

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

大视场角、等衍射角间隔的矢量超构表面分束器

夏睿星, 赵东, 李子勤, 黄坤

引用本文:

夏睿星, 赵东, 李子勤, 等. 大视场角、等衍射角间隔的矢量超构表面分束器[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240141.

Xia R X, Zhao D, Li Z Q, et al. Metasurface beamsplitter with large field of view and equal diffraction angle interval[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240141.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240141>

收稿日期: 2024-06-17; 修改日期: 2024-07-15; 录用日期: 2024-07-16

相关论文

超表面的矢量光场调控

梁茂伟, 卢德宙, 马耀光

光电工程 2024, 51(8): 240068 doi: 10.12086/oe.2024.240068

超构表面赋能的矢量光场调控、检测与应用

杨辉, 何海蓉, 胡跃强, 段辉高

光电工程 2024, 51(8): 240168 doi: 10.12086/oe.2024.240168

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰

光电工程 2023, 50(8): 230117 doi: 10.12086/oe.2023.230117

Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(2): 220012 doi: 10.29026/oea.2023.220012

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240141

大视场角、等衍射角间隔的 矢量超构表面分束器

夏睿星, 赵东, 李子勤, 黄坤*

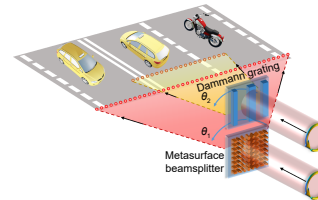
中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系, 安徽合肥 230026

摘要: 激光雷达目前主要使用达曼光栅实现激光分束。然而, 达曼光栅作为周期性衍射光学器件需要满足光栅方程, 其各衍射角的正弦值成等差数列, 无法实现均匀的角度分束, 同时理论衍射效率受到限制。本文将角谱法和随机搜索算法结合, 设计了一种非周期性红外超构表面激光分束器。该分束器可实现 70° 的分束全角等角度间隔的 41 分束。其理论衍射效率达 84%, 高于二元相位器件的理论极限。在实验测试中, 超构表面分束器具有较好的分束均匀性, 可促进激光雷达的发展。

关键词: 超构表面; 分束; 达曼光栅; 衍射光学元件

中图分类号: O439

文献标志码: A



夏睿星, 赵东, 李子勤, 等. 大视场角、等衍射角间隔的矢量超构表面分束器 [J]. 光电工程, 2024, 51(8): 240141

Xia R X, Zhao D, Li Z Q, et al. Metasurface beamsplitter with large field of view and equal diffraction angle interval[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240141

Metasurface beamsplitter with large field of view and equal diffraction angle interval

Xia Ruixing, Zhao Dong, Li Ziqin, Huang Kun*

Department of Optics and Optical Engineering, School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, china

Abstract: LiDAR currently mainly uses a Damann grating as the laser beamsplitter. However, as a periodic diffraction optical device, the Damann grating satisfies the grating equation requiring each diffraction angle's sine value to form an arithmetic progression, which cannot achieve uniform angular beam-splitting. The theoretical diffraction efficiency is also limited. This paper uses the angular spectrum and random search optimization algorithm to design a more flexible non-periodic beamsplitter. Simulations show that the metasurface beamsplitter can achieve a 70-degree field angle of 41 beams with an equal diffraction angle interval. The simulated diffraction efficiency reaches 84% which is higher than the diffraction limit of a binary phase device. In experiments, the metasurface beamsplitter has good beam-splitting uniformity and can promote the development of LiDAR.

Keywords: metasurface; beamsplitter; Damann grating; DOE

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-07-15; 录用日期: 2024-07-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3607300); 国家自然科学基金资助项目 (62322512); 中国博士后科学基金资助项目 (2023M743364)

*通信作者: 黄坤, huangk17@ustc.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

1 引言

随着物联网技术的快速发展, 自动驾驶在过去几年里取得了重大进展, 即将实现工业化^[1]。为保障自动驾驶的安全, 我们需要实现更精确的汽车导航感知系统。目前, 自动驾驶汽车导航的感知系统包括摄像头、毫米波雷达和激光雷达等^[2]。其中, 摄像头的准确度与周围环境的明暗相关。而激光雷达通过主动发射激光照亮周围环境, 从测量激光反射回波得到实际距离, 可以获得比摄像头这类被动探测方案更为精确的距离信息。因此, 激光雷达是无人驾驶所需的重要传感器^[1], 主要由发射器、扫描器、接收器、处理器等部件组成。目前商用的激光雷达有单线至 128 不等的线束数, 其中高线数的激光雷达可以实现更高的分辨率和帧率。为了实现高线束数, 需利用分束器对激光进行分束。在激光分束器设计中, 学界及工业界主要采用以达曼光栅^[3]为代表的二相位台阶衍射光学器件。达曼光栅通过调控二相位台阶转折点的位置可在远场实现等强度的光斑阵列。目前, 2 至 32 束及 64 束^[4]的达曼光栅数值解均已求出, 圆环达曼光栅^[5-6], 三维达曼阵列^[7-8]等广义达曼光栅也得到了研究和发

展。但是, 达曼光栅作为周期性二元衍射光学器件, 主要存在两个方面的问题。第一方面, 达曼光栅各分束光束的衍射角满足光栅方程, 在正入射条件下, 对于给定的周期和波长, 其各衍射级次角度的正弦值构成正比。当衍射角满足小角度近似时, 我们可认为出射线束的衍射角度等间隔分布; 当衍射角较大时, 出射线束的衍射角度就不再均匀。在实际应用场景中, 我们希望衍射角度构成等差数列或其它任意分布。而达曼光栅无法实现在指定的角度序列出射的功能, 如在等差数列角度上实现均匀的光束分束。另一方面, 达曼光栅是二元相位衍射光学器件。二元相位衍射光学器件的理论最大衍射效率为 81%。由于设计差异, 不同分束个数的二元达曼光栅的衍射效率不同。以转折点为 0.73526 的 3 分束达曼光栅和转折点为 0.22057 和 0.44563 的 4 分束达曼光栅为例, 两者的衍射效率分别为 66.42% 及 70.63%^[4], 都低于理论最大衍射效率。

为解决达曼光栅无法实现任意角度调制和低衍射效率的问题, 我们需要使用具有任意波前调控能力的器件。超构表面是具有亚波长特征尺寸的衍射光学器

件, 可以调控光的振幅^[9]、相位^[10-12]、波长^[13]及偏振^[14-15]等参数。为了突破周期性光栅分束器衍射角的局限性, 需要非周期性的波前调制。超构表面具有灵活的二维空间结构分布, 完美契合了分束器非周期性波前相位调控的需要。同时, 超构表面有相位连续调控能力, 其理论最大衍射效率为 100%, 可突破二元相位器件的衍射效率极限。除此之外, 超构表面亚波长周期的纳米结构单元可以消除高级次衍射, 具有最大可达 $\pm 90^\circ$ 衍射角, 可实现超大角度的光束分束。近年来已有超构表面分束的文献报道。Song 等人提出利用复振幅调控的电介质超构表面实现二维选择性衍射^[16]。Ni 等人利用纯相位调控的电介质超构表面实现了大视场角的高均匀性一维和二维分束^[17]。然而, 现有超构表面分束器多为周期性器件, 受制于光栅方程对衍射角的限制, 尚未有实现等角度间隔分束的文献报道。在本文中, 我们提出了一种适用于任意角度分束分布的分束器设计优化算法, 充分发挥了超构表面灵活的相位调控能力。我们利用该算法设计了一款在 70° 全角内等角度间隔分束 41 束的超构表面分束器。仿真和实验测试表明其显著地扩展光束分束器的功能。

2 设计原理和方法

如图 1 所示, 达曼光栅和超构表面分束器均可将入射激光转化为多束光束。超构表面分束器由于其更小的特征尺寸可以实现比达曼光栅更大的衍射角。对于激光雷达应用而言, 由于达曼光栅的衍射角无法覆盖整个视场角, 以其为分束器的激光雷达依赖外部机械部件实现大视场角的环境扫描。超构表面分束器更大的衍射角可以增大探测范围, 简化外部扫描机械结构, 提高扫描帧率。

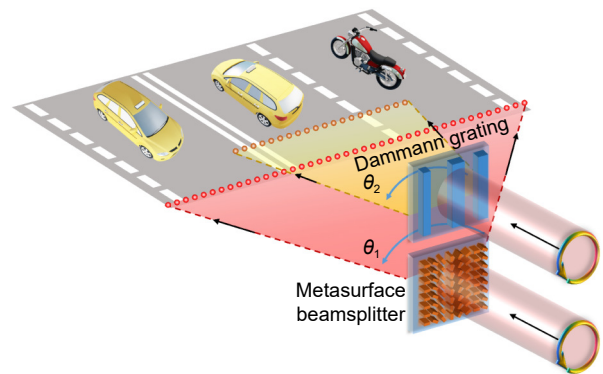


图 1 设计的超构表面分束器和达曼光栅的概念示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the designed metasurface beamsplitter and Dammann grating

2.1 超构表面的单元设计

为了设计高效率的超构表面单元, 我们使用时域有限差分法对超构表面单元进行了仿真。分束器的设计波长为 1550 nm, 该波长属于红外通信窗口, 具有成熟的配套激光器、探测器等器件。由于液态水对该波长具有较大的吸收, 1550 nm 激光对人眼相对安全。作为激光雷达的重要部件, 该分束器设计在 1550 nm 波长, 可以承受较高的激光功率, 提高信噪比。如图 2(a) 所示, 超构表面单元由 500 μm 厚的二氧化硅基底和 760 nm 高的非晶硅柱组成。该器件采用几何相位原理调控光的相位, 当入射圆偏振光通过超构表面时, 出射光将变为正交圆偏振光, 并附带 2θ 的相位, 其中 θ 是硅柱的面内旋转角。由于硅柱的平面投影为长方形, 满足 C2 对称的硅柱携带的相位为转角的两倍^[18-19]。相较于传播相位调控, 几何相位调控可以提供更准确的相位响应。在实际加工过程中, 当硅柱小幅偏离设计尺寸时, 其携带的几何相位由于转角不变而不受影响, 从而对加工误差具有更大宽容度。通过全波仿真, 我们将周期确定为 650 nm, 超构表面的周期应小于半波长, 可消除高级次衍射。如图 2(b) 所示, 我们计算了此周期下, 不同长度和宽度的超构表面结构单元的圆偏振光转化效率。我们选取几何尺寸为 480 nm, 宽 240 nm 的矩形硅柱为超构表面的基本组成单元 (图 2(b) 中黑点)。该尺寸的硅柱具有高达 99.2% 理论转化效率, 同时其对角线长度 (536 nm) 较小。因此, 相邻单元的硅柱不易粘连, 便

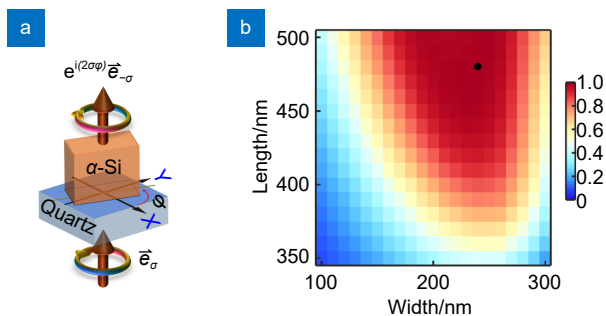


图 2 (a) 超构表面单元示意图, 基底为 500 μm 的石英, 硅膜厚度为 760 nm, 超构表面结构单元周期为 650 nm; (b) 周期 650 nm 时相反手性圆偏振光的效率, 图中黑点标注选取的超构表面结构单元, 其长为 480 nm, 宽为 240 nm, 转化效率为 99.2%

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the metasurface cell, with a length of 480 nm, a width of 240 nm, a height of 760 nm, and a period of 650 nm. The substrate is 500- μm thick; (b) Efficiency of cross circularly polarized light at 650 nm period. The black dot in (b) is the selected metasurface cell; the length and width of the nanopillar are 480 nm and 240 nm, respectively; the conversion efficiency is 99.2%

于器件加工。

2.2 分束器的相位设计

为设计分束器的相位分布, 我们采用快速傅里叶变换和随机搜索相结合的优化算法。直径 1 mm 的分束器需在远场水平方向形成 41 个点状光斑, 0 级光斑居中, 全角为 70° 。各级次衍射角构成等差数列, 因此衍射级次为 m 的衍射角 $\varphi_m = m\Delta\varphi$, 其中, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 20$, $\Delta\varphi$ 为相邻衍射级次设定的角度间隔, 在此为 1.75° 。由于器件光斑沿水平方向展开, 竖直方向无需叠加相位调制, 可以将其相位设计简化为一维相位优化问题。即已知器件表面及远场的强度分布, 求器件表面及远场的相位。基于角谱算法, 我们可以根据器件表面的复振幅求得远场的复振幅分布。长度为 N 的一维离散复振幅 $U(n)$ 的角谱为 $A(m) = \sum_{n=0}^{N-1} U(n) W_N^{mn}$, 其中 $W_N = e^{-2\pi/N}$, 为 N 次单位根之一。分束器将近场超构表面的复振幅傅里叶变换为远场指定角度出射的光束。

为实现大视场角的等角度间隔分束, 我们首先需要确定远场强度优化目标。远场的强度分布可用衍射角度的函数描述。由离散傅里叶变换公式可知, 空间频率对应角度的正弦值构成等差数列 $\theta_n = \arcsin\left(\frac{\lambda}{L}(n - N/2)\right)$, 其中 λ 为波长, L 为计算窗口的长度, N 为向量长度, n 为向量索引, $0 \leq n < N - 1$ 。由于等间隔的衍射角度 φ_m 不与格点 θ_n 重合, 其无法直接用 θ_n 上的强度数列描述。为获得更高的计算精度, 我们将一个超构表面单元周期分成四个具有相同相位的像素单元, 此时计算周期为 162.5 nm。我们增大计算窗口长度以缩小频率间隔, 用更多离散点近似表示远场不同衍射级次的光束。通过将实际尺寸为 1 mm 的器件外填充零至 20 mm 的计算窗口, 我们得到 20 倍的频率格点, 进而可较为准确地描述远场各衍射级次光束的细节。得益于快速傅里叶变换 $O(N \log(N))$ 的较低计算复杂度^[20], 增加傅里叶变换向量长度的时间代价较小。由衍射光学可知, 不同衍射角出射的分束光束的远场发散角与其衍射角有关。以 θ 角从长度为 L 的狭缝出射的平面波的复振幅可写为 $U_i(x) = e^{-ik_x \sin\theta} \text{rect}(x/L)$ 。其傅里叶变换为 $FT\{U_i\} = L * \text{sinc}(L(f_x - \sin\theta/\lambda))$ 。因此, 其 0 级斑的远场发散角为 $\Delta\theta = \arcsin(\pi\lambda/L + \sin\theta) + \arcsin(\pi\lambda/L - \sin\theta)$ 。当 $\sin\theta \gg \pi\lambda/L$ 时, 其 0 级斑的远场发散角为正入射时远场发散角的 $1/\cos\theta$ 倍。我们将各衍射级次分束的单缝衍射图样强度进行叠加, 可得

远场光强的理论优化目标为

$$I_{\text{target}}(f_x) = \sum_{n=-20}^{20} \text{sinc}^2\left(\frac{L}{\beta}\left(f_x - \frac{\sin\theta_n}{\lambda}\right)\right), \quad (1)$$

其中: f_x 为空间频率, λ 为波长, L 为超构表面直径, θ_n 为各分束衍射角, β 表示衍射极限的远场发散角与目标的远场发散角的比值。为避免出现高于衍射极限的频率成分, 我们将 β 设为 0.9。如图 3(a, b) 所示, 橙色虚线展示了远场强度优化目标。

在确定远场强度优化目标后, 我们采用随机搜索算法求解该一维相位优化问题。为了兼顾远场衍射光强度与强度优化目标的一致性 & 器件的整体衍射效率, 我们将评价函数设置为均方根误差 (RMSE) 和各级次 0 级斑衍射效率 (以各衍射级次 0 级斑光强计) 的线性

叠加

$$E = \sqrt{\frac{\sum(I - I_{\text{target}})^2}{N}} - \alpha \frac{\sum_{\text{0th order}} I}{N_{\text{0th order}}}, \quad (2)$$

其中: I 为当前光强, I_{target} 为目标光强, N 为像素个数, α 为非负的经验系数, 取为 0.25。超构表面的入射光为平面波, 其振幅强度设为 1。为避免陷入局部最优解, 我们将全部 1538 个超构表面单元的优化顺序随机打乱, 然后依次确定各个单元的相位。保持其他单元的相位不变, 此单元的相位依次选取 $0-2\pi$ 范围内的 16 个等间隔相位台阶, 同时计算分别取不同相位台阶时的评价函数值, 从中挑选出评价函数最小的相位更新该单元的相位。我们将随机遍历全部 1538 个超构表面单元视为 1 次迭代。在经过 50 次迭

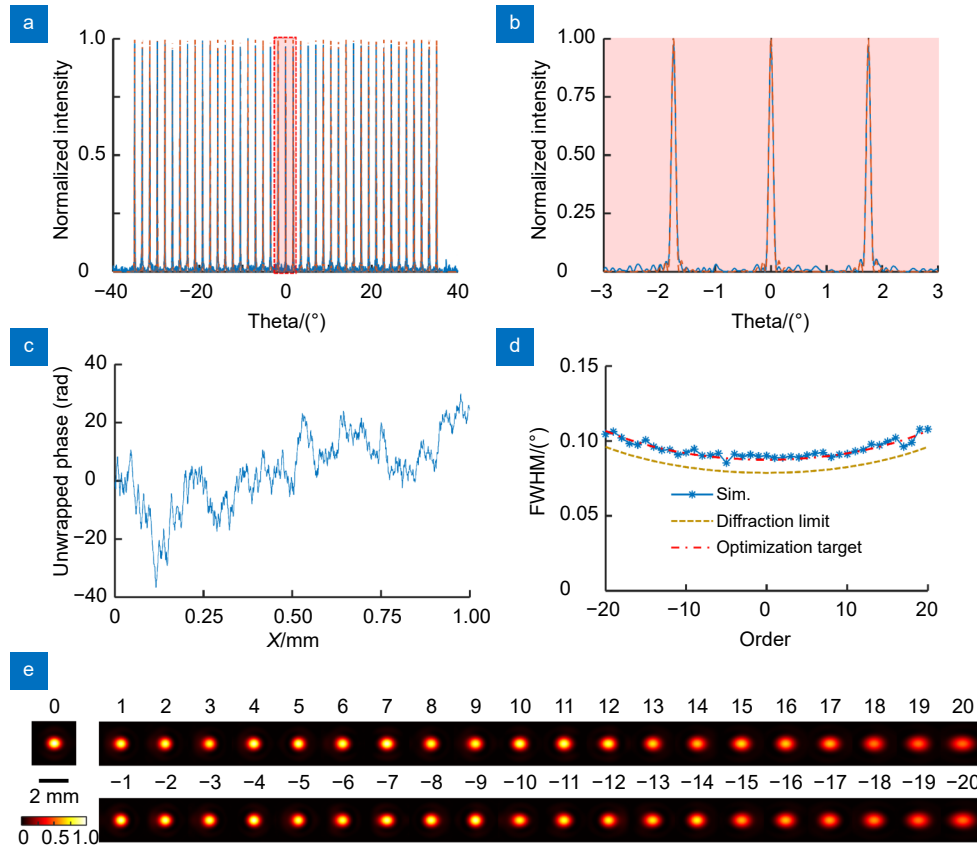


图 3 (a, b) 一维仿真的分束器远场强度的角度分布, 蓝色实线为仿真结果, 橙色虚线为强度优化目标, (b) 为 (a) 中橘色区域的放大展示; (c) 解包裹后的分束器相位; (d) 为 (a) 中各衍射级次光斑的半高全宽, 蓝色星标实线为仿真结果, 红色点划线为优化目标, 黄色虚线为衍射极限; (e) 利用瑞利-索莫非衍射积分数值计算得到的距离器件 40 cm 处平面上的 41 束光斑。每个光斑裁切为 3 mm 大小的方块后拼接在一起

Fig. 3 (a, b) One-dimensional simulation of the beamsplitter intensity angle distribution. The blue line is the simulation result, and the orange dashed line is the optimization target; (c) The unwrapped phase of the beamsplitter; (d) The full width at half maximums (FWHMs) of spots in (a). The blue line is the simulation result, the yellow dashed line is the diffraction limit, and the red dotted line is the optimization target; (e) 41 rays on the 40 cm distancing plane obtained by the numerical Rayleigh-Somerphy diffraction integral. Each light spot is cut into 3 mm squares and spliced together

代后, 图 3(c) 为优化得到的相位分布。由于分束个数 41 为奇数, 分束器的相位中同时包含了奇函数和偶函数成分。该器件的远场光强仿真结果如图 3(a, b) 中蓝色实线所示。可以看出, 归一化远场光强仿真结果和光强优化目标相吻合。全部 41 个光斑强度利用强度峰值的平均值进行归一化后的标准差为 0.011, 极差(最大值与最小值之差)为 0.052。数值仿真表明, 在 $\pm 35^\circ$ 衍射范围内的 41 个光斑总光强占入射光的 84.2%, 即器件的理论衍射效率为 84.2%。图 3(d) 的蓝线为仿真光斑的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM), 其与优化目标 (红色点划线) 吻合。为了进一步验证仿真结果, 我们利用瑞利-索莫非衍射积分数值计算^[21]分束器在 40 cm 处平面的光强分布。如图 3(e) 所示, 高级次光斑较低级次光斑在水平方向有所展宽, 且峰值亮度下降。

2.3 超构表面的加工

本文设计的超构表面分束器采用了标准的微纳加工工艺制备。首先, 在石英衬底沉积 760 nm 厚的非晶硅薄膜。然后, 在硅膜上旋涂厚度为 100 nm 的正电子束光刻胶并进行烘烤。再使用加速电压为 100 kV 的电子束光刻 (JEOL, JBX 6300FS) 对电子束胶进行曝光。显影后, 在电子束胶上沉积 10 nm 厚的铬膜作为掩模。通过剥离工艺将矩形硅柱图案转移到铬膜上。再使用电感耦合等离子体蚀刻机 (Oxford, Plasma Pro System100 ICP380) 蚀刻 760 nm 厚的硅膜。最后, 使用铬刻蚀液去除残留的铬掩模, 得到几何相位超构表面。

3 结果与讨论

在样品加工完后, 我们使用 WITEC 显微镜的白光反射照明模式观察器件的表面形貌。5 倍物镜下的显微图像如图 4(a) 所示, 该样品直径为 1 mm。100 倍物镜下的显微图像 (图 4(b)) 与超构表面相同区域的设计图纸 (图 4(c)) 吻合, 表明样品具有较好的加工效果。从显微图像中可以看出纳米硅柱的竖直方向仅具有重复的超构表面单元结构, 相位调制只存在于水平方向。

图 4(d) 展示了我们搭建的实验表征光路。1550 nm 激光从激光器光纤端面出射, 利用短焦透镜准直为平行光, 出射后经过线偏振片和四分之一波片转化为圆偏振光。圆偏振光在超构表面纳米柱面正入射并在远

场形成 41 个水平分布光斑。仿真中, 该分束器的入射光是均匀平面波。实验上, 为保证入射光场的均匀性, 实验中光束直径被扩束至约 5 mm, 远大于分束器直径 (1 mm), 减少了实验与仿真的偏差。为在远场条件下进行大角度范围拍摄, 我们将钢镱相机 (HAMAMATSU, C14041-10U) 固定在金属杆上。该金属杆可绕超构表面正下方的支点在水平面内旋转, 相机距离转轴 40 cm。由于相机距离超构表面较远, 单个相机像素对应的远场发散全角仅 0.0029° , 可以精细分辨光斑的细节并测量其半高全宽。我们旋转相机在不同衍射级次上依次拍摄 41 个光斑, 其光强分布如图 4(e) 所示, 大部分光斑具有较好的高斯分布。随着衍射级次的增加, 光斑会产生形变, 在水平方向上有所拉伸, 亮度也有所下降。为使照明在超构表面上的光束接近设计的平面波, 入射光束尺寸会大于器件尺寸, 进而导致 0 级光斑存在较强的背景光, 出现过曝现象。图 4(f) 为实验测得的 $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 20$ 级光斑的相对强度。随着衍射级次增加, 衍射角度也逐渐变大, 光强呈下降趋势。各光斑总光强的标准差为 0.179。如图 4(g) 所示, 为分析各级次光斑的均匀度, 我们统计了实验中 $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm 20$ 级光斑的水平及纵向半高全宽。随着级次增大, 横向半高全宽缓慢增加, 而纵向半高全宽基本不变。由于衍射光斑在水平方向上存在一定展宽, 光斑的横向半高全宽平均值为 0.143° , 略大于纵向半高全宽平均值 0.1234° , 与设计结果基本吻合。

本文中超构表面分束器还有很多优化及改进的空间。从设计方法上看, 本文基于标量衍射理论来优化衍射图案, 忽略了光的偏振和矢量性质, 没有考虑到近场耦合效应的影响。各纳米柱采用 FDTD 仿真时, 我们在四周采用了周期性边界条件。实际纳米柱周围的纳米柱的几何相位转角不一定与其相同, 采用周期性边界条件仿真忽略了相邻纳米柱的影响。近场耦合效应可使光在纳米结构之间的传输和重新分配, 这会导致一部分能量被束缚在近场中。从而以倏逝波或反射波形式损耗光能, 将对衍射效率造成负面影响。近场耦合还可改变纳米柱周围的电磁场分布, 使超构表面的波前相位调制偏离原有设计, 从而影响到衍射图案的形状和强度分布。在后续研究中, 考虑到一维分束器在与相位梯度正交的方向上的重复性, 计算区域可简化为狭长条状区域。在计算资源充足时, 进行大

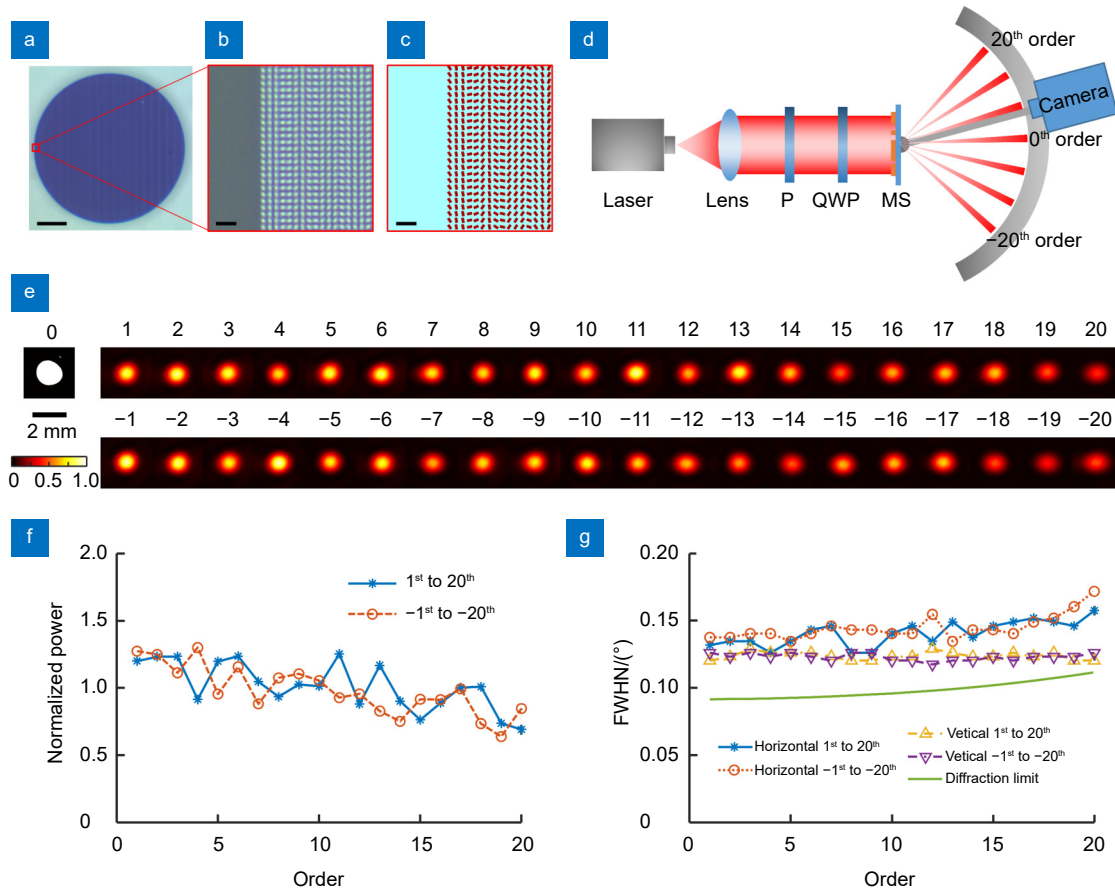


图 4 (a, b) 加工的超构表面的光学显微镜图像。(a) 5 倍物镜, 比例尺为 $200\ \mu\text{m}$; (b) 100 倍物镜, 比例尺为 $2\ \mu\text{m}$; (c) (b) 超构表面相同区域的设计图纸, 比例尺为 $2\ \mu\text{m}$; (d) 实验光路示意图, P、QWP、MS 分别表示偏振片, 四分之一波片和超构表面; (e) 相机采集的不同衍射级次的 41 束光斑。每个光斑裁切为 $3\ \text{mm}$ 大小的方块后拼接在一起; (f) 实验测得的光斑功率。蓝色星标为 1 至 20 级光斑, 橙色圆标为 -1 至 -20 级光斑; (g) 实验测得的光斑半高全宽。蓝色星标实线和橙色圆标点线分别为 1 至 20 级和 -1 至 -20 级的水平方向半高全宽。黄色正三角形虚线和紫色倒三角形点线分别为 1 至 20 级和 -1 至 -20 级的竖直方向半高全宽。绿色实线为光斑横向的衍射极限

Fig. 4 (a, b) Metasurface morphology imaged by 5x and 100x objective microscopes. Scalebars: $200\ \mu\text{m}$ and $2\ \mu\text{m}$; (c) Design drawing of the same area in Fig. 4(b), with a scale of $2\ \mu\text{m}$; (d) Schematic diagram of the experimental optical path. P: polarizer; QWP: quarter-wave plate; MS: metasurface; (e) Captured 41 rays. Each beam is cut into $3\ \text{mm}$ squares and spliced together; (f) Experimentally measured power of beams. The blue line represents the beams from the 1^{st} to 20^{th} orders and the orange dotted line is from the -1^{st} to -20^{th} orders; (g) Experimentally measured FWHMs. The solid blue line with asterisks and the orange dotted line with circles are the horizontal FWHMs from the 1^{st} to the 20^{th} orders and from the -1^{st} to the -20^{th} orders, respectively. The dashed yellow line with regular triangles and the dashed-dotted purple line with inverted triangles are the vertical FWHMs from the 1^{st} to the 20^{th} orders and from the -1^{st} to the -20^{th} orders, respectively. The solid green line is the horizontal diffraction limit.

尺寸全波仿真从而充分考虑纳米柱之间的近场耦合是可能的, 进而使得仿真结果更加精确。

从纳米结构单元角度考虑, 本文中的分束器工作时光束是正入射的。当超构表面单元周期为亚波长时, 由光栅方程可知, 最大衍射角为 90° 。当前超构表面的 70° 分束全角是根据具体需求设计的, 其分束全角可以根据设计需求变得更大。我们对超构表面单元的厚度、周期和长宽等参数进行过扫描。就最大衍射角

而言, 只要保证超构表面的周期小于波长, 其最大衍射角均为 $\pm 90^\circ$ 。但从提高衍射效率角度出发, 周期应较小, 从而保证相位分布的连续性。本器件相位的最大衍射角为 $\pm 35^\circ$, 对 $1550\ \text{nm}$ 的激光等效周期为 $2.7\ \mu\text{m}$, 相当于 4.2 个超构表面周期。如果等效的超构表面周期数进一步减少, 由于相位的离散性增加, 器件效率会迅速降低。

从拓扑优化的角度考虑, 可以优化超构表面单元

的形状及晶格排列方式。超构表面单元的形状需要和入射光的偏振态相匹配。如沿用当前的圆偏振光入射, 则考虑三角形、长方形、五边形及具有各向异性的无定形结构等可以产生几何相位的拓扑结构^[18]。如改用线偏振光入射, 则考虑圆形、方形、长条状及无定形结构等。晶格排列方式方面可以考虑四边形和六边形网格等。六边形网格可能较四边形网格有更高的衍射效率及更弱的采样锯齿效应^[22]。

理论上, 该一维分束器还可被扩展为二维分束器。二维 $M \times N$ 分束的分束器的相位由一维 M 束分束相位和一维 N 束分束相位叠加得到, 即 $\varphi(x, y) = \varphi_{1D_x}(x) + \varphi_{1D_y}(y)$, 其中 $\varphi_{1D_x}(x)$ 和 $\varphi_{1D_y}(y)$ 为一维的分束器相位。该 1 维 41 分束相位可用于构造 41×41 束分束器相位。如果每个方向上的分束数改变, 上述的 φ_{1D_x} 或 φ_{1D_y} 需按照本文讨论的方法分别设计。在本方法中, 只需要设计一维相位分布即可, 优化速度快于二维相位分布的设计速度, 从而提升了器件的设计效率。

4 结 论

本文设计并实验测试了一种红外超构表面激光分束器。将角谱法和随机搜索算法结合, 可优化得到该分束器的相位分布。该分束器在实验测试中实现了等角度间隔、相同半高全宽和具有均匀强度分布的 41 分束效果。相较于现有的二元相位达曼光栅, 该分束器打破了分束衍射角正弦值成正比的制约, 同时具有 70° 的分束全角, 高达 84% 的理论衍射效率。实验测得的光束功率标准差为 0.179, 光束的横向平均半高全宽为 0.143° , 这表明超构表面分束器具有较好的分束均匀性, 将促进激光雷达的发展, 拓展超构表面的应用场景。

参 考 文 献

- [1] Li Y, Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems[J]. *IEEE Signal Process Mag*, 2020, **37**(4): 50–61.
- [2] Leonard J, How J, Teller S, et al. A perception - driven autonomous urban vehicle[J]. *J Field Robot*, 2008, **25**(10): 727–774.
- [3] Dammann H, Görtler K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. *Opt Commun*, 1971, **3**(5): 312–315.
- [4] Zhou C H, Liu L R. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(26): 5961–5969.
- [5] Zhao S, Chung P S. Design of a circular Dammann grating[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(16): 2387–2389.
- [6] Wen F J, Chung P S. Use of the circular Dammann grating in angle measurement[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(28): 5197–5200.
- [7] Yu J J, Zhou C H, Jia W, et al. Three-dimensional Dammann array[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(10): 1619–1630.
- [8] Yu J J, Zhou C H, Jia W, et al. Three-dimensional Dammann vortex array with tunable topological charge[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(13): 2485–2490.
- [9] Fu W W, Zhao D, Li Z Q, et al. Ultracompact meta-imagers for arbitrary all-optical convolution[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 62.
- [10] Zhao D, Dong Z G, Huang K. High-efficiency holographic metacoder for optical masquerade[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(6): 1462–1465.
- [11] Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband achromatic metasurface holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230118.
李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 等. 宽频消色散超表面全息成像[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230118.
- [12] Yang R, Yu Q Q, Pan Y W, et al. Directional-multiplexing holography by on-chip metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(10): 220177.
杨睿, 于千茜, 潘一苇, 等. 基于片上超表面的多路方向复用全息术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(10): 220177.
- [13] Li G X, Zhang S, Zentgraf T. Nonlinear photonic metasurfaces[J]. *Nat Rev Mater*, 2017, **2**(5): 17010.
- [14] 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.
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.
- [15] Zhao H, Wang X K, Liu S T, et al. Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(2): 220012.
- [16] Song X, Huang L L, Tang C C, et al. Selective diffraction with complex amplitude modulation by dielectric metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(4): 1701181.
- [17] Ni Y B, Chen S, Wang Y J, et al. Metasurface for structured light projection over 120° field of view[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(9): 6719–6724.
- [18] Xie X, Pu M B, Jin J J, et al. Generalized pancharatnam-berry phase in rotationally symmetric meta-atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **126**(18): 183902.
- [19] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, **345**(6194): 298–302.
- [20] Johnson S G, Frigo M. A modified split-radix FFT with fewer arithmetic operations[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2007, **55**(1): 111–119.
- [21] Shen F B, Wang A B. Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh-Sommerfeld diffraction formula[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(6): 1102–1110.
- [22] Kim S, Kim J, Kim K, et al. Anti-aliased metasurfaces beyond the Nyquist limit[Z]. arXiv: 2406.11261, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.11261>.

作者简介



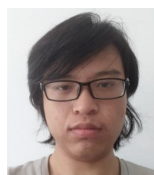
夏睿星 (1999-), 男, 博士研究生, 主要从事超构表面和超构材料方面研究。

E-mail: xrx@mail.ustc.edu.cn



赵东 (1995-), 男, 博士, 博士后, 主要从事超构表面和超构材料方面研究。

E-mail: zd10375@ustc.edu.cn



李子勤 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事非线性超构表面方面研究。

E-mail: qy981124@mail.ustc.edu.cn



【通信作者】黄坤 (1985-), 男, 博士, 特任教授, 博士生导师, 长期从事微型光学成像、全息显示及应用, 利用微型光学成像系统的点扩散函数工程, 在扫描成像 (“点”型 PSF)、卷积成像 (“矩阵”型 PSF)、全息成像 (“面”型 PSF) 等方向开展深入研究。

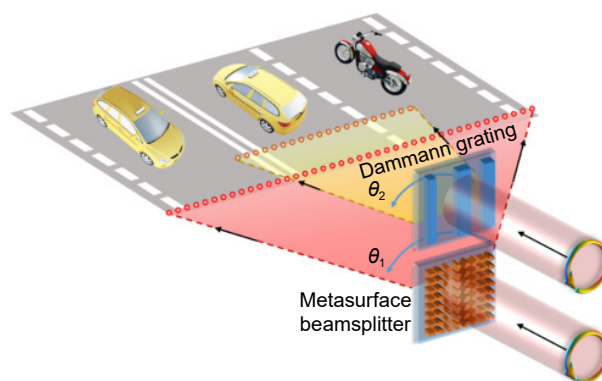
E-mail: huangk17@ustc.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Metasurface beamsplitter with large field of view and equal diffraction angle interval

Xia Ruixing, Zhao Dong, Li Ziqin, Huang Kun*



Schematic diagram of the designed metasurface beamsplitter and Dammann grating

Overview: Autonomous driving has made significant progress in the past few years. LiDAR which can precisely measure the distance to reflecting surfaces is an important sensor for autonomous driving. Multi-line LiDAR is required to improve the accuracy and frame of LiDAR. Dammann gratings are commonly used as laser beamsplitters in multi-line LiDAR. As binary phase diffraction optical devices, they are relatively easy to process. Numerical solutions for Dammann gratings with common numbers of beam-splitting have been studied. However, as a periodic diffraction optical device, Dammann grating satisfies the grating equation requiring each diffraction angle's sine value to form an arithmetic progression.

In this paper, we use the angular spectrum and random search optimization algorithm to design a more flexible non-periodic beamsplitter. The angular spectrum, a discrete Fourier transform of the incident complex amplitude array, can calculate the angular response in the far field. We propose to expand the diffraction calculation window to reduce the frequency interval of the Fourier transform. Using the finer frequency grid, we build the far-field angular target function with equal angle interval beam-splitting. We set the evaluation function as a linear combination of root mean square error and efficiency. This evaluation function setting can take into account both error control and device diffraction efficiency. The random search optimization algorithm only adopts the optimization with a decreasing evaluation function according to the evaluation function. Simulations show that the metasurface beamsplitter can generate 41 beams with a 70° field angle. The normalized standard deviation of the simulated light intensity of each spot is 0.011. The simulated diffraction efficiency reaches 84% which is higher than the diffraction limit of the binary phase device.

To realize such phase modulation, we use full-wave simulation to design an efficient amorphous silicon nanopillar with geometric phase modulation at the 1550-nm wavelength. We use electron beam lithography to process a 1-mm diameter metasurface beamsplitter. Experimental measurements confirm the beam-splitting function of the metasurface. The experimentally measured standard deviation of beam power is 0.179, and the average half-maximum full width of the beam-splitting direction is 0.143° .

Xia R X, Zhao D, Li Z Q, et al. Metasurface beamsplitter with large field of view and equal diffraction angle interval[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(8): 240141; DOI: [10.12086/oe.2024.240141](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240141)

Foundation item: Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFB3607300), National Natural Science Foundation of China (62322512), and China Postdoctoral Science Foundation (2023M743364)

Department of Optics and Optical Engineering, School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, china

* E-mail: huangk17@ustc.edu.cn