

一种 Ku 波段携带轨道角动量的六边形反射型超表面

罗曼,冯瑞,谭秋林*

(中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室,太原 030051)

摘要:为满足光通信等领域对高阶模态电磁波的需求,设计了一种工作在 Ku 波段携带轨道角动量(OAM)的六边形反射型超表面。该超表面采用无源、线极化、单层单元构型,通过调节关键尺寸 p' 实现 360° 反射相位覆盖。基于此,采用 Matlab 与 Ansys 联合仿真,设计了可生成一阶 OAM 波($l=+1$)的 29×29 阵列,并加工实物进行近场测试。仿真与实验结果表明:涡旋波束的螺旋相位与中心场强为零的“甜甜圈”状幅度分布,实测频率为 13.8 GHz。相较于传统正方形设计,六边形结构将涡旋波生成效率从 52.4% 提升至 57.8%,且物理布局更紧凑。

关键词:轨道角动量;涡旋电磁波;六边形反射型超表面;Ku 波段;无源线极化

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0102-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.019

Hexagonal reflective metasurface for carrying orbital angular momentum in the Ku-band

LUO Man, FENG Rui, TAN Qiulin*

(Key Laboratory of Micro/nano Devices and Systems, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To meet the demand for high-order modal electromagnetic waves in optical communications and other fields, a hexagonal reflective metasurface operating in the Ku-band and carrying orbital angular momentum(OAM) has been designed. The metasurface adopts a passive, linearly polarized, single-layer unit configuration and achieves 360° reflection phase coverage by adjusting the key dimension p' . Based on this, a 29×29 array for generating first-order OAM waves($l=+1$) is designed through co-simulation using Matlab and Ansys, and a physical prototype is fabricated for near-field testing. Simulation and experimental results demonstrate that the vortex beam exhibits a spiral phase distribution and a "doughnut"-shaped amplitude profile with zero central field intensity, with the measured frequency at 13.8 GHz. Compared to conventional square designs, the hexagonal structure improves vortex wave generation efficiency from 52.4% to 57.8%, while also offering a more compact physical layout.

Key words: orbital angular momentum, vortex electromagnetic waves, hexagonal reflective metasurface, Ku band, passive linear polarization

0 引言

2011 年,哈佛大学的 GENEVET P^[1]教授及其研究

收稿日期:2024-11-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(62401522)资助;中国博士后科学基金项目(2023M743313)资助;山西省重点研发计划项目(202102030201005)资助;山西省基础研究计划项目(202203021222070)资助;山西省国家留学基金委的部分支持。

作者简介:罗曼(2000—),女,四川泸州人,硕士研究生,现就读于中北大学仪器与电子学院仪器科学与技术专业,主要研究方向为超材料,聚焦于可生成携带轨道角动量涡旋电磁波的反射/透射双功能超表面阵列。

***通信作者:**谭秋林(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为超常规传感技术及仪器。



团队首次提出了“超构表面”的概念。这是一种新型的二维超构材料,能够在亚波长尺度上精确调控光的波前,并由此推导出“广义 Snell 定律”,为人工超构材料向二维化方向发展开辟了新途径。超构表面是一种由亚波长结构单元构成的二维人工材料。它能够在极薄的尺度内,灵活调控光的振幅^[2-3]、相位^[4-7]、偏振^[8-10]等特性,为传统光学器件实现小型化^[11-13]、集成化^[14-15]与智能化^[16-17]提供了新的可能。

携带有轨道角动量(OAM)的涡旋电磁波^[18]在通信领域具有重要应用价值。这类电磁波具备高容量、特殊波前相位等特性,能够实现高速率、高安全性的数据传输。OAM 的模式数在整数范围内有无穷多种可

罗煜,冯瑞,谭秋林:一种ku波段携带轨道角动量的六边形反射型超表面

能,且不同模式之间彼此正交。作为OAM模式数 $l \neq 0$ 的电磁波,涡旋电磁波具有波束中心幅度为零、发散性较强的特点。因此,借助超表面来调控其反射相位,能够突破传统折射定律的限制。早期,TURNBULL G A等人^[19]曾利用螺旋相位板在毫米波频段产生涡旋电磁波。涡旋电磁波作为学术热点历经数十年发展,其相关超表面技术已涌现出多种实现方式,然而现有反射型超表面的单元结构大多局限于正方形设计^[16,20-22]。为此,本文设计一种工作于Ku波段携带OAM的六边形反射型超表面。

1 设计原理

在电动力学中,电磁波既携带能量,也具有动量。动量可进一步分为线动量与角动量:前者密度与能量密度及光速成正比;后者密度则由电场和磁场的分布共同决定。线动量密度 $\vec{p} = \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}^*$,与力学中的情况类似,电磁波的角动量密度 $d\vec{J}/dV$ 与线动量密度 $\vec{p}$ 存在完全相同的关系: $d\vec{J}/dV = \vec{r} \times \vec{p}$ 。其中, $\vec{r}$ 是位置矢量, V 表示体积,即 dV 是体积微元, $\vec{E}$ 和 $\vec{B}$ 分别是电场强度和磁感应强度, ϵ_0 为真空介电常数,电磁波的角动量 $\vec{J}$ 可进一步写为

$$\vec{J} = \epsilon_0 \int \vec{r} \times \text{Re} \{ \vec{E} \times \vec{B}^* \} dV \quad (1)$$

电磁波的角动量 $\vec{J}$ 由自旋角动量 $\vec{S}$ 和OAM $\vec{L}$ 两部分组成。为了简化分析,其表达式如下

$$\vec{S} = \epsilon_0 \int \text{Re} \{ \vec{E}^* \times \vec{A} \} dV \quad (2)$$

$$\vec{L} = \epsilon_0 \int \text{Re} \{ j \vec{E} (\hat{L} \vec{A}) \} dV \quad (3)$$

其中, $\vec{A}$ 表示矢量磁位。自旋角动量与电磁波的极化相关,而OAM则取决于其相位分布。本文采用线极化电磁波作为入射波,利用反射型超表面调控其相位,以生成OAM的涡旋电磁波。天线系统主要由馈源喇叭天线和反射型超表面构成。其工作过程为:从馈源喇叭天线发出入射波,经反射阵列面调制后,形成特定的 $\exp(-jl\varphi)$ 相位分布,最终激发出所需的OAM涡旋波束。在设计中,由于每个超表面单元都能独立调控反射相位,因此需要为每个单元设计对应的相位值,理想情况下应实现 360° 的相位覆盖。

在模型中,本文用矢量 $\vec{r}_f$ 表示馈源喇叭天线的中心位置(相对于坐标原点)。入射电磁波自馈源发出,照射至由 $M \times N$ 个单元构成的反射型超表面上。空间中任意观察点处的总电场,可视为该超表面上所有单

元所产生辐射场的叠加结果,可表示为

$$\vec{E}(\hat{u}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F(\vec{r}_{mn} \hat{u}_0) A(\hat{u}_0 \hat{u}) \times \exp \left\{ -jk_0 \left[|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f| + \vec{r}_{mn} \hat{u} \right] + j\phi_{mn}^c \right\} \quad (4)$$

其中, $A(\hat{u}_0 \hat{u})$ 和 $F(\vec{r}_{mn} \hat{u}_0)$ 分别为单元结构辐射方向图函数和馈源喇叭天线的辐射方向图函数, $\vec{r}_{mn}$ 为第 m 行第 n 个辐射单元结构的位置矢量, ϕ_{mn}^c 为每个单元结构的补偿相位, k_0 为自由空间的波数。

由于携带OAM的涡旋电磁波波束应具有 $\exp(-jl\varphi)$ 相位因子,为了实现OAM涡旋波束,反射型超表面上各个单元结构所需要提供的补偿相位应为

$$\phi_{mn}^c = k_0 \left[|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f| + \vec{r}_{mn} \hat{u}_0 \right] \pm l\varphi_{mn} \quad (5)$$

其中, l 是携带OAM涡旋电磁波的模态数, $\hat{u}_0$ 为主波束方向, φ_{mn} 为反射型超表面单元结构在极坐标下的方位角度值。

2 仿真分析

本文设计并研究了一种工作于Ku波段(中心频率14 GHz)的反射型超表面,其单元结构采用正六边形设计,示意图如图1所示。该单元结构为典型的“三明治”式单层设计,从上至下由顶层、中介质层和底层构成。顶层金属层由铜制成,其核心是六边形几何形状。该六边形的特定一组对顶点与下层介质边界严格对齐。其关键尺寸参数包括外六边形边长 $p=3$ mm,以及用于调节“宽窄”的核心可调金属片宽度 p' ,可调范围为1~5 mm。中间的介质层选用聚酰亚胺作为衬底,其高度 $h=1$ mm。底层同样为铜材质,作为完整的金属反射底板,共同构成了一个高效且可定制的电磁调控单元。相较于传统的四边形单元结构,所设计的结构能够实现更紧密的蜂窝状嵌入式排列,从而形成更为紧凑的布局。

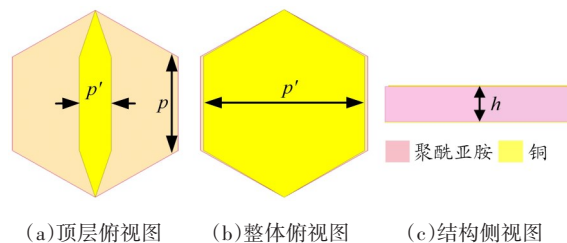
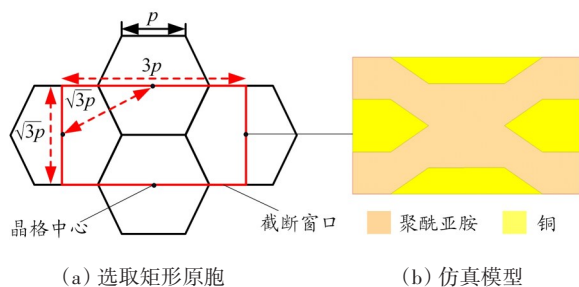


图1 正六边形超表面单元结构设计示意图

本文采用Ansys仿真软件,利用其周期边界功能对设计的超表面单元结构进行深入分析。该方法通过Floquet端口激励起Floquet模式,并直接通过S参数

罗慢,冯瑞,谭秋林:一种ku波段携带轨道角动量的六边形反射型超表面

(主要为反射系数 S_{11})来获取单元的反射特性,从而高效研究平面周期结构的电磁行为。此方法与传统波导端口激励原理相似,但其显著优势在于避免了后处理中复杂的场求解器操作,流程大大简化,计算效率高。在模型设置上,由于单元为六边形,为适配仿真需求,本文将4个六边形单元结构进行拼接,并截取一个长方形(矩形)计算区域,如图2所示。图中, $\sqrt{3}p$ 表示边长 p 的3倍。这一操作可以高效且准确地实现



为了验证所设计的六边形单元能否作为构建超表面的基本“像素”,核心在于评估其电磁波调控能力。本文的研究重点是反射相位的调控。为实现此目的,对顶层金属的关键尺寸 p' 进行了扫参分析,扫描结果如图3所示,图中选取了若干具有代表性的曲线进行展示。可以看出,电磁波反射相位在14 GHz的中心频率处实现了均匀且完整的 360° 相位覆盖,这从理论上保证了其能够有效构建涡旋波并实现波束汇聚;此外,在整个 p' 变化范围内,反射幅度均保持在0.93以上,尤其在14 GHz附近仍维持极高的能量效率,这意味着超过93%的入射波能量被反射回去,能量损耗很小。综上所述,该六边形单元表现出色,在反射相位与幅度两方面均表现出优异性能,达到了设计预期,具备进一步组阵测试的价值。

为清晰观测涡旋波相位,需保证超表面具有足够的电尺寸,因此本文采用 29×29 (共841个)单元进行排布,整体尺寸为 $132 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。各单元的反射相位由其结构尺寸决定。基于此,本文通过Matlab与Ansys的联合仿真进行设计:首先,根据目标涡旋波束的相位分布要求,用Matlab计算出阵列中每个单元所需的目标相位;随后,将相位数据映射为对应的单元尺寸,并生成仿真模型;最后,在Ansys中进行全波仿真。反射阵阵面如图4所示。该超表面成功激发了一阶涡旋波束。可以看出,相位分布呈现出典型的单螺旋结

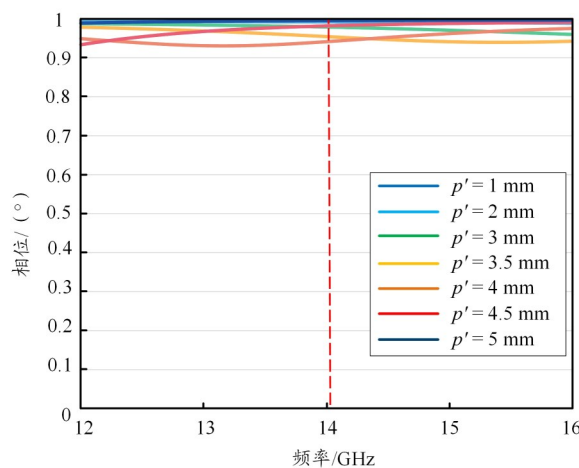
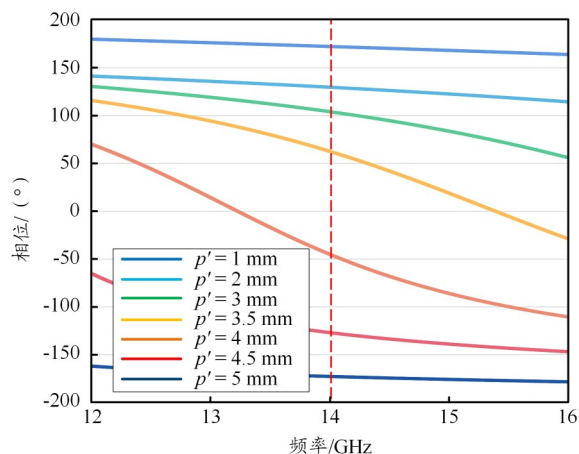


图3 单元结构仿真性能评估

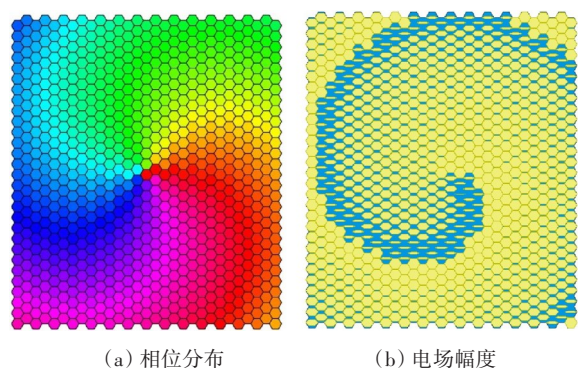
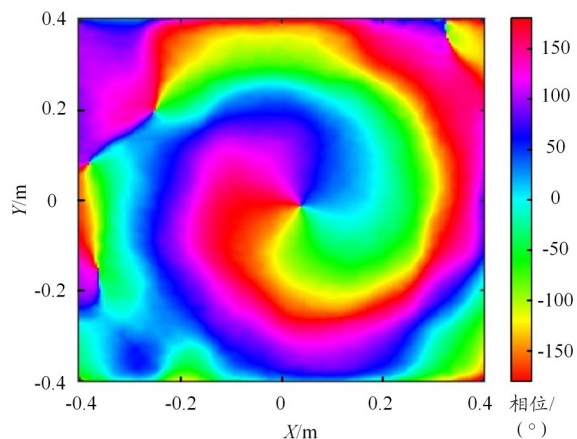


图4 反射阵阵面

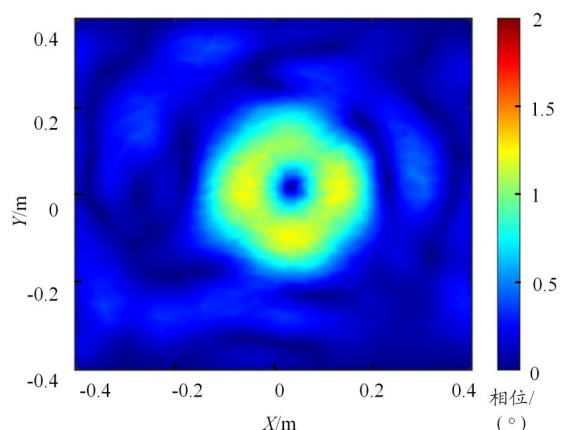
构,而电场幅度则显示出中心强度为零的“甜甜圈”状分布。这2个特征共同证实了模式数 $l=1$ 的OAM被成功生成。

进一步对该反射阵进行仿真分析,中心频率为14 GHz,利用场计算器求解出该反射阵的电场相位分布图和幅度图,如图5所示。可以看出,电场相位呈涡

旋状,且中心存在相位奇点;电场幅度图呈“甜甜圈”状,中心位置电场强度为0,符合涡旋电磁波束中心空洞这一物理特性,仿真结果与单元结构设计吻合,验证了该单元结构设计的合理性。



(a) 反射阵电场相位图



(b) 电场强度图

图5 反射阵仿真相位分布图和电场强度图

近年来,反射型超表面设计多采用正方形结构。而本文提出的六边形单元通过其固有的蜂窝状嵌入式排列这一几何创新,在保证电磁性能(360° 相位覆盖)的前提下,实现了物理结构上的紧凑化,并进一步带来了系统能量效率的提升,展现出相比传统正方形设计的明显优势。在系统性能方面,传统正方形单元结构排布仿真后,由于其口径面积增大,在生成涡旋波束的效率上,比六边形生成涡旋波束效率低。用 $P_{\text{涡旋}}$ 和 $P_{\text{入射}}$ 分布表示产生涡旋波束和入射平面波的功率,根据式 $\eta = \frac{P_{\text{涡旋}}}{P_{\text{入射}}}$ 得出正方形单元结构生成涡旋波束效率为 52.4%,而所设计六边形反射型超表面为 57.8%。综上所述,所提六边形单元不仅在几何上更

紧凑,且在实现相同电磁功能时,具有更高的能量转换效率,性能优于传统的正方形设计。

3 实物测试

反射型超表面工作中心频率位于 14 GHz,其 OAM 模态 $l=+1$ 。测试场地布置如图 6 所示,图中红框部分为超表面加工实物图。出于防止铜层氧化的考虑,加工厂商在铜表面覆盖了一层厚度可忽略的防氧化薄膜。

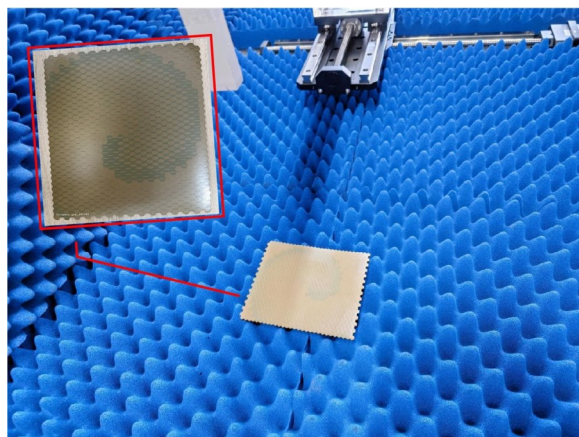
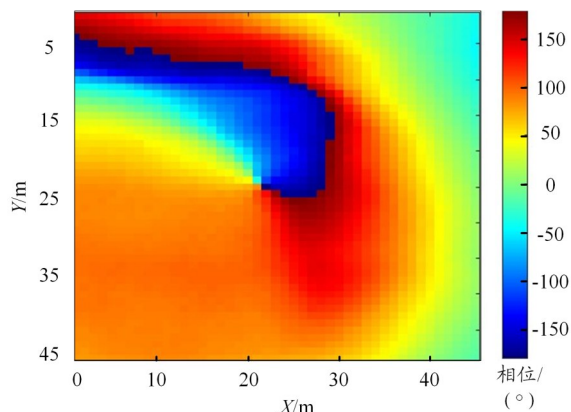


图6 超表面实物近场测试场地

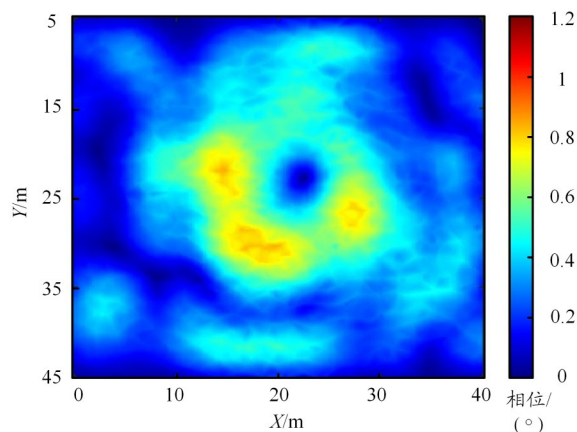
OAM 反射阵采用正馈方式进行测试,馈源选用标准增益喇叭天线,其工作频率覆盖 2~18 GHz。天线底部连接有探针,用于扫描超表面电场分布。测试时,超表面水平放置,馈源通过支架固定,喇叭口面至阵面的垂直距离 h_1 设定为 320 mm。

在反射阵测试中,由于喇叭天线垂直置于超表面正上方,导致探针采集的电场数据同时包含超表面反射场与喇叭天线的直射场。为准确提取超表面自身的反射响应,测试按以下步骤进行:首先,在未放置超表面金属板的情况下,固定喇叭天线高度 $h_1=320$ mm,测量得到入射波的电场分布作为参考背景;随后,安装加工完成的超表面金属板并重新采集总场数据;最终,将总场数据与参考背景相减,从而分离出超表面自身的反射电场。基于该处理后的数据,得到超表面的相位与幅度分布图,如图 7 所示。可以看出,该超表面近场辐射相位图能看出明显的涡旋电磁波特征,测试频率为 13.8 GHz。与仿真结果相比,工作频率略有左偏,但相位分布仍维持在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 内。在靠近超表面边缘区域,相位分布出现轻微紊乱,导致涡旋波束的汇聚效果有所下降。由电场强度可以看出,“甜甜圈”状幅度分布虽不如仿真结果显著,但仍可辨识出相位奇点的存在,且中心位置电场强度为零,符合

罗慢,冯瑞,谭秋林:一种ku波段携带轨道角动量的六边形反射型超表面



(a) 实测电场相位分布



(b) 实测电场强度分布

图7 超表面近场测试结果

涡旋波束的基本特性。

综上所述,实测结果与仿真结果之间存在一定偏差,主要源于以下几方面因素:

1)环境差异:理想仿真环境难以完全复现实际测试条件,实测环境中存在的杂散电磁干扰可能影响测量准确性。

2)加工精度限制:无源超表面的相位调制依赖结构尺寸的机械性调整。为实现 360° 相位覆盖,仿真中设定的尺寸步长往往较小,导致加工复杂度提升,实际制造中易引入微米级尺寸误差。

3)防氧化层影响:尽管理论上覆盖于超表面顶层的防氧化膜对电磁响应影响可忽略,但实际测试中其材料特性与附着方式仍可能对电磁波传播造成细微扰动。

最后,本文对所设计的反射型超表面生成涡旋波束的效率进行了定量评估,并与现有反射型超表面进行了性能对比,结果如表1所示。可以看出,本文设计在保持较高涡旋波束生成效率方面具有良好表现。

表1 本文与现有反射型超表面效率对比表

文献	工作频率/GHz	阵面大小/mm	效率/%
[24]	10	390×390	57.0
[25]	10	390×390	56.1
[26]	28	165×165	50.5
本文	14	132×150	57.8

4 结束语

本文成功设计并研究了一种工作于Ku波段的六边形反射型超表面。该设计采用无源、线极化、单层单元的构型,通过调节单元尺寸实现了超过 360° 的反射相位覆盖,并保持了接近1的高反射幅度,展现了优异的电磁调控性能。仿真结果表明:在14 GHz频点下,成功生成了具有一阶模态特征的OAM涡旋波束,其电场相位呈清晰的涡旋状分布,幅度呈典型的“甜甜圈”状(中心强度为零),与理论设计完全吻合。为验证设计的实用性,对超表面进行了加工制作与近场测试。测试结果成功观测到了一阶涡旋相位分布和中心电场零点,实测与仿真结果基本一致,充分证明了该结构具备实际生成涡旋波束的能力。

综上所述,本文所提出的反射型超表面能够满足光通信及其它相关研究中对涡旋波束生成的需求。在结构选型方面,采用六边形蜂窝状嵌入式排列,相较于传统外接正方形结构,不仅有效减小了超表面占用面积,还提升了涡旋波束的生成效率。同时,单层结构设计简化了加工与测试流程,更有利于实际应用。

参考文献:

- [1] GENEVET P, KATS M A, AIETA F, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *science* [J]. 2011, 334(6054): 333-337.
- [2] FAN Q, LIU M, ZHANG C, et al. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 267402-1-267402-6.
- [3] XU H X, HU G, HAN L, et al. Chirality-assisted high-efficiency metasurfaces with independent control of phase, amplitude, and polarization[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(4): 1801479-1-1801479-10.
- [4] REINEKE MATSUDO B, SAIN B, et al. Efficient frequency conversion with geometric phase control in optical metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(12): 2104508-1-2104508-12.
- [5] BALTHASAR MUELLER J P, RUBIN N A, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical review letters*, 2017, 118(11): 113901-1-113901-5.

- [6] ALMEIDA E, SHALEM G, PRIOR Y, Subwavelength nonlinear phase control and anomalous phase matching in plasmonic metasurfaces[J]. Nature communications, 2016, 7(1): 10367-1-10367-7.
- [7] LEE G Y, YOON G, LEE S Y, et al. Complete amplitude and phase control of light using broadband holographic metasurfaces[J]. Nanoscale, 2018, 10(9): 4237-4245.
- [8] TOGNAZZI A, OKLOPKOV K I, ZILLI A, et al. Third-harmonic light polarization control in magnetically resonant silicon metasurfaces[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11605-11612.
- [9] WU T, ZHANG X, XU Q, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase, amplitude, and polarization[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(1): 2101223-1-2101223-10.
- [10] DING F, TANG S, BOZHEVOLNYI S I. Recent advances in polarization - encoded optical metasurfaces[J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(6): 2000173-1-2000173-18.
- [11] LIU W E, CHEN Z N, QING X, et al. Miniaturized wideband metasurface antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 7345-7349.
- [12] LI Y, XIAO S. Wideband wide-angle scanning phased array based on miniaturized metasurface antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 70(2): 1107-1119.
- [13] WANG H B, CHENG Y J, CHEN Z N. Dual-band miniaturized linear-to-circular metasurface polarization converter with wideband and wide-angle axial ratio[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(12): 9021-9025.
- [14] MA Q, HONG Q R, GAO X, et al. Highly integrated programmable metasurface for multifunctions in reflections and transmissions[J]. APL Materials, 2022, 10(6): 061113-1-061113-8.
- [15] CHANG X, PIVNENKO M, SHRESTHA P, et al. Electrically tuned active metasurface towards metasurface-integrated liquid crystal on silicon (meta-LCoS) devices[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 5378-5387.
- [16] MA Q, LIU C, GU Z, et al. Information metasurfaces and intelligent metasurfaces[J]. Photonics Insights, 2022, 1(1): R01-1-R01-28.
- [17] TSILIPAKOS O, TASOLAMPROU A C, PITILAKIS A, et al. Toward intelligent metasurfaces: the progress from globally tunable metasurfaces to software-defined metasurfaces with an embedded network of controllers. Advanced optical materials, 2020, 8(17): 2000783-1-2000783-18.
- [18] EDFORS O, JOHANSSON A J. Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 60(2): 1126-1131.
- [19] TURNBULL G A, ROBERTSON D A, SMITH G M, et al. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use a spiral phase plate[J]. Optics Communications, 1996, 127(4-6): 183-188.
- [20] WANG J, ZHANG Z, HUANG C, et al. Transmission-reflection-integrated quadratic phase metasurface for multifunctional electromagnetic manipulation in full space[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(6): 2102111-1-2102111-13.
- [21] WANG Y, GE Y, CHEN Z, et al. Broadband high-efficiency ultrathin metasurfaces with simultaneous independent control of transmission and reflection amplitudes and phases[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 70(1): 254-263.
- [22] CAI T, WANG G M, FU X L, et al. High-efficiency metasurface with polarization-dependent transmission and reflection properties for both reflectarray and transmitarray[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(6): 3219-3224.
- [23] LIANG J C, CHENG Q, GAO Y, et al. An angle-insensitive 3-bit reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 70(10): 8798-8808.
- [24] 刘永杰. 基于电磁超表面的准无衍射波束产生技术及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [25] LIU H, XUE H, LIU Y, et al. Generation of high-order Bessel orbital angular momentum vortex beam using a single-layer reflective metasurface[J]. IEEE Access, 2020, 8: 126504-126510.
- [26] 熊迎香. 超表面对透/反射电磁波的多功能调控[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.