) : 227-231.
- [20] WANG S M, WU P C, SU V C, *et al.* Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [21] HU Y, JIANG Y, ZHANG Y, *et al.* Asymptotic dispersion engineering for ultra-broadband meta-optics [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6649.
- [22] CHI H, HU Y, OU X, *et al.* Neural Network-Assisted End-to-End Design for Full Light Field Control of Meta-Optics [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(13): 2419621.
- [23] YOON G, KIM I, RHO J. Challenges in fabrication towards realization of practical metamaterials [J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 163: 7-20.
- [24] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al.* Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(6): 625.
- [25] DEVLIN R C, KHORASANINEJAD M, CHEN W T, *et al.* Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(38): 10473-10478.
- [26] CHANDA D, SHIGETA K, GUPTA S, *et al.* Large-area flexible 3D optical negative index meta-material formed by nanotransfer printing [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(7): 402-407.
- [27] PARK T W, BYUN M, JUNG H, *et al.* Thermally assisted nanotransfer printing with sub-20-nm resolution and 8-inch wafer scalability [J]. *Science Advances*, 2020, 6(31): eabb6462.
- [28] FAN Z B, CHENG Y F, CHEN Z M, *et al.* Integral imaging near-eye 3D display using a nanoimprint metalens array [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 3.
- [29] YOON G, KIM K, HUH D, *et al.* Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2268.
- [30] EINCK V J, TORFEH M, MCCLUNG A, *et al.* Scalable nanoimprint lithography process for manufacturing visible metasurfaces composed of high aspect ratio TiO₂ meta-atoms [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(8): 2400-2409.
- [31] KIM J, OH D K, KIM H, *et al.* Metasurface holography reaching the highest efficiency limit in the visible via one-step nanoparticle-embedded-resin printing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16 (8): 2200098.
- [32] NAVEED M A, KIM J, ANSARI M A, *et al.* Single-step fabricable flexible metadisplays for sensitive chemical/biomedical packaging security and beyond [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(27): 31194-31202.
- [33] PARK C, KIM W, KIM Y, *et al.* High-throughput fabrication of large-scale metaholograms via one-step printing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(9): 2301562.
- [34] KIM W, YOON G, KIM J, *et al.* Thermally-curable nanocomposite printing for the scalable manufacturing of dielectric metasurfaces [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8: 73.
- [35] PARK Y, KIM J, YANG Y, *et al.* Tape-assisted residual layer-free one-step nanoimprinting of high-index hybrid polymer for optical loss-suppressed metasurfaces [J]. *Advanced Science*, 2025, 12 (10): 2409371.

- [36] KIM G, KIM Y, YUN J, *et al.* Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5920.
- [37] JEONG M, KO B, JUNG C, *et al.* Printable light-emitting metasurfaces with enhanced directional photoluminescence [J]. *Nano Letters*, 2024, 24 (19): 5783-5790.
- [38] LI E J, WANG Y S, JIN L, *et al.* Current-diffusion model for metasurface structure discoveries with spatial-frequency dynamics [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2026, 8(1): 59-69.
- [39] ZHANG H S, KANG L, CAMPBELL S D, *et al.* Chat to chip: large language model based design of arbitrarily shaped metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2025, 14(22): 3625-3633.
- [40] GUO Y X, YANG Y, HUANG F, *et al.* 3D holographic metasurface design by deep learning with partitioned loss function [J]. *Photonics Research*, 2025, 13(12): 3383.
- [41] GAO Y, CHEN W, LI F J, *et al.* Meta-attention deep learning for smart development of metasurface sensors [J]. *Advanced Science*, 2024, 11 (42): 2405750.
- [42] JI W Y, CHANG J, XU H X, *et al.* Recent advances in metasurface design and quantum optics applications with machine learning, physics-informed neural networks, and topology optimization methods [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 169.
- [43] MA W, LIU Z C, KUDYSHEV Z A, *et al.* Deep learning for the design of photonic structures [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 77-90.
- [44] MALKIEL I, MREJEN M, NAGLER A, *et al.* Plasmonic nanostructure design and characterization via Deep Learning [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 60.
- [45] XU B R, SHAO J Z, ZHAO X Y, *et al.* Deep-learning-enabled inverse design of large-scale metasurfaces with full-wave accuracy [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(5): e03115.
- [46] GAO L, LI X Z, LIU D J, *et al.* A bidirectional deep neural network for accurate silicon color design [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31 (51): 1905467.
- [47] LIU Z C, ZHU D Y, RODRIGUES S P, *et al.* Generative model for the inverse design of metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2018, 18 (10): 6570-6576.
- [48] ZENG Y H, CAO H K, JIN X. Anchor-controlled generative adversarial network for high-fidelity electromagnetic and structurally diverse metasurface design [J]. *Nanophotonics*, 2025, 14 (17): 2923-2938.
- [49] WE Z, ZHOU Z, ZHANG Y F, *et al.* Domain knowledge assisted training dataset generation for metasurface designs [C]. 2021 *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. May 23-26, 2021. *Nanjing, China*. IEEE, 2021: 1-3.
- [50] KANMAZ T B, OZTURK E, DEMIR H V, *et al.* Deep-learning-enabled electromagnetic near-field prediction and inverse design of metasurfaces [J]. *Optica*, 2023, 10(10): 1373.
- [51] AN S S, FOWLER C, ZHENG B W, *et al.* A deep learning approach for objective-driven all-dielectric metasurface design [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3196-3207.
- [52] AN S S, ZHENG B W, SHALAGINOV M Y, *et al.* Deep learning modeling approach for metasurfaces with high degrees of freedom [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31932.
- [53] SHABBEER BASHA S H, DUBEY S R, PULABAGARI V, *et al.* Impact of fully connected layers on performance of convolutional neural networks for image classification [J]. *Neurocomputing*, 2020, 378: 112-119.
- [54] ARJOVSKY M, CHINTALA S, BOTTOU L. Wasserstein generative adversarial networks [C]. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70*. August 6-11, 2017, Sydney, NSW, Australia. ACM, 2017: 214-223.
- [55] HAN X, FAN Z Y, LIU Z Y, *et al.* Inverse design of metasurface optical filters using deep neural network with high degrees of freedom [J]. *Info-Mat*, 2021, 3(4): 432-442.
- [56] LIN R H, ZHAI Y F, XIONG C X, *et al.* Inverse design of plasmonic metasurfaces by convolutional neural network [J]. *Optics Letters*, 2020, 45 (6): 1362-1365.

- [57] CHEN Y, WANG Q H, CUI D Y, *et al.* Inverse design of nanohole all-dielectric metasurface based

on deep convolutional neural network [J]. *Optics Communications*, 2024, 569: 130793.

作者简介:



容仕翰(1997—),男,广西崇左人,硕士研究生,2020年于武汉大学获得学士学位,主要从事深度学习、超透镜设计和制备等方面的研究。E-mail: rongshihan23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



张琬皎(1980—),女,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,2015年于德国亚琛工业大学获得博士学位,主要从事微纳光学材料与制造技术方面的研究。E-mail: zhangwanjiao@ucas.ac.cn

通讯作者:



张楠(1989—),男,河北衡水人,北京理工大学光电学院教授,博士生导师,2012年于北京理工大学获得学士学位,2019年于美国纽约州立大学(布法罗分校)获得博士学位,主要从事新型智能光学感知和传感方面的研究。E-mail: nanzhang@bit.edu.cn