

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算

冯睿, 田耀恺, 刘亚龙, 孙芳魁, 曹永印, 丁卫强

引用本文:

冯睿, 田耀恺, 刘亚龙, 等. 拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算[J]. 光电工程, 2023, 50(9): 230172.

Feng R, Tian Y K, Liu Y L, et al. Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230172.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230172>

收稿日期: 2023-07-14; 修改日期: 2023-10-13; 录用日期: 2023-10-13

相关论文

Crosstalk-free achromatic full Stokes imaging polarimetry metasurface enabled by polarization-dependent phase optimization

Yaxin Zhang, Mingbo Pu, Jinjin Jin, Xinjian Lu, Yinghui Guo, Jixiang Cai, Fei Zhang, Yingli Ha, Qiong He, Mingfeng Xu, Xiong Li, Xiaoliang Ma, Xiangang Luo

Opto-Electronic Advances 2022, 5(11): 220058 doi: 10.29026/oea.2022.220058

Field distribution of the Z_2 topological edge state revealed by cathodoluminescence nanoscopy

Xiao He, Donglin Liu, Hongfei Wang, Liheng Zheng, Bo Xu, Biye Xie, Meiling Jiang, Zhixin Liu, Jin Zhang, Minghui Lu, Zheyu Fang

Opto-Electronic Advances 2022, 5(4): 210015 doi: 10.29026/oea.2022.210015

Multi-foci metalens for spectra and polarization ellipticity recognition and reconstruction

Hui Gao, Xuhao Fan, Yuxi Wang, Yuncheng Liu, Xinger Wang, Ke Xu, Leimin Deng, Cheng Zeng, Tingan Li, Jinsong Xia, Wei Xiong

Opto-Electronic Science 2023, 2(3): 220026 doi: 10.29026/oes.2023.220026

基于悬链线纳米粒子超构表面的线偏振光SPPs定向激发

韩莹莹, 陈盼盼, 王曼, 黄万霞, 石风华, 石建平

光电工程 2022, 49(10): 220105 doi: 10.12086/oe.2022.220105

更多相关论文见光电期刊集群网站 



DOI: 10.12086/oe.2023.230172

拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算

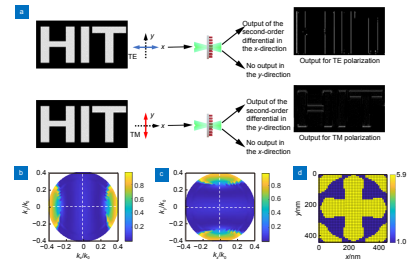
冯睿¹, 田耀恺¹, 刘亚龙¹, 孙芳魁¹,
曹永印¹, 丁卫强^{1,2*}¹先进光子学研究所, 哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;²极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西 太原 030006

摘要: 光学模拟计算通过在空间域直接对光学输入进行调控, 避免了各种应用场景中光电之间的转换。因此在图像处理等应用领域成为人们研究的重点。本文用拓扑优化方法设计了一类利用格林函数法的偏振复用光学模拟计算超表面结构。在不同线偏振光入射下, 该拓扑优化超表面可以独立地对透射光场的振幅和相位进行调控。实现了在正交偏振态下, 分别呈现明场成像与一维二阶微分运算, 以及偏振控制微分方向的复用微分系统。这种偏振复用的设计可以在更多的光学计算应用场景中发挥重要作用。

关键词: 拓扑优化; 光学微分; 超表面; 偏振复用

中图分类号: O431

文献标志码: A



冯睿, 田耀恺, 刘亚龙, 等. 拓扑优化超表面的偏振复用光学微分运算[J]. 光电工程, 2023, 50(9): 230172

Feng R, Tian Y K, Liu Y L, et al. Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230172

Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces

Feng Rui¹, Tian Yaokai¹, Liu Yalong¹, Sun Fangkui¹, Cao Yongyin¹, Ding Weiqiang^{1,2*}¹Institute of Advanced Photonics, School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract: Optical analog computing avoids the photoelectric conversion in various application scenarios by directly modulating the optical input in the spatial domain. Therefore, it has become a research focus in many applications such as image processing. In this paper, a polarization-multiplexed optical analog computing metasurface structure based on the Green's function method is designed using topological optimization. Under different linearly polarized light incidence, this topological metasurface can independently tailor the amplitude and phase of the transmitted light field. It achieves bright-field imaging and one-dimensional second-order differentiation operations in orthogonal polarization states, as well as a polarization-controlled differentiation direction for a multiplexed differential system. These polarization-multiplexed designs can play a vital role in more optical computing application scenarios.

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2023-10-13; 录用日期: 2023-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(12274105); 黑龙江省自然科学基金杰出青年项目(JQ2022A001); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.OCEF.2021020, 2023FRFK06007); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023A006)。感谢哈尔滨工业大学物理学院高性能刀片集群 INSPUR-HPC 提供科学计算资源。

*通信作者: 丁卫强, wqding@hit.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Keywords: topological optimization; optical differentiation; metasurfaces; polarization multiplexing

1 引言

近年来, 光学模拟计算的研究领域受到越来越多的关注, 其快速发展得益于科学家们对于光学原理的深入研究和对光学器件的不断创新。特别是在光学空域微分器的设计方面, 研究者们提出了许多新的思路和方法, 并基于不同原理实现了光学微分功能^[1], 如相对介电系数和磁导率可变的超材料^[2]、亚波长光栅^[3]、光子自旋霍尔效应^[4]、Fano 共振^[5]、表面等离子激元^[6]等。这些手法的出现为实现光学运算提供了新的思路和方向, 不仅可以用于实现传统的光学运算功能, 如微分^[7-10]、积分^[11-14]、傅里叶变换等, 还可以成为更加复杂的光学计算的基础, 如图像处理^[15]、机器学习等^[16-18]。此外, 这些新型光学器件具有体积小、速度快、能耗低等优势, 有望在光电子计算、光通信、传感器等领域得到广泛应用^[19-22]。因此, 光学模拟计算的研究为实现更加高效、精确和智能化的信息处理和传输提供了新的思路和可能。

在光学模拟计算中, 存在着基于 4F 光学系统和基于超表面调控两种不同方法。近年来, 由于纯透镜组合的复杂性和应用难度, 基于超表面的研究受到广泛关注。Engheta 等人提出了计算超材料的概念^[23], 并通过特殊设计的超表面提出了两种实现光学模拟计算的方法: (a) 空间傅里叶变换法光学模拟计算和 (b) 格林函数法光学模拟计算, 这两种方法已被广泛研究, 为不同的光学运算设计了不同的超表面结构。相比于基于 4F 系统的空间傅里叶变换法, 格林函数法光学模拟计算利用超表面的非局域响应直接在动量空间对入射光场进行调制, 实现特定的空域模拟计算功能, 而不需要使用傅里叶变换透镜进行空域和空间频率域之间的转换。一些微纳结构, 例如开环谐振器、亚波长光栅、介质柱超表面等, 已经被证实可以实现光学微分运算, 其非局域响应直接满足传递函数。光学超表面作为一种新兴的微纳光子学结构, 被广泛应用于微纳光子学领域。然而, 传统金属超表面在高频率下的欧姆损耗问题^[24]一直限制着其性能, 这对器件的应用产生了很大的影响。为了解决这一问题, 工作波段下损耗较小的电介质材料受到人们广泛的关注, 因此近年来基于电介质材料的光学超表面成为了人们新

的研究重点, 包括在近红外^[25-26]、可见光^[27-28]和紫外波段^[29]等不同波段的器件均有着远超金属超表面的性能。这些电介质超表面的发展为高效海量计算提供了解决方法, 也为光学模拟计算系统等微纳光子学应用提供了可能性。然而, 这些超表面由于可调参数少, 对加工精确度要求较高, 存在着一定的局限性。因此, 科学家们将目光投向了拓扑优化的多功能超表面^[30-32], 基于拓扑优化带来的多自由度参数调控可以更好地实现多功能复用。在本文中, 通过拓扑优化方法设计了一类新型的偏振复用光学模拟计算超表面, 该超表面采用格林函数法实现光学模拟计算, 因此能够以单层结构实现多种光计算功能, 有利于光学模拟计算器件的小型化和集成化。此方法所设计的超表面在平面线偏振光入射下, 能够将不同偏振通道的透射光场振幅和相位独立调制, 因而实现复杂的偏振相关光学计算功能, 分别实现了一维下的明场照明与一维二阶微分双功能超表面, 以及偏振控制微分方向的二维超表面。采用拓扑优化方法逆向设计的超表面, 其得到的结果较好地符合预期理论曲线, 透射效率较高。

2 偏振复用超表面的逆向设计原理

具有偏振复用功能的超表面通常对不同偏振分量的入射光有不同响应, 并可以对两个正交偏振分量的振幅和相位进行独立调控。类似地, 这里所期望设计的偏振复用光学模拟计算系统在不同线偏振平面光入射时, 也具有不同的振幅和相位信息, 并且计算系统会输出相应偏振分量。光计算的偏振复用基本原理就是根据输入光的不同偏振态, 介质超表面可以实现对光场的不同调控, 从而输出不同的运算结果, 且与 4F 系统相比, 设计的超表面结构为单层结构, 即在超表面一侧将光源入射, 在另一侧出射的光直接实现计算功能, 省去了傅里叶变换透镜, 如图 1(a) 所示。然而, 基于传输相位、几何相位方法的传统超表面对于偏振态要求高, 且其调整参数较少, 易陷于局部最优解中, 需要精心设计才能实现对正交偏振的复杂光场传播和空间模式分布的调控^[33-35]。因此, 器件的设计过程中, 采用基于伴随模拟的拓扑优化方法, 可以高效地设计自由形状超表面, 并利用格林函数法光学模拟计算的对称性, 在每次优化迭代过程中仅需对麦

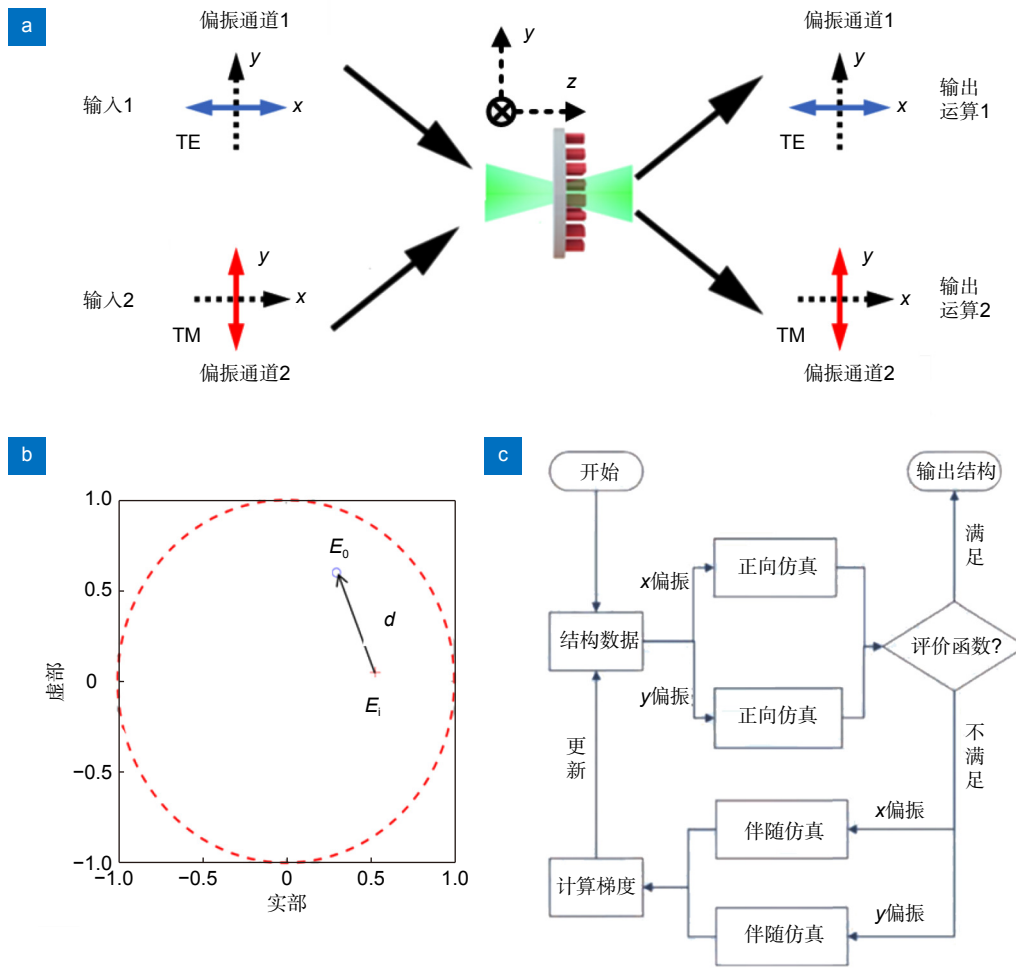


图 1 (a) 偏振复用光学模拟计算系统示意图, TE 和 TM 不同偏振输入会输出不同运算结果; (b) 单个优化目标在复振幅平面的值; (c) 伴随优化流程图

Fig. 1 (a) Schematic of polarization-multiplexed optical analog computing systems. The different inputs of TE and TM polarization will output different operation results; (b) The values of the individual optimization target on the complex amplitude plane; (c) The flowchart of the adjoint optimization

克斯韦方程进行两次求解。这种方法具有广泛的自由度, 能够实现高效的拓扑优化。且由于仿真次数少, 可以大幅度提升计算速度, 提高优化效率。

基于伴随拓扑优化的逆向设计在本质上利用梯度优化算法, 在从超表面结构生成下一代超表面结构时, 采用梯度下降优化算法更新结构参数, 使得目标函数 (figure of merit, FOM) 最大化。此时, 在梯度下降优化算法中单个优化目标被定义为特定入射角度和偏振情况下, 正向模拟计算出的电场复振幅和目标点复振幅之间距离平方 $d_i = |E_i - E_0|^2$, 如图 1(b) 所示。多目标优化被定义为 $FOM = \sum_{i=1}^n w_i d_i$, 其中 w_i 为不同目标之间的权重, n 为优化目标个数。在每次拓扑优化

迭代中的梯度可以表示为^[36]

$$\frac{\partial FOM}{\partial \epsilon(r)} = \sum_i w_i \text{Re}(E_i^{\text{fwd}}(r) \cdot E_i^{\text{adj}}(r)), \quad (1)$$

其中: $\epsilon(r)$ 为介电常数的空间分布, $E_i^{\text{fwd}}(r)$ 为正向模拟计算出的电场复振幅, 而伴随模拟的电场振幅 $E_i^{\text{adj}}(r)$ 定义为

$$E_i^{\text{adj}}(r) = G(r, r') \cdot E_i^*, \quad (2)$$

其中: r 和 r' 分别代表优化结构内的一点和优化目标区域内的一点; $G(r, r')$ 是麦克斯韦-格林函数, 表示点 r' 处感应电偶极子在 r 点处产生的电场。此时, 每次迭代中伴随模拟的激励源即为正向模拟计算出的电场复振幅的复共轭 E_i^* 。因此通过 FDTD 方法进行正向和伴随两次电磁仿真模拟, 得到两处光源传播到超

表面结构处的电场分布, 由式 (1) 可以得到对于特定入射角度和偏振情况下的梯度, 对于多入射角度/不同偏振情况下的多目标优化梯度值, 需对单目标优化结果加权求和后得出, 并由梯度优化方法得出结构参数。图 1(c) 为伴随优化步骤的流程图。为了实现偏振复用, 需要对 x 偏振光和 y 偏振光的振幅和相位独立调控, 因此分别对这两种偏振光进行两次仿真, 以获取不同偏振光对应的梯度信息。为了使不同偏振情况的性能都尽可能的高, 可以通过在每次仿真中调整权重使效率较低的偏振情况得到更多的提升, 确保不同偏振情况的性能尽可能同步。利用计算得到的总梯度对每一点的介电常数进行更新, 直到评价函数满足优化目标或者迭代次数达到设定值。与此同时为了避免单次迭代产生过大的介电常数变化, 还需要限制每次迭代介电常数变化的最大值。

为了验证该方法能否在波长尺寸对不同偏振透射光场的振幅和相位同时调控, 采用基于伴随模拟

的拓扑优化方法实现对线偏振光正入射时振幅和相位零点的优化。这里对正入射时 TM 偏振的复振幅按目标 $0+0i$ 进行拓扑优化, 采用的超表面结构关于 y 轴对称, 长为 1000 nm , 宽为 500 nm , 厚度为 600 nm , 初始介电常数随机分布。电磁仿真采用 FDTD 方法, 设置入射光源与伴随光源为 532 nm 的单色光, 沿光传播的方向采用 PML 边界条件, 沿结构长宽方向设置布洛赫边界条件。超表面的拓扑优化过程如图 2(a-e) 所示, 结构二维优化的过程表明超表面结构由初始随机介电常数分布逐代修正, 最终收敛于 5.9 或 1, 即二氧化钛与空气的介电常数。透射光场复振幅的实部和虚部随迭代次数变化的情况如图 2(f) 所示, 二者均逐步收敛到 0, 符合预想优化目标。得益于梯度算法的高效率, 在优化迭代次数增加的过程中, 约 130 代前超表面的拓扑形状变化迅速, 复振幅也剧烈变化振荡。在 280 代时拓扑结构基本形成且不再发生大的变化, 复振幅也趋于优化目标。因

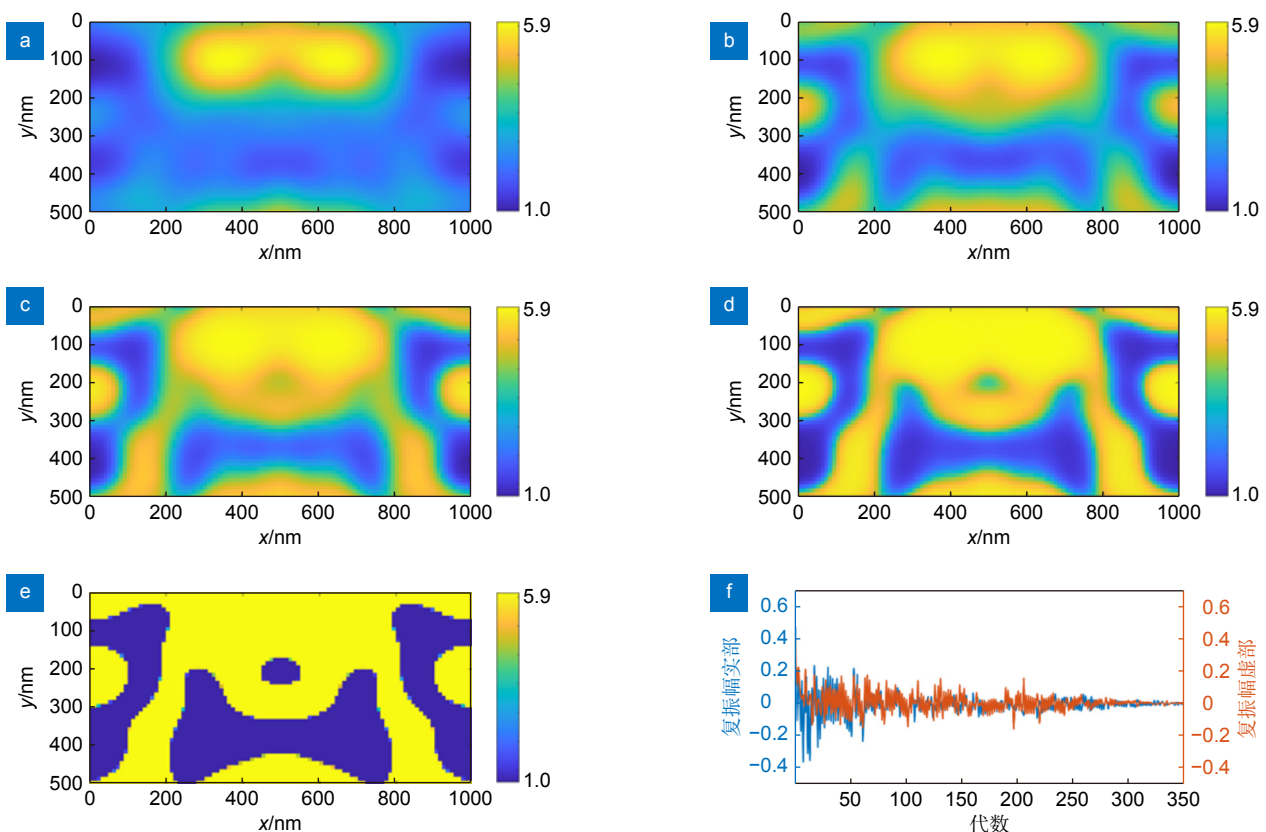


图 2 (a)-(e) 正入射时超表面的拓扑优化过程, 拓扑优化后最终超表面结构完全二值化。图中 colorbar 表示超表面的介电常数分布情况; (f) 正入射时 TM 偏振的单点复振幅按目标 $0+0i$ 进行的拓扑优化结果

Fig. 2 (a)-(e) The topological optimization process of metasurfaces for normal incidence. The final metasurface structure is completely binary after topological optimization. The colorbars represent the dielectric constant distribution of the metasurfaces;

(f) The topological optimization results for TM polarization at normal incidence with a single-point target of $0+0i$

此, 在优化过程的后期实际是在保持高目标函数的同时, 逐渐变成完全二值化的介电常数分布。对于 532 nm 的 TM 偏振入射, 最终二值化为二氧化钛或空气的介电常数, 即超表面由二氧化钛或空气构成, 便于优化后的超表面实际制造。

通过以上研究, 可以看出基于伴随模拟的拓扑优化方法具有如下优越性: 首先, 它可以极大地提高设计自由度, 允许在实现特定光学功能的同时设计非直观、准连续的自由形状超表面。这意味着此方法可以在保证性能的前提下, 最大程度提升超表面的自由度, 进一步探索更为复杂的光学器件设计。其次, 该方法具有高效的计算性能, 由于其梯度算法的高效性, 每次迭代随时更新梯度值, 因此计算量大大减少, 而且对于多参数优化更加适用。最后, 该方法还具有较高的优化效率和精度。通过仿真验证可以发现基于伴随模拟的拓扑优化方法可以快速收敛到较为理想的超表面设计, 并且通过匹配实际材料以及完全二值化, 可以确保经过优化后的超表面具有现实制造的可行性。因此, 在接下来的偏振复用超表面设计中, 将采用多目标的伴随优化方法实现。

3 偏振依赖微分双功能超表面

为了实现正交偏振光的复用, 需要在单点优化的基础上进一步采用多目标优化方法。在设置 TE 偏振入射保持原图像出射的条件下, 同时实现 TM 偏振入射做一维二阶微分运算。为了实现该目标, 这里在 TM 偏振的理论振幅响应曲线上选择了五个关键点进行多目标优化, 如图 3(a) 所示。由于超表面设定为关于 y 轴对称, 因此实际上只对 1、2、3 三个点进行优化, 其数值孔径 $NA = n \cdot \sin(\alpha)$ 分别为 0、0.25、0.35, 这里 α 为入射光与入射法线夹角。可以看到理想振幅曲线与 $n \cdot \sin(\alpha)$ 为二次函数关系, 且在 $n \cdot \sin(\alpha)$ 为 0 时振幅为 0, $n \cdot \sin(\alpha)$ 为 0.4 时振幅为 1。与此同时, 对于 TM 偏振相位曲线, 将优化目标设定为 0。而对于 TE 偏振入射, 期望其振幅为 1, 相位为 0。通过这些设定实现对正交偏振光复用设计的优化。

超表面仍然采用随机初始介电常数分布条件, 经过 350 代迭代优化后, 其 TM 偏振入射优化过程如图 3(c) 所示, 1、2、3 点所代表的复振幅实部最终收敛于目标。其在复平面的结果如图 3(b) 所示, 在复振幅域上的目标设计点(圆)与优化结果(十字)符合较好。因此对于 TM 偏振入射超表面满足实现一维二阶

微分运算的需求。其 TE 偏振入射优化过程如图 3(d) 所示, 蓝色为实部, 橘色为虚部, 都收敛于目标, 因此 TE 偏振入射可以实现明场成像, 透射效率高达 67.2%。超表面结构最终得到优化的结果如图 3(e), 经由迭代过程中的高斯模糊滤除微小结构后, 最终结果不存在难以制造的微小结构, 具有实际制造的可行性。

为验证优化后超表面的偏振复用, 对其进行光学微分运算的仿真验证。输入的是波长为 532 nm 的二维高斯分布光束, 根据 TE 和 TM 偏振各自的传递函数分别计算了对应的输出结果, 如图 4 所示。对于 TE 偏振入射, 输出图案仍然是原图像, 光强为输入的 67.2%, 即 67.2% 的高斯光束被通过了超表面, 而剩余的能量被反射。对于 TM 偏振入射, 输出的是源图像的一维二阶微分图像, 显示了空间二阶微分三个峰的典型特征, 验证了超表面在此偏振方向具有微分运算的功能, 表明该超表面器件可以实现偏振复用的功能, 可以有效地对不同偏振信息进行处理。

上部分设计的超表面只在 TM 偏振入射 y 方向发挥了微分运算作用, 在 TE 偏振入射 x 方向没有对入射光进行调控, 并未发挥二维超表面的潜力。因此为了实现二维偏振相关的双功能超表面, 需要在超表面设计中引入可以对 TE 偏振入射 x 方向的调控。具体来说, 分别设计偏振控制微分方向超表面在不同偏振方向的传递函数, 使得 TE 偏振入射在 x 方向做一维二阶微分, 且 y 方向不发生透射, 而 TM 偏振入射在 y 方向做一维二阶微分, 且 x 方向不发生透射, 实现不同偏振光提取不同方向边缘信息, 如图 5(a) 所示。

优化选取的目标沿图 5(b) 中的两条白色虚线, 对白色虚线上不同的空间频率分别进行振幅和相位调控, 优化设计中最大数值孔径为 $NA = 0.4$ 。通过基于伴随模拟的拓扑优化方法对超表面的介电常数进行多目标优化以达到设计目标。最终得到优化结构如图 5(d) 所示, 限制最小尺寸为 10 nm, 所得到的超表面结构具有 C4 对称性。图 5(b) 和 5(c) 给出了该超表面在不同偏振光下的振幅响应, 在此传递函数下单一偏振光实现了此方向上的微分运算, 只能提取此方向的边缘信息, 而在另一个方向上则没有光透射。当入射光偏振态旋转到正交方向时, 则微分运算与无光透射的方向也相应互换。为验证 TE 和 TM 偏振入射对微分方向的影响, 输入不同偏振态波长为 532 nm 的黑白图像。

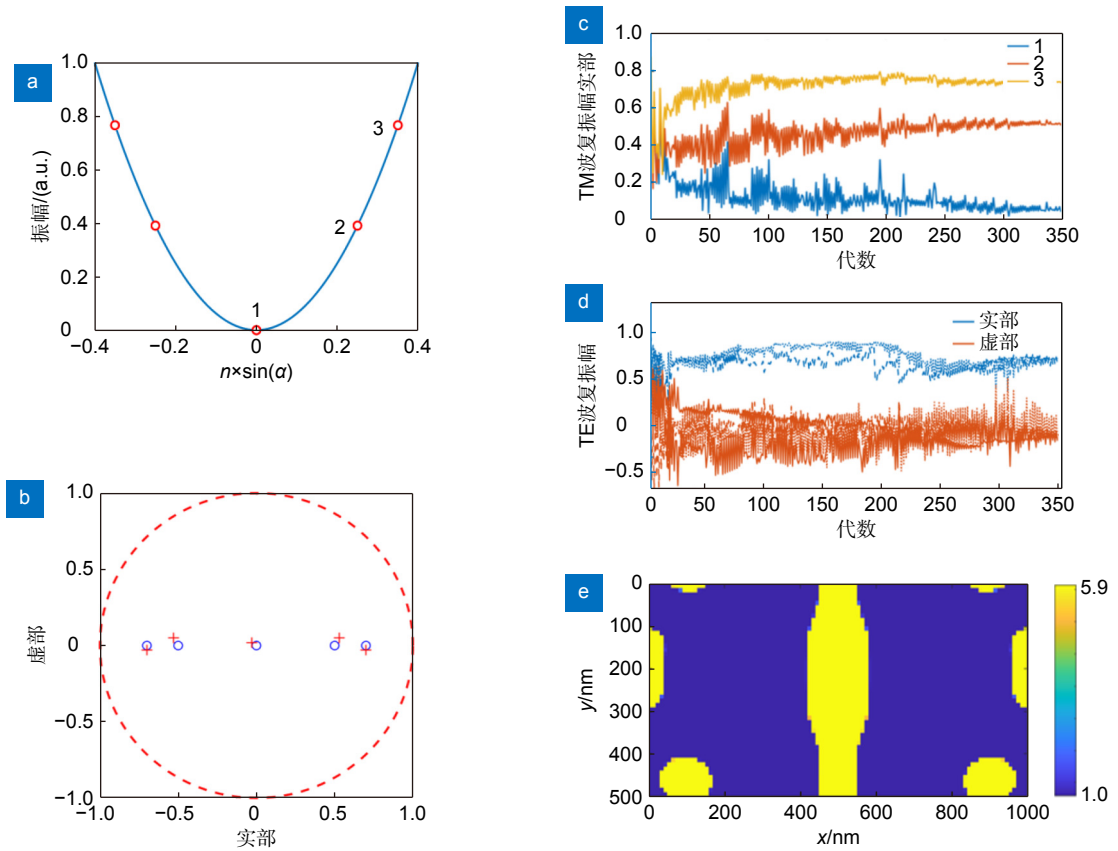


图 3 (a) TM 偏振入射时多目标优化选取的目标点; (b) 1、2、3 三点 TM 偏振入射时在复振幅平面上的优化结果; (c) 1、2、3 三点 TM 偏振入射的优化过程; (d) 1、2、3 三点 TE 偏振入射的优化过程; (e) 拓扑优化后超表面的介电常数分布

Fig. 3 (a) The selected target points of multi-objective optimization for TM polarization; (b) Optimization results on the complex amplitude plane for TM polarization at points 1, 2, and 3; (c) Optimization process for TM polarization at points 1, 2, and 3; (d) Optimization process for TE polarization at points 1, 2, and 3; (e) The dielectric constant distribution of the metasurface after topological optimization

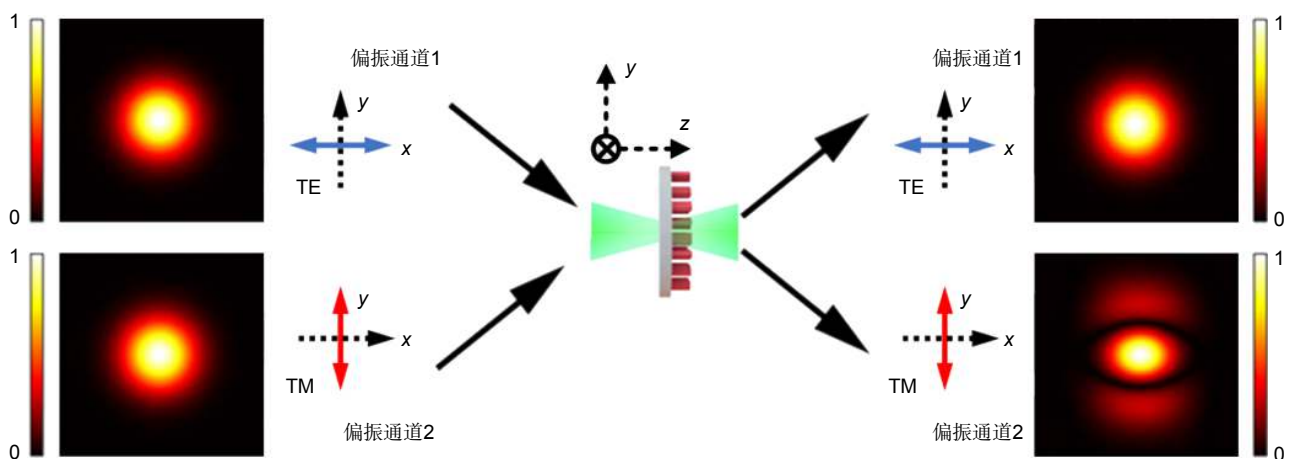


图 4 偏振复用光学微分运算的仿真结果。图中 colorbar 表示输入和输出的归一化光强分布
 Fig. 4 Simulation results for the polarization-multiplexed optical differentiation operations.
 The colorbars represent the distribution of the normalized input and the output intensity

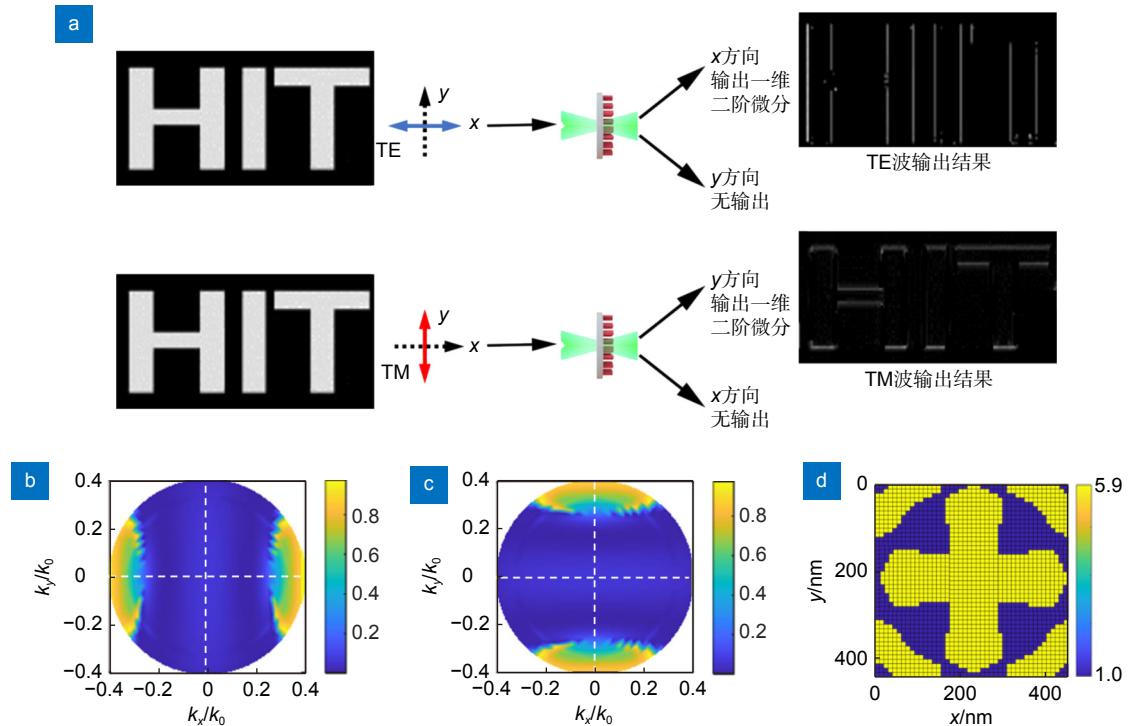


图 5 (a) 偏振控制微分方向示意图。TE 和 TM 不同偏振入射光经超表面调控后会在正交偏振方向分别实现微分运算；(b) TE 偏振的振幅传递函数；(c) TM 偏振的振幅传递函数；(d) 拓扑优化后的偏振复用超表面结构。

图中 colorbar 表示超表面的介电常数分布情况

Fig. 5 (a) Schematic of polarization-controlled differentiation direction. The different input light of TE and TM polarization will achieve differentiation operations in orthogonal polarization direction, respectively; (b) The amplitude transfer function for TE polarization; (c) The amplitude transfer function for TM polarization; (d) The polarization-multiplexed metasurface structure after topological optimization. The colorbar represents the dielectric constant distribution of the metasurface

图 5(a) 展示了根据 TE 和 TM 偏振入射不同的传递函数计算了对应的输出结果，即对于 TE 偏振入射， x 方向进行了一维二阶微分运算输出了字母的左右边缘， y 方向没有出射图像。而对于 TM 偏振入射， y 方向进行了一维二阶微分运算输出了字母的上下边缘， x 方向没有出射图像。仿真计算结果说明所设计的偏振复用光学计算系统能够实现偏振控制微分方向的功能。

4 结 论

在本文中，通过逆向设计方法设计了格林函数法光学模拟计算单层超表面结构，在平面线偏振光入射下可以将不同偏振通道透射光场的振幅与相位独立调制，因而实现复杂的偏振相关的微分运算功能。所设计的超表面结构分别实现了 1) TM 偏振入射做一维二阶微分运算，而 TE 偏振入射呈现明场成像的功能；2) TE 偏振入射在 x 方向做一维二阶微分，且 y 方向

不发生透射，而 TM 偏振入射在 y 方向做一维二阶微分，且 x 方向不透射，实现不同偏振光提取不同方向边缘信息。由于采用拓扑优化的方法逆向设计超表面，得到的结果可以较好地符合预期理论曲线，传输效率较高。而且超表面采用不同于 4F 系统的格林函数法光学模拟计算，因此最终超表面是以单层结构实现多种光计算功能，有利于光学模拟计算器件向多功能化、小型化和集成化方向发展。

参考文献

- [1] Zhou Y, Zheng H Y, Kravchenko I I, et al. Flat optics for image differentiation[J]. *Nat Photonics*, 2020, 14(5): 316–323.
- [2] Silva A, Monticone F, Castaldi G, et al. Performing mathematical operations with metamaterials[J]. *Science*, 2014, 343(6167): 160–163.
- [3] Xu C Y, Wang Y L, Zhang C, et al. Optical spatiotemporal differentiator using a bilayer plasmonic grating[J]. *Opt Lett*, 2021, 46(17): 4418–4421.
- [4] He Y L, Xie Z Q, Yang B, et al. Controllable photonic spin Hall effect with phase function construction[J]. *Photonics Res*, 2020,

- 8(6): 963–971.
- [5] Yang W J, Yu X Y, Zhang J L, et al. Plasmonic transmitted optical differentiator based on the subwavelength gold gratings[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(8): 2295–2298.
- [6] Zhu T F, Zhou Y H, Lou Y J, et al. Plasmonic computing of spatial differentiation[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**: 15391.
- [7] Kulishov M, Azaña J. Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(20): 2700–2702.
- [8] Liu F F, Wang T, Qiang L, et al. Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(20): 15880–15886.
- [9] Huang T L, Zheng A L, Dong J J, et al. Terahertz-bandwidth photonic temporal differentiator based on a silicon-on-insulator directional coupler[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(23): 5614–5617.
- [10] Yan S Q, Cheng Z W, Frandsen L H, et al. Bandwidth-adaptable silicon photonic differentiator employing a slow light effect[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(8): 1596–1599.
- [11] Ngo N Q. Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(20): 3020–3022.
- [12] Ferrera M, Park Y, Razzari L, et al. On-chip CMOS-compatible all-optical integrator[J]. *Nat Commun*, 2010, **1**(1): 29.
- [13] Zangeneh-Nejad F, Khavasi A. Spatial integration by a dielectric slab and its planar graphene-based counterpart[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(10): 1954–1957.
- [14] Wang X, Zhou F, Yan S Q, et al. Broadband on-chip integrator based on silicon photonic phase-shifted Bragg grating[J]. *Photonics Res*, 2017, **5**(3): 182–186.
- [15] Kwon H, Sounas D, Cordaro A, et al. Nonlocal metasurfaces for optical signal processing[J]. *Phys Rev Lett*, 2018, **121**(17): 173004.
- [16] Woods D, Naughton T J. Photonic neural networks[J]. *Nat Phys*, 2012, **8**(4): 257–259.
- [17] Wu C M, Yu H S, Lee S, et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 96.
- [18] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(7): 441–446.
- [19] Huo P C, Zhang C, Zhu W Q, et al. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(4): 2791–2798.
- [20] He Q, Zhang F, Pu M B, et al. Monolithic metasurface spatial differentiator enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(1): 741–748.
- [21] Gao H, Fan X, Wang Y, et al. Multi-foci metalens for spectra and polarization ellipticity recognition and reconstruction[J]. *Opto-Electron Sci*, 2023, **2**: 220026.
- [22] Khonina S N, Kazanskiy N L, Butt M A, et al. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**: 210127.
- [23] Liu Y M, Zhang X. Metamaterials: a new frontier of science and technology[J]. *Chem Soc Rev*, 2011, **40**(5): 2494–2507.
- [24] Liu W W, Li Z C, Li Z, et al. Energy-tailorable spin-selective multifunctional metasurfaces with full fourier components[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(32): 1901729.
- [25] Feng H, Li Q T, Wan W P, et al. Spin-switched three-dimensional full-color scenes based on a dielectric meta-hologram[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(11): 2910–2916.
- [26] Fan Q, Zhu W Q, Liang Y Z, et al. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible[J]. *Nano Lett*, 2018, **19**(2): 1158–1165.
- [27] Huang K, Deng J, Leong H S, et al. Ultraviolet Metasurfaces of $\approx 80\%$ Efficiency with Antiferromagnetic Resonances for Optical Vectorial Anti-Counterfeiting[J]. *Laser Photonics Rev*, 2019, **13**(5): 1800289.
- [28] Zhang C, Divitt S, Fan Q B, et al. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**: 55.
- [29] Wesemann L, Rickett J, Song J C, et al. Nanophotonics enhanced coverslip for phase imaging in biology[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 98.
- [30] Zhu T F, Guo C, Huang J Y, et al. Topological optical differentiator[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 680.
- [31] Long O Y, Guo C, Wang H W, et al. Isotropic topological second-order spatial differentiator operating in transmission mode[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(13): 3247–3250.
- [32] Ruan Z C. Spatial mode control of surface Plasmon polariton excitation with gain medium: from spatial differentiator to integrator[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(4): 601–604.
- [33] Liu M Z, Zhu W Q, Huo P C, et al. Multifunctional metasurfaces enabled by simultaneous and independent control of phase and amplitude for orthogonal polarization states[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**: 107.
- [34] Fan Q B, Liu M Z, Zhang C, et al. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. *Phys Rev Lett*, 2020, **125**(26): 267402.
- [35] Zhang F, Pu M B, Li X, et al. All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Adv Funct Mater*, 2017, **27**: 1704295.
- [36] Miller O. Photonic design: from fundamental solar cell physics to computational inverse design[D]. Berkeley: University of California, 2012.



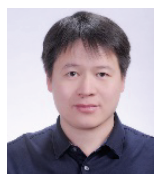
扫描二维码, 获取PDF全文

作者简介



冯睿 (1987-), 男, 哈尔滨工业大学物理学院讲师。2015 年获得哈尔滨工业大学博士学位。主要从事超构表面与光子芯片方面的研究, 在 *Advanced Functional Materials*, *ACS Nano* 等期刊发表学术论文 20 余篇。

E-mail: fengrui_0223@163.com



【通信作者】丁卫强 (1979-), 男, 哈尔滨工业大学物理学院教授、博士生导师, 黑龙江省杰出青年基金获得者。2006 年获得哈尔滨工业大学博士学位。主要从事光子芯片与微纳操控方面的研究, 在 *Nature Photonics*, *Physical Review Letters* 和 *Light: Science & Applications* 等期刊发表学术论文 100 余篇。

E-mail: wqding@hit.edu.cn

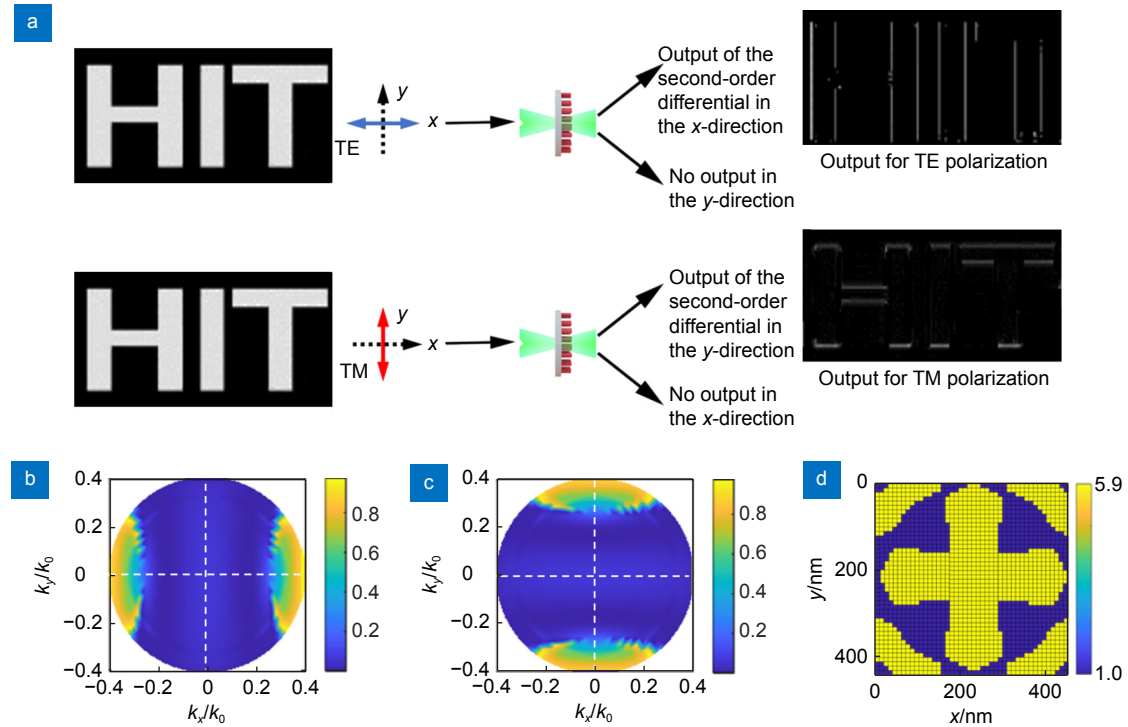
团队介绍

哈尔滨工业大学物理学院先进光子学研究所成立于 2014 年, 依托于微纳光电信息系统理论与技术工信部重点实验室和微光学与光子学技术黑龙江省重点实验室。研究所主任为黑龙江省杰出青年科学基金获得者、物理学院副院长丁卫强教授。研究所面向世界科技前沿和国家重大需求, 做最有价值有意义的研究。近年来, 主要聚焦微纳尺度下物质和信息两类基本客体的运动规律及其应用研究, 即“微纳操控”与“光子芯片”两个方向。微纳操控方向主要研究微纳尺度物体在光场及其它物理场作用下的运动及其控制规律, 理解相互作用过程中的基本物理规律, 从而实现微纳尺度下灵活、高效、可控的驱动方式, 实现高性能的微纳机器人。光子芯片方向主要研究如何利用微纳光子结构实现对光场传输特性的调控, 使光的信息属性得到充分开发和利用, 满足后摩尔时代人们对信息处理的实际需求, 支撑未来人工智能和大数据的发展。发展至今, 研究所获得国家自然科学基金、黑龙江省杰出青年基金、工信部前沿探索项目等国家级项目 30 余项, 在 *Nature Photonics*, *Physical Review Letters*, *Light: Science & Application*, *ACS Nano*, *AFM* 等国际权威期刊发表 SCI 论文 100 多篇。研究所培养的多位博士获得全国光学学会优秀博士学位论文提名优秀奖以及哈尔滨工业大学优秀博士学位论文。



Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces

Feng Rui¹, Tian Yaokai¹, Liu Yalong¹, Sun Fangkui¹, Cao Yongyin¹, Ding Weiqiang^{1,2*}



Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces

Overview: With the continuous development of information technology, the requirements for signal processing in various application scenarios have become higher and higher, and the data capacity has also shown explosive growth. The processing of large amounts of data has become a worldwide problem. However, existing electronic technologies have limitations in terms of speed and power consumption, making it difficult to achieve real-time, high-throughput signal processing. In recent years, with the image spatial differentiation playing an increasingly important role in signal processing and other application fields, and the continuous advancement of micro-nano processing technology, optical analog computing has attracted much attention. It avoids the photoelectric conversion in various application scenarios by directly modulating the optical input in the spatial domain. There are two distinct approaches to realize the optical analog computing, one is based on the 4F optical systems, while the other is metasurface structures based on the Green's function method. Among them, the recently developed dielectric metasurfaces can realize various mathematical operations of optical signals, such as differentiation and integration, and has become one of the most interesting scientific and engineering topics. This paper presents the design of polarization-multiplexed optical analog computing metasurfaces based on the Green's function method. Numerical simulations using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method were conducted to investigate the performance of the designed metasurfaces. The final single-layer metasurface structure is entirely binary after topological optimization, which can be constructed using titanium dioxide (TiO_2) and air. Under different linearly polarized light incidences, this topological metasurface can independently tailor the amplitude and phase of the transmitted light field to achieve spatial optical differentiation functionalities. Two

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (12274105), Heilongjiang Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (JQ2022A001), Fundamental Research Funds for the Central Universities (HIT.OCEF.2021020, 2023FRFK06007), and the Joint Guiding Project of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2023A006). The authors thank the HPC Studio at Physics School of Harbin Institute of Technology for access to computing resources through INSPUR-HPC@PHY.HIT.

¹Institute of Advanced Photonics, School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China; ²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

* E-mail: wqding@hit.edu.cn

polarization-multiplexed dual-function analog computing metasurfaces were simulated and verified with the computational results meeting the expected design theory. One of them achieves bright-field imaging and one-dimensional second-order differentiation operations in orthogonal polarization states. The other design is a multiplexed differential system that can control the second-order differentiation operation direction in accordance with different orthogonal linear polarization states. For TE-polarized incidence, one-dimensional second-order differentiation is achieved in the x -direction, with no transmission in the y -direction. For TM-polarized incidence, one-dimensional second-order differentiation occurs in the y -direction, with no transmission in the x -direction, enabling the extraction of edge information in different directions for the orthogonal polarization states. These polarization-multiplexed designs can play a role in more optical computing application scenarios.

Feng R, Tian Y K, Liu Y L, et al. Polarization-multiplexed optical differentiation using topological metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(9): 230172; DOI: [10.12086/oe.2023.230172](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230172)