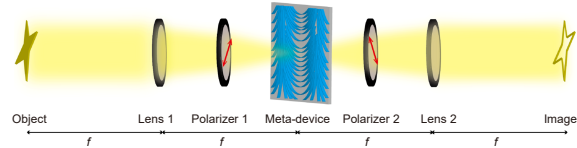


DOI: 10.12086/oe.2022.220175

基于准连续超表面的 宽带高效率边缘检测器件



张海漠^{1,2}, 杨阳^{1,2}, 刘开峰^{1,2},
施林彤^{1,2}, 贺梦瑶^{1,2}, 张晓虎^{1,2*}

¹重庆大学光电工程学院, 重庆 400044;

²重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要: 本文利用准连续纳米带组成的超表面设计了一种光学微分器件, 并实现了对光学图像的一维边缘检测。该器件通过改变准连续纳米带的空间取向实现 $0\sim 2\pi$ 的几何相位调控, 且能在较宽的波段范围内保持较高的能量效率。仿真结果表明, 当照明波长从 400 nm 增加至 1000 nm 时, 该准连续器件均能实现清晰的边缘检测效果。其能量效率最高为 90.27% (600 nm 波长处), 平均能量效率为 64.57% (400 nm~1000 nm)。可以预期, 本文所提方法能促进准连续超表面在图像信息处理、超快光学模拟计算等方面的应用。

关键词: 准连续; 超表面; 宽带; 高效率; 边缘检测

中图分类号: TB383

文献标志码: A

张海漠, 杨阳, 刘开峰, 等. 基于准连续超表面的宽带高效率边缘检测器件 [J]. 光电工程, 2022, 49(10): 220175

Zhang H M, Yang Y, Liu K F, et al. Broadband and high-efficiency edge detection device based on quasi-continuous metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220175

Broadband and high-efficiency edge detection device based on quasi-continuous metasurface

Zhang Haimo^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Liu Kaifeng^{1,2}, Shi Lintong^{1,2}, He Mengyao^{1,2}, Zhang Xiaohu^{1,2*}

¹College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: In this paper, we design an optical differential device based on quasi-continuous metasurface and realize one-dimensional edge detection of an optical image. By changing the spatial orientation of quasi-continuous nanostrips, the device achieves geometric phase in the range of $0\sim 2\pi$, and maintains high energy efficiency over a wide wavelength range. The simulation results show that when the illumination wavelength increases from 400 nm to 1000 nm, the quasi-continuous meta-device can achieve clear images for the target edge. The maximum energy efficiency is 90.27% (the incident wavelength is 600 nm) and the average energy efficiency is 64.57% (the incident wavelength changes from 400 nm to 1000 nm). It can be expected that the proposed method can promote the application of quasi-continuous metasurface in image information processing and ultrafast optical computation.

Keywords: quasi-continuous; metasurface; broadband; high-efficiency; edge detection

收稿日期: 2022-07-24; 收到修改稿日期: 2022-10-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC1522900); 国家自然科学基金资助项目 (61905031)

*通信作者: 张晓虎, zhangxiaohu@cqu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

图像边缘提取是一种应用广泛且快速发展的技术, 在医学影像、增强视觉、自动驾驶等领域发挥着重要作用。目前图像边缘提取有两种常见的方法: 一是传统数字图像处理方法, 该方法通过计算机进行复杂的数据处理; 二是光学模拟计算方法, 该方法使用光学元件进行模拟光计算。虽然数字化方法具有很大的通用性, 但是其计算速度慢、功耗高, 难以实现超大规模的实时图像信息处理。光学模拟计算使用光学方法对光场分布进行数学运算, 克服了传统数字计算面临的诸多问题, 近年来备受研究者们关注。目前已有许多关于光学模拟计算方法的报道, 包括光学差分器^[1]、时域光子积分器^[2]、全光常微分方程求解器^[3]等。然而, 传统的光计算器件大多采用多层膜^[4]、导模共振光栅^[5]等设计, 存在计算精度低, 集成度不高的问题。

超表面是近年来研究者们提出的一种超薄二维材料, 由密集排布的人工超原子组成^[6-10]。不同于传统光学器件常常依赖于传播路径上的相位累积来调控电磁波波前, 超表面通过改变对应超原子的几何尺寸、形状以及空间取向等参数来实现电磁波(振幅、相位、偏振态)的灵活调控^[11-12]。超表面的提出为光学元件和光学系统设计提供了一种新的途径, 现已公开报道了多种性能优异的光学超构器件, 包括超透镜^[13-14]、波片^[15]、大视场彩色全息成像^[16-17]、电磁隐身^[18]、涡旋光束生成器^[19-20]、偏振转换器^[21]、滤波器^[22]等。与传统光学器件相比, 超表面器件体积小、重量轻、使用方便。事实上, 利用超表面强大的电磁调控能力, 亦能设计超轻薄的集成化光计算器件。例如 Zhou 等人使用透射式的超表面结构, 实现了一维光学图像微分^[23]。在此基础上, Xie 等人对上述方法进行改进实现了二维光学图像微分计算^[24]。此外, Abdollahramezani 等人采用一种基于各向异性硅纳米谐振器阵列的全介质超表面实现了一阶积分以及复杂方程式求解等计算^[25]。然而, 当前报道的超表面光学模拟计算器件大多采用离散型超表面结构, 这对器件的电磁性能造成了一定影响。一般而言, 光学模拟计算器件实际所需的相位是沿空间位置连续变化的, 而离散结构编码必须对连续相位进行一定程度的离散化抽样。针对连续变化的相位调控需求, 这种以某一离散值

替代局部区域连续相位需求的操作常常会产生一定程度的偏差。因此离散化的结构设计会降低光学模拟计算器件的性能, 尤其当离散化像素尺寸远大于波长时, 效果会更加恶化。此外, 由于离散结构电磁谐振特性影响, 离散型超表面常常仅在预设波长附近保持较高的能量效率, 偏离预设波长, 能量效率降低, 这将限制超表面光计算器件的运行带宽。近年来, 有报道提出利用悬链线结构来解决离散型超表面结构运行带宽窄的问题, 取得了一系列研究成果^[26-27]。与离散型结构不同的是, 悬链线结构是空间连续分布的, 可以在超表面器件平面进行更加精确的电磁波相位调控。悬链线结构已被用于设计偏折器^[28-29]、平面透镜^[27]、涡旋光束产生器^[30]等电磁功能器件, 并使用仿真和实验方法验证了其优良的电磁性能。

受悬链线光学器件的启发, 本文提出了一种基于准连续超表面的边缘检测器件设计方法。考虑到悬链线宽度沿空间位置变化所带来的电磁性能影响, 本文采用等宽度的准连续纳米带结构实现对物体边缘信息的提取。相较于传统的离散型超表面边缘提取器件, 所提出的准连续超表面器件能够在在一个较宽的波段范围内保持较高的能量效率。本文所设计的准连续超表面器件可将一束线偏振 (linear polarization, LP) 平面波沿 x 轴方向分裂成左旋圆偏振 (left circular polarization, LCP) 分量和右旋圆偏振 (right circular polarization, RCP) 分量, 经过另一线偏振片滤光后, 可以实现物体边缘信息的提取。光路设计如图 1(a) 所示, 光路系统包含两个相同焦距的透镜和两块正交放置的线偏振片, 其中两个透镜共焦放置, 组成经典的光学 $4f$ 系统。将设计的准连续超表面边缘检测器件置于 $4f$ 系统的频谱面上, 原始图像位于 $4f$ 系统物面 (透镜 1 的前焦面) 处, 最终在 $4f$ 系统像面 (透镜 2 的后焦面) 上得到物体的边缘信息。偏振片 1 用于产生线偏振光, 偏振片 2 进行滤波操作, 放置位置如图 1(a) 所示。仿真结果表明该结构可以显著提高超表面边缘检测器件的宽波段能量效率, 其在入射波长 600 nm 处能量效率达到 90.27% , 在 $400\text{ nm}\sim 1000\text{ nm}$ 波段范围内的平均能量效率为 64.57% 。相对于离散型超表面边缘检测器件, 本文提出的准连续型超表面器件具有更高的宽带能量效率, 在图像信息处理、图像识别、机器视觉等方面有着潜在的应用价值。

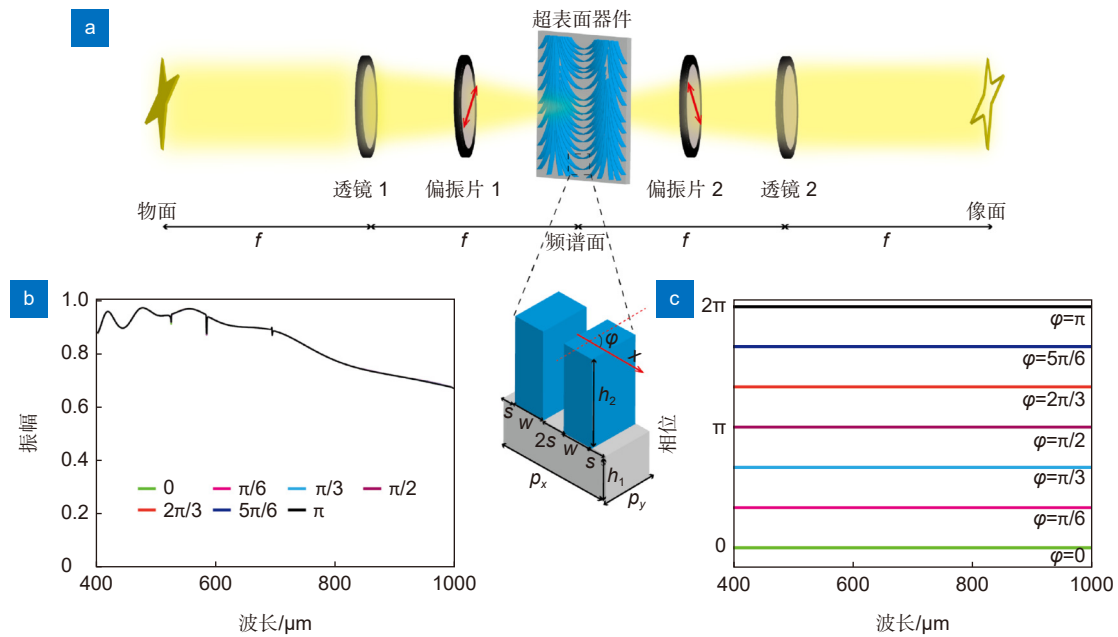


图 1 (a) 用于边缘检测的光学 4f 系统示意图; 在 LCP 光正入射条件下透射 RCP 分量的振幅 (b) 及相位 (c) 响应
 Fig. 1 (a) Schematic diagram of a 4f optical system for edge detection; Amplitude response (b) and phase response (c) for the transmitted RCP light with LCP light normal incidence

2 准连续超表面边缘检测器件的原理及设计

2.1 基于 PB 相位超表面实现一维边缘检测的原理

根据 Zhou 等人^[23]所介绍的一维光学边缘检测方法, 将超表面上 PB 相位设计为 $\Phi(x, y) = \frac{2\pi \cdot x}{\Lambda}$ (LCP 光照明情况下), 对所选图像进行边缘检测, 光路如图 1(a) 所示。我们分析一维边缘成像的机理, 在 LCP 和 RCP 光照明下, 位于 4f 系统物面处光场分布为 $E_0(x_0, y_0)$ 的物体经过光路系统后, 会在像面位置产生移动方向相反的像。当使用 LP 光照明时, 其可以分解为 LCP 和 RCP 分量在 4f 系统像面的输出电场可以表示为^[23]

$$E_{\text{img}}(x, y) = E_0[(x-\Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} + E_0[(x+\Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $\Delta = \lambda f / \Lambda$ 为像移, λ 是波长, f 是透镜焦距, Λ 为预设的相位周期。我们得到两幅反向偏移的图像, 对应于出射偏振为 RCP 和 LCP, 两幅图像重叠区域合成为线偏振光, 再经过第二个偏振片滤光后, 得到的光场分布为

$$E_{\text{edge}}(x, y) = \{E_0[(x+\Delta), y] - E_0[(x-\Delta), y]\} \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当像移 Δ 较小时, 得到的就是物体的边缘信息。

2.2 准连续超表面设计

本文采用的准连续超表面结构由一系列具有相同宽度的准连续纳米带组成, 通过不断改变准连续纳米带结构的取向角来实现所需的 PB 相位调控。使用等效光栅结构对准连续超表面的光学特性进行简化分析, 简化后的等效光栅如图 1(a) 中的插图所示。由于二氧化钛 (TiO_2) 具有从可见光区到中红外波段的透明窗口^[31], 其折射率实部大, 虚部小, 与光波耦合作用强^[32], 易达到 $0 \sim 2\pi$ 相位延迟, 并且保持高效率。且其与 CMOS 工艺兼容, 因此选择 TiO_2 作为超表面结构层材料。首先使用商业软件 CST Microwave Studio 对结构参数进行扫描, 得到优化后的结构参数, 基底材料设为二氧化硅 (SiO_2), $p_x = 360 \text{ nm}$, 仿真中高度 h_1 设为 300 nm 。 TiO_2 光栅高 $h_2 = 600 \text{ nm}$, 沿 x 轴方向宽度 $w = 100 \text{ nm}$, 沿 y 轴长度 $p_y = 200 \text{ nm}$ 。左旋圆偏振电磁波从基底侧照明, 使用 CST 软件计算该等效光栅结构在透射端的交叉圆偏振光响应结果, 边界条件在 x 和 y 轴方向设置为 unit cell, z 轴方向设为 open。为了方便, 在仿真计算等效光栅电磁性能时并没有直接改变等效光栅的取向角 φ , 而是改变入射圆偏振光的初始偏振方向, 这与直接改变等效光栅的取向角是等价的。图 1(b)~1(c) 给出了在 $400 \text{ nm} \sim 1000 \text{ nm}$ 波长范围内等效光栅选取不同取向角 φ 时的

电磁响应, 图 1(b) 显示交叉圆偏振光的振幅在可见光区始终高于 0.8, 在近红外短波区高于 0.67, 且振幅几乎不随着取向角 φ 改变而发生变化。图 1(c) 表明随着取向角 φ 的增大, 相位变化始终符合 PB 相位预期 $\Phi = 2\varphi$ 的相位关系。图 1(b)~1(c) 的仿真结果表明, 等效光栅具有效率高、工作频谱宽的优点。事实上, 等效光栅是准连续超表面结构在极小区域内的极限近似, 其仿真的电磁响应亦是准连续型超表面电磁响应的近似结果。然而这种简化分析方法已被证明是有效的, 在一些相关工作中被广泛用于分析其他复杂超表面的电磁性质^[28,33-34]。

用于一维边缘检测的准连续超表面全模如图 2(a) 所示, 我们截取其中一个局部进行放大, 如图 2(b)。准连续超表面的设计可以分为以下四步: 1) 在边长为 L 的方形区域内等间距选取 $N \times N$ 个起始点。考虑到我们计算资源的限制, L 设置为 $28.8 \mu\text{m}$, N 设置为 80。2) 选定某一起始点并根据取向角函数关系 $\varphi(x,y) = \frac{\Phi(x,y)}{2} = \frac{\pi \cdot x}{\Lambda}$ 计算该起始点所对应的取向角, 其中 $\Lambda = 18 \mu\text{m}$ 。以某一起始点 $A_0(x_{A_0}, y_{A_0})$ 为例, 如

图 2(c) 所示, 计算出该点的取向角 $\varphi_{A_0} = \frac{\pi \cdot x_{A_0}}{\Lambda}$, 该起始点沿角度正方向移动步长 S 的下一个点 $A_1(x_{A_1}, y_{A_1})$ 的坐标为: $x_{A_1} = x_{A_0} + S \times \cos(\varphi_{A_0})$, $y_{A_1} = y_{A_0} + S \times \sin(\varphi_{A_0})$ 。事实上, 移动步长 S 越小, 结构的连续性越好, 但是器件设计所需的计算机内存空间会越大, 计算时间也相应增加, 综合考虑后移动步长 S 设置为 20 nm 。后续的点 $A_2(x_{A_2}, y_{A_2})$ 、 $A_3(x_{A_3}, y_{A_3})$ 等可以根据沿角度正方向各个点的坐标迭代公式: $x_{A_n} = x_{A_0} + S \times \cos(\varphi_{A_0}) + \dots + S \times \cos(\varphi_{A_{n-1}})$ 和 $y_{A_n} = y_{A_0} + S \times \sin(\varphi_{A_0}) + \dots + S \times \sin(\varphi_{A_{n-1}})$ 计算得出, 直至某点超出超表面器件预设的边界或距离其他准连续纳米带上的点太近而达到中断条件 (本文设置为 160 nm), 如图 2(d)。用相同的方法我们可以计算出起始点 $A_0(x_{A_0}, y_{A_0})$ 沿角度负方向的点 $A'_1(x_{A'_1}, y_{A'_1})$ 、 $A'_2(x_{A'_2}, y_{A'_2})$ 等, 不过此时坐标迭代公式变为: $x_{A'_n} = x_{A_0} - S \times \cos(\varphi_{A_0}) - \dots - S \times \cos(\varphi_{A'_{n-1}})$ 和 $y_{A'_n} = y_{A_0} - S \times \sin(\varphi_{A_0}) - \dots - S \times \sin(\varphi_{A'_{n-1}})$ 。重复上述步骤后就可以得到起始点 $A_0(x_{A_0}, y_{A_0})$ 对应的准连续纳米带上的系列点, 如图 2(e) 所示。3) 将这些点一一连接, 得到一条准连

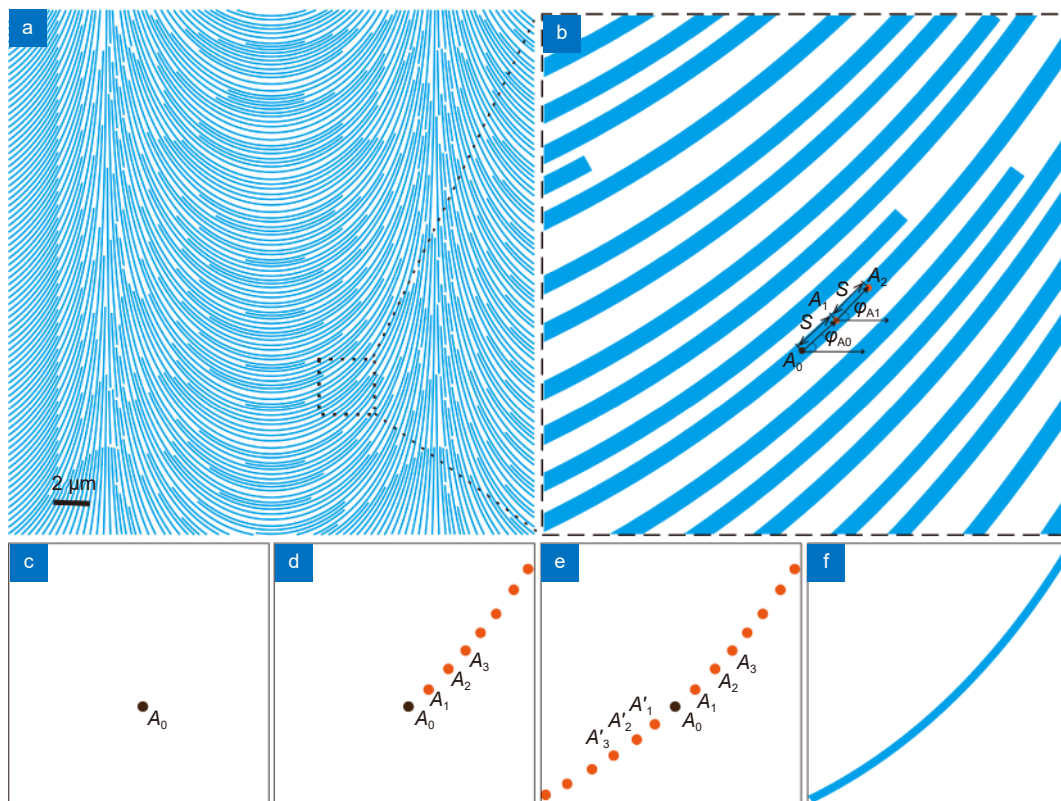


图 2 (a) 准连续超表面边缘检测器件结构; (b) 设计样品局部放大图; (c)~(f) 单根准连续纳米带设计过程示意图

Fig. 2 (a) The quasi-continuous metasurface device for edge detection; (b) Higher magnified image of the designed sample; (c)~(f) Schematic diagram of the design process for one quasi-continuous nanoribbon

续的线, 并将这条线的宽度设置为 100 nm, 最终得到一条准连续的纳米带结构, 如图 2(f) 所示。4) 选定其他起始点并重复步骤 2)~3), 直到遍历步骤 1) 中预设的所有起始点, 这样得到的一系列准连续纳米带结构即为设计的准连续超表面边缘检测器件结构, 如图 2(a) 所示。

3 结果与分析

为了验证所设计器件的边缘检测能力, 利用 CST 软件对图 2(a) 所示的准连续超表面结构进行电磁性能计算。在 x 、 y 和 z 方向的边界条件都设置为 open, 该结构分别使用 LCP 和 RCP 平面波照明, 过程包含三步: 1) 使用 LCP 平面波从基底侧照明样品, 提取透射端距离超表面 0.3 μm 处的 RCP 光场, 将其乘以待检测图像的频谱后做傅里叶逆变换, 得到沿 x 轴正方向偏移像场 $E_0[(x-\Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$ 。2) 使用 RCP 电磁波进行照明, 进行类似的操作后得到沿 x 轴负方向偏移的像场 $E_0[(x+\Delta), y] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$ 。3) 根据式 (2) 将两次所得的像场分布相减得对应振幅分布, 然后取平方得到图像的边缘信息。在仿真过程中, 照明波长依次设置为 400 nm~1000 nm, 以验证所设计准连续超表面边缘检测器件的宽带运行特性。待检测图像为四角星形结构, 如图 3(a) 所示。图 3(b)~3(h) 分别为波长 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm、900 nm 和 1000 nm 的电磁波照明时所得的边缘检测效果。可以看出检测结果在 y 轴方向出现边缘信息丢失的现象,

这是由于该器件仅使 LCP 与 RCP 光场在 x 轴方向产生反向位移, 而在 y 轴方向没有发生相对位移, 第二块偏振片将 y 轴方向的信息一并滤除, 导致 y 轴方向存在边缘信息丢失的现象。若使用二维边缘检测相位分布进行样品设计^[35], 可以实现二维的边缘提取, 改善此处信息丢失的现象。从图 3(b)~3(h) 宽带检测结果中可以看出, 随着照明波长的变化, 所得的图像边缘颜色会产生相应变化, 但是轮廓分布是一致的, 证明了器件的宽波段运行能力。

为了进一步验证器件宽带高效率的优异性能, 我们计算了照明波长为 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm、900 nm 和 1000 nm 时准连续超表面边缘检测器件的能量效率^[23] $\eta = \frac{E_{\text{LCP}} + E_{\text{RCP}}}{E_{\text{INRCP}} + E_{\text{INLCP}}}$, 其中 E_{INRCP} 、 E_{LCP} 分别为第一步仿真中的入射能量及在 0.3 μm 处提取的交叉偏振能量, E_{INLCP} 、 E_{RCP} 分别为第二步仿真的入射能量和提取的交叉偏振能量。计算的效率如图 4 中的蓝色五角星 ‘★’ 所示, 其在 400 nm~1000 nm 的范围内, 能量效率均大于 38.47%, 平均能量效率为 64.57%, 在照明波长为 600 nm 时能量效率为 90.27%。我们使用离散化纳米棒结构设计了一组对比全模仿真, 纳米棒与准连续纳米带的宽度 (100 nm) 和高度 (600 nm) 相同, 纳米棒长度、周期分别设为 300 nm 和 360 nm。使用此离散型纳米棒结构编码一维边缘检测器件, 计算其全模结构在各波长照明时的能量效率, 如图 4 中的红色菱形 ‘◆’ 所示。虽然其在某一波长附近 (500 nm) 具有较高的能量效率, 但是其在 400 nm~1000 nm 波段范围内的平均能量效

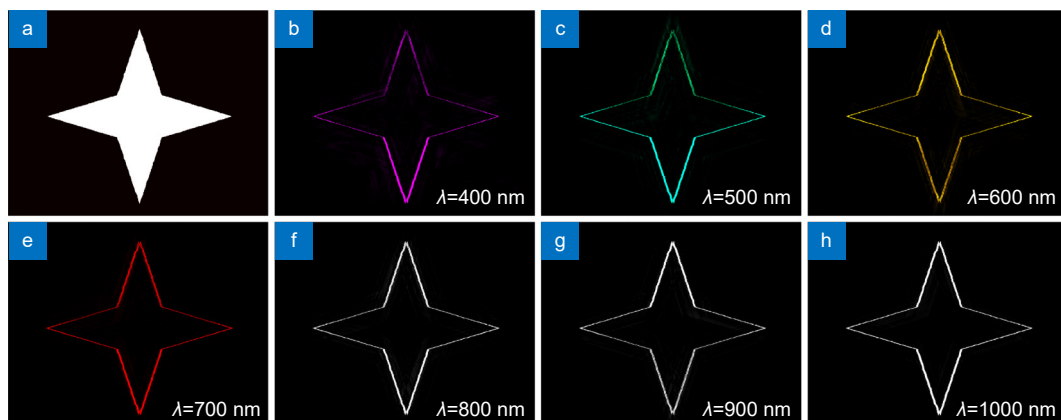


图 3 (a) 待检测的星形图像; (b)~(h) 当入射波长分别为 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm、800 nm、900 nm 和 1000 nm 时, 边缘检测效果

Fig. 3 (a) The star image to be detected; (b)~(h) The images for the target edge at the incident wavelengths of 400 nm, 500 nm, 600 nm, 700 nm, 800 nm, 900 nm and 1000 nm

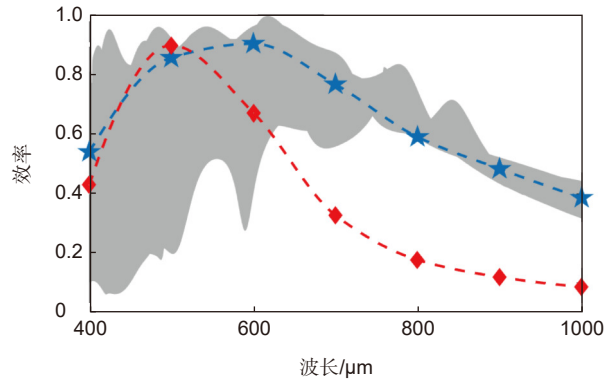


图 4 不同波长入射时准连续型 (蓝色五角星) 和离散型 (红色菱形) 超表面边缘检测器件的能量效率; 灰色区域表示等效光栅周期变化时的交叉偏振能量效率

Fig. 4 Energy efficiency of the quasi-continuous (blue pentagrams) and discrete (red diamonds) metasurface edge detection devices with different incidence wavelengths; The gray area represents the cross-polarization energy efficiency with changing the equivalent grating's period

率仅为 38.62%，显著低于本文所提出的准连续型边缘检测器件平均效率。此处以长度 300 nm，周期 360 nm 的纳米棒离散型超表面为例进行对比说明，事实上，改变纳米棒尺寸，亦能得到类似的效果。对比可知，相较于基于离散型超表面的边缘检测器件，准连续器件具备在较宽的波段范围内保持较高的平均能量效率的优势。此处所得的能量效率与本文开头所提的等效光栅模型预测的效率是相关的。观察图 2(a) 的准连续纳米带分布情况，虽然在设计过程中将两条相邻的准连续纳米带中心线之间的最小距离设为 160 nm，但是实际超表面器件上的绝大多数区域内相邻的两条准连续纳米带中心线之间的距离常大于这个最小距离，这将影响到器件最终的能量效率。为了量化这种影响，利用 CST 软件计算了等效光栅周期变化时的交叉偏振能量效率 (图 1(a) 参量 p_x 从 320 nm 增加至 1400 nm)，结果为图 4 中所示的灰色区域。明显地，其能量效率在短波长照明时随等效光栅周期差异而产生较大变化 (灰色区域上下包络线差异大)，长波长照明时表现较为稳定。此外，实际的全模效率处于灰色区域内，表明器件能量效率与等效光栅预测效率是吻合的，各个准连续纳米带间隔差异综合决定了最终的器件效率。图 3、图 4 的仿真结果表明，本文设计的准连续纳米带超表面器件可在 400 nm~1000 nm 波长范围内提取图像的边缘信息，且具备较高的平均能量效率。

4 结论

综上所述，本文提出了一种基于准连续超表面的宽带高效率边缘检测器件设计方法，实现了整个可见

光及近红外波段高平均效率的边缘检测。仿真结果表明该器件在 400 nm~1000 nm 的波长范围内均能实现物体边缘的清晰成像，器件能量利用效率在 600 nm 时达到 90.27%，在 400 nm~1000 nm 波段范围内平均能量效率为 64.57%。相比于传统离散型超表面边缘检测器件，本文所设计的准连续器件具备更高的宽带平均能量效率。该工作在信号处理、光通信和机器视觉等领域具备一定的研究价值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Slavik R, Park Y, Ayotte N, et al. Photonic temporal integrator for all-optical computing[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(22): 18202–18214.
- [3] Yang T, Dong J J, Lu L J, et al. All-optical differential equation solver with constant-coefficient tunable based on a single microring resonator[J]. *Sci Rep*, 2014, **4**: 5581.
- [4] Doskolovich L L, Bykov D A, Bezuš E A, et al. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(5): 1278–1281.
- [5] Bykov D A, Doskolovich L L, Morozov A A, et al. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(8): 10997–11006.
- [6] 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.
- [7] Luo X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(4): 1804680.
- [8] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 255–275.
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [9] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic

- metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(1): 200008.
- [10] Wang H T, Hao C L, Lin H, et al. Generation of super-resolved optical needle and multifocal array using graphene oxide metalenses[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(2): 200031.
- [11] Gao H, Fan X H, Xiong W, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(11): 210030.
- [12] Tang D L, Chen L, Liu J, et al. Achromatic metasurface doublet with a wide incident angle for light focusing[J]. *Opt Express*, 2020, 28(8): 12209–12218.
- [13] Tang D L, Chen L, Liu J J. Visible achromatic super-oscillatory metasurfaces for sub-diffraction focusing[J]. *Opt Express*, 2019, 27(9): 12308–12316.
- [14] Zhou Y, Liang G F, Wen Z Q, et al. Recent research progress in optical super-resolution planar meta-lenses[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(12): 210399.
周毅, 梁高峰, 温中泉, 等. 光学超分辨平面超构透镜研究进展[J]. *光电工程*, 2021, 48(12): 210399.
- [15] Yu N F, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(12): 6328–6333.
- [16] Zhang X L, Pu M B, Guo Y H, et al. Colorful metahologram with independently controlled images in transmission and reflection spaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29(22): 1809145.
- [17] Wan W W, Gao J, Yang X D. Full-color plasmonic metasurface holograms[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 10671–10680.
- [18] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. All-metallic wide-angle metasurfaces for multifunctional polarization manipulation[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, 2(3): 180023.
- [19] Li Y, Li X, Chen L W, et al. Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. *Adv Opt Mater*, 2017, 5(2): 1600502.
- [20] Jin J J, Luo J, Zhang X H, et al. Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 24286.
- [21] Yue Z, Li J T, Li J, et al. Terahertz metasurface zone plates with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, 1(3): 210014.
- [22] Li Z, Wang C T, Kong W J, et al. Broadband achromatic metasurface filter for apodization imaging in the visible[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 200466.
李柱, 王长涛, 孔维杰, 等. 用于可见光波段切趾成像的宽带消色差超表面滤波器[J]. *光电工程*, 2021, 48(5): 200466.
- [23] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, et al. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116(23): 11137–11140.
- [24] Xie Z Q, He Y L, Wang P P, et al. Two-dimensional optical edge detection based on Pancharatnam-Berry phase metasurface[J]. *Acta Phys Sin*, 2020, 69(1): 014101.
谢智强, 贺炎亮, 王佩佩, 等. 基于Pancharatnam-Berry相位超表面的二维光学边缘检测[J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 014101.
- [25] Abdollahramezani S, Chizari A, Dorche A E, et al. Dielectric metasurfaces solve differential and integro-differential equations[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(7): 1197–1200.
- [26] Li X, Pu M B, Wang Y Q, et al. Dynamic control of the extraordinary optical scattering in semicontinuous 2D metamaterials[J]. *Adv Opt Mater*, 2016, 4(5): 659–663.
- [27] Luo X G, Pu M B, Li X, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light Sci Appl*, 2017, 6(6): e16276.
- [28] Wang Y Q, Pu M B, Zhang Z J, et al. Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection[J]. *Sci Rep*, 2016, 5: 17733.
- [29] Guo Y H, Yan L S, Pan W, et al. Scattering engineering in continuously shaped metasurface: an approach for electromagnetic illusion[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 30154.
- [30] Li X, Pu M B, Zhao Z Y, et al. Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 20524.
- [31] Kischkat J, Peters S, Gruska B, et al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(28): 6789–6798.
- [32] Devlin R C, Khorasaninejad M, Chen W T, et al. Broadband high-efficiency dielectric metasurfaces for the visible spectrum[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113(38): 10473–10478.
- [33] Pu M B, Li X, Ma X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Sci Adv*, 2015, 1(9): e1500396.
- [34] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298–302.
- [35] Zhou J X, Qian H L, Zhao J X, et al. Two-dimensional optical spatial differentiation and high-contrast imaging[J]. *Natl Sci Rev*, 2021, 8(6): nwaaw176.

作者简介



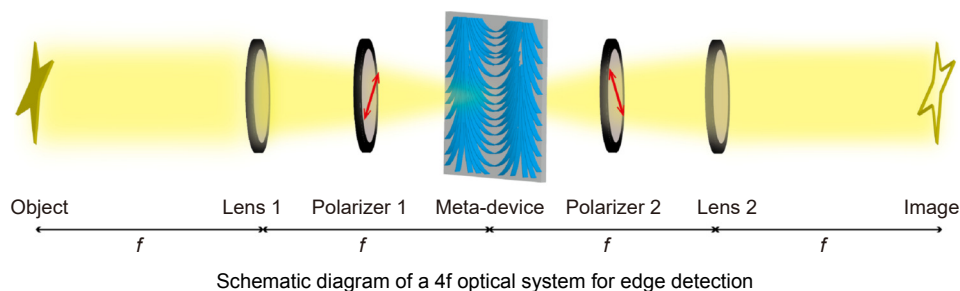
张海漠(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事超表面光学模拟计算研究。
E-mail: haimoli1998@163.com



【通信作者】张晓虎(1989-), 男, 博士, 讲师。主要从事微纳光学器件研究。
E-mail: zhangxiaohu@cqu.edu.cn

Broadband and high-efficiency edge detection device based on quasi-continuous metasurface

Zhang Haimo^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Liu Kaifeng^{1,2}, Shi Lintong^{1,2}, He Mengyao^{1,2}, Zhang Xiaohu^{1,2*}



Overview: Image edge extraction is a widely used and rapidly developing technology, playing an important role in medical imaging, enhanced vision, automatic driving and other fields. In recent years, there has been growing interest in developing miniature metasurface devices to obtain image edge information. Currently, it has been reported that discrete metasurface edge detection devices are used to obtain image edge information, but discrete metasurfaces often maintain a high energy efficiency only near the preset wavelength, and the energy efficiency decreases when deviating from the preset wavelength, which will limit the operating bandwidth of the metasurface optical computing device. Here, an optical differential device is designed by using a metasurface composed of quasi-continuous nanostrips to realize one-dimensional images edge detection. By changing the spatial orientation of quasi-continuous nanostrips, the device achieves geometric phase in the range of $0\sim 2\pi$, and maintains high energy efficiency over a wide wavelength range. The optical path system consists of two linear polarizers and two lenses with the same focal length, of which two lenses are placed in a confocal position to form a classical 4f optical system. The designed quasi-continuous metasurface edge detection device is placed on the Fourier plane of the 4f optical system. The original image is located on the object plane of the 4f optical system (at the front focal plane of the lens 1), and the object edge information is finally obtained on the image plane of the 4f optical system (at the rear focal plane of the lens 2). The simulation results show that the designed sample can achieve high average energy efficiency edge detection in the whole visible and near-infrared bands. Specifically, the quasi-continuous meta-device can obtain a clear image of object edge in the wavelength range of 400 nm~1000 nm, the energy efficiency of the device reaches 90.27% at the wavelength of 600 nm, and the average energy efficiency is 64.57% at the wavelength of 400 nm~1000 nm. Compared with the traditional edge detection devices based on discrete metasurface, the quasi-continuous devices have higher broadband average energy efficiency. Hopefully, this work enjoys many research merits in signal processing, optical communication and machine vision.

Zhang H M, Yang Y, Liu K F, et al. Broadband and high-efficiency edge detection device based on quasi-continuous metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(10): 220175; DOI: [10.12086/oe.2022.220175](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220175)

Foundation item: National Key R&D Program of China (2020YFC1522900) and National Natural Science Foundation of China (61905031).

¹College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; ²Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

* E-mail: zhangxiaohu@cqu.edu.cn