

全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波

杨帆¹⁾ 朱晓斐¹⁾ 王少娜¹⁾ 李凯¹⁾ 牛萍娟¹⁾ 姚建铨²⁾ 石嘉^{1) 2) †}

1) (天津工业大学电子信息工程学院天津市光电检测技术与系统重点实验室,
天津 300387)

2) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘 要

为了开发低成本和高性能的涡旋产生器件, 设计了一种工作在 6G 太赫兹通信窗口的全介质集成超构天线系统, 重点研究了携带不同拓扑电荷的聚焦涡旋电磁波的电场分布特性。在物理尺寸限制下, 通过调控太赫兹波的传播相位设计了能够产生聚焦涡旋波束的超构表面, 大大提高了天线设计的自由度。集成超构天线采用光固化 3D 打印技术制备。最后, 搭建了成像系统, 分析了携带不同拓扑电荷的集成超构天线的电场分布。结果表明: 该器件能够有效产生聚焦涡旋波束, 制备成本较低, 并且能够解决超构表面和光源之间严格的对准容差。这项作为生成聚焦涡旋波束的全介质集成超构天线提供了一种简便且经济高效的通用设计方法, 为 6G 通信和高分辨率成像提供了广阔的应用前景。

关键词: 涡旋波束; 轨道角动量; 螺旋相位板; 超构表面

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 62505223, 82572688)、天津市自然科学基金联合基金 (批准号: 24JCYBJC00050, 25JCLQJC00140)、天津市科技支撑重点研发计划 (批准号: 23YFZCSN00090) 资助的课题。

† 通信作者. E-mail: shijia@tiangong.edu.cn

第一作者. E-mail: yangffan@tiangong.edu.cn

1 引言

涡旋电磁波具有轨道角动量，呈现出螺旋状相位分布与中心强度为零的暗核结构，这一特性使其能够实现对电磁波波前的灵活调控，在光通信^[1-3]、微粒操纵^[4-6]、超分辨显微成像^[7-9]以及量子信息技术^[10-12]等多个方向显示出重要的应用价值。目前，研究人员已研发出多种太赫兹波段涡旋波束产生方法，例如螺旋相位板^[13-15]、空间光调制器^[16,17]以及计算全息术^[18,19]等。然而，这些传统方法往往存在结构体积较大、不易集成、成本较高等局限。超构表面作为一种人工设计的新型二维材料，具备天然材料所缺乏的电磁调控特性，因而受到广泛关注。通过精心设计其亚波长单元结构，可实现对等效介电常数和磁导率的自由调控，从而获得特殊的电磁响应行为^[20-23]。此外，超构表面在太赫兹频段具有较高的传输效率，能够实现对电磁波前的高效调控，为紧凑型、高性能太赫兹器件的设计提供了新的解决思路。

近年来，超构表面为产生涡旋波束提供了有效途径，不仅克服了传统方案体积大、集成度低的局限，也显著降低了制造成本^[24-29]。例如，有研究提出一种基于反射型超构表面的太赫兹宽带涡旋波束产生器，采用超构表面-介质-金属三层结构实现高效波前操控^[30]；通过单层超构表面在太赫兹波段实现了四通道轨道角动量复用与解复用的仿真与实验验证，为太赫兹无线通信提供了一种紧凑、高效的多通道数据传输方案^[31]；此外，一种基于 Si-SiO₂-Si 三明治结构混合超构原子的宽带消色差太赫兹超构透镜被提出并实验验证，在 0.5-1.1 THz 频带内实现了高效的消色差聚焦^[32]。在提升波束质量方面，设计了一种轻质悬浮超构表面，通过将精准的 OAM 相位调制与会聚相位调制相融合，生成了具有低发散角与高模式纯度的双偏振轨道角动量光束^[33]；将螺旋相位、锥透镜相位及双曲聚焦相位集成到单一超构表面，基于纯几何相位调制的自旋多路复用方案，通过叠加两正交

偏振完美涡旋光束，实现了大容量完美矢量涡旋光束^[34]。目前大多数报道的全介质超构表面采用深硅刻蚀工艺制备，加工流程复杂，制造成本较高。当下对高效率、低成本、紧凑集成系统的需求日益增长，开发一种小尺寸、易加工、低成本且能高效产生太赫兹涡旋电磁波的功能器件显得尤为迫切。与此同时，6G 太赫兹通信已成为下一代通信技术的核心发展方向，但是现阶段对该频段的全介质超构表面的研究较为匮乏。设计基于轨道角动量的 6G 太赫兹超构天线，有望在高速大容量无线通信、高分辨率成像及安全通信等领域带来重要突破。

本文设计并实现了一种工作在 6G 太赫兹通信窗口的全介质集成超构天线。通过对传播相位的精确调控，制备了携带轨道角动量的超构表面并与天线集成，在焦平面上产生聚焦涡旋电磁波。本文系统地阐述了该集成超构天线的设计理念与实现方法。仿真结果表明，所设计的超构单元在目标频段内均实现 90% 以上的高透射率；同时，分析了携带不同拓扑荷的超构天线的电场分布特性。该超构天线以紫外敏感树脂为基材，采用光固化 3D 打印技术制备而成，并在 0.14 THz 频段通过太赫兹相机进行实验验证。实验结果与仿真结果具有良好的一致性，验证了理论的正确性。此外，该设计方法可扩展至其他频段，为开发高效集成的轨道角动量天线提供了一种通用方法，展现出重要的应用潜力。

2 全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波的原理和设计

2.1 全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波的原理

超构表面是用于产生涡旋波束的常用元件，通过超构表面出射的电磁波具有螺旋相位波前，波数中心具有相位奇点，场强为零。理论上，电磁波的相位改变是由超原子沿传播路径积累的相位引起的，可以表示为^[35]

$$\varphi = k_0 \times n \times H \quad (1)$$

式中： k_0 是自由空间的波数； n 是材料的折射率； H 是超构单元的高度。相位改

变取决于超构单元的高度 H 。当入射波穿过超构表面时，超构表面高度不均匀导致光路产生一定的差异，从而引起相位发生相应的变化。

为了产生携带轨道角动量的聚焦涡旋光束，需要精确调控沿方位角方向的螺旋相位分布和沿径向方向的聚焦相位分布，总相位分布表示为^[36]

$$\phi_{(r,\theta)} = \pm \frac{2\pi}{\lambda} \left(f - \sqrt{r^2 + f^2} \right) + l \times \theta \quad (2)$$

式中： λ 是工作波长， f 是超构表面的焦距， r 是距离坐标原点的长度， l 是涡旋光的拓扑荷值， θ 是方位角。

2.2 全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波的设计

相位梯度超构表面优秀的电磁调控能力为天线的设计提供了一种灵活的方法。图 1 为全介质集成超构天线的示意图，包括平凸透镜I、平凸透镜II、喇叭天线和超构表面，每个元件通过尺寸匹配组装在一起。喇叭天线为空心结构，内部无填充。喇叭天线中的平凸透镜I 和平凸透镜II 组成扩束组，其中，平凸透镜I 的焦距为 F_1 ，直径为 D_1 ，厚度为 H_1 ，平凸透镜II 的焦距为 F_2 ，直径为 D_2 ，厚度为 H_2 ，扩束组显著增强了波束的聚焦能力。超构表面的直径为 D ，由多个超构单元组成，超构单元的长和宽均为 P ，高度为 H 。超构天线的小口径端的结构设计为空心圆柱体（长度：10 mm，直径：15 mm，壁厚：3 mm），其尺寸与太赫兹源出射端集成的金属喇叭天线尺寸匹配。

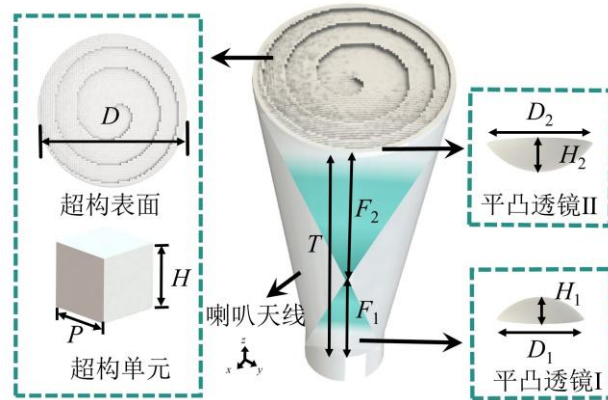


图 1 全介质集成超构天线示意图

Fig.1. Schematic of the all-dielectric integrated meta-antenna.

在 z 轴方向上，两个平凸透镜的焦距之和 $F_1 + F_2$ 等于波束扩束组的长度 T ，这种匹配关系可以使得太赫兹波在经过平凸透镜 I 的初步聚焦后，再经过平凸透镜 II 的转换，最终以理想的波束形状和传播方向入射到超构表面。平凸透镜的厚度 H_1 、 H_2 和焦距 F_1 、 F_2 与其他几何参数有关，关系式如下^[37]

$$\begin{aligned} H_1 &= F_1(n-1) - \sqrt{[F_1(n-1)]^2 - (D_1/2)^2} \\ H_2 &= F_2(n-1) - \sqrt{[F_2(n-1)]^2 - (D_2/2)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

为满足空间设计限制，喇叭天线的后径与平凸透镜 II 的直径一致。超构表面工作频率为 0.14 THz，对应波长为 2.14 mm，数值孔径 NA 为 0.3846。数值孔径的计算公式为 $NA = n \sin \alpha$ ^[38]，其中， n 为样品与超构表面之间介质的折射率（空气的折射率为 1）， α 为孔径角，由超构表面的直径 D 和焦距 f 决定。太赫兹波在集成一体化超构天线中的传输损耗主要是由平凸透镜引起的，为了获得最小的损失，在设计中应使 $(H_1 + H_2)$ 尽可能小。在这些条件的约束下，所设计的集成超构天线的结构参数如表 1 所示。

表 1 集成超构天线的结构参数

Table 1. The structural parameters of the integrated meta-antenna

器件参数	尺寸	器件参数	尺寸
D_1	15 mm	D_2	50 mm
H_1	5.9 mm	H_2	6.47 mm
F_1	12 mm	F_2	80 mm
T	92 mm	D	50 mm

在超构表面的系统性设计过程中，关键的第一步是选择合适的亚波长单元结构。超构单元作为构成超构表面的基本组成单元，其电磁响应特性直接影响整个超构表面的宏观光学性能与功能实现。入射电磁波的波前相位调制要求相位覆盖 $0-2\pi$ 的范围，这可以通过调整单元的高度 H 来实现。参数扫描时，在单元顶部设置了空气层，厚度为 d ，为端口1，单元底部设置为端口2。电磁波从端口1入

射,从端口2出射。改变单元高度 H ,观察出射电磁波的幅度和相位变化。此时,出射电磁波的相位计算为 $\varphi=k_0 \times (n \times H + d)$,其中空气层的折射率为1。如图 2 所示,单元的高度 H 从 1 mm 增加到 4.2 mm,超构单元出射相位满足 $0-2\pi$ 。参数扫描过程以 200 μm 为步长进行精细化采样,该设计精度是综合考虑 3D 打印系统 100 μm 的制造精度,既确保了相位曲线的平滑性,又兼顾了实际制造的可行性。超构单元在 0.14 THz 时的透射率均达到了 90%,最高可以达到 99%。晶格周期 P 对于实现高效太赫兹操控同时抑制异常散射至关重要。既要遵循电磁设计原则,也要考虑 3D 打印机的打印精度,设定周期为 $P = 1 \text{ mm}$ 。

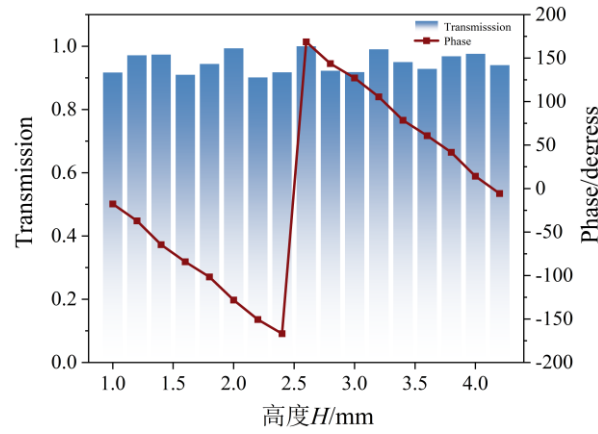


图 2 不同高度 H 的结构单元在 0.14 THz 下的相位和透射率

Fig.2. Simulated transmission and phase shift of meta-atom with different height H at 0.14 THz.

3 全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波的特性分析

根据传播相位原理,本文设计了四个携带不同拓扑荷的超构表面,焦距 $f=60 \text{ mm}$,模态分别是 +1、-1、+2、-2。为了证明所设计的超构天线的性能,本文采用 CST Studio Suite 进行全波段电磁仿真,通过在焦平面上放置场监视器,对不同拓扑电荷下的介质天线透射电场强度分布进行了系统仿真。仿真的边界条件 x 、 y 方向设置为 open, z 方向设置为 open (add space),以确保仿真结果不受边界处反射能量的影响,使仿真结果更加准确。

从图 3 中的 xoz 面电场强度分布可以看出，超构表面在 $z = 60 \text{ mm}$ 处的焦平面上产生了聚焦涡旋波束。经过一段距离的传输，光斑聚焦后又展宽，但是仍然保持完好的对称性。该介质天线在焦平面上成功产生了具有清晰环形强度分布的聚焦涡旋波束，这个环形强度分布是涡旋波束的典型特征。且随着轨道角动量的阶数增大，振幅零点范围不断扩大，发散角不断扩大。从相位分布中可以看出， $l = +1$ 和 $l = -1$ 的涡旋波束相位旋转一周变化了 2π ， $l = +2$ 和 $l = -2$ 的涡旋波束相位变化了 4π ，均符合涡旋波束的特征。拓扑荷 $l = +1$ 和 $l = +2$ 的涡旋波束相位沿顺时针方向旋转， $l = -1$ 和 $l = -2$ 的涡旋波束相位沿逆时针方向旋转。从模式纯度谱中可以观察到，所设计的携带不同拓扑荷数的超构表面产生的涡旋光束能量集中在目标模式中，证明生成的涡旋光束质量较好。

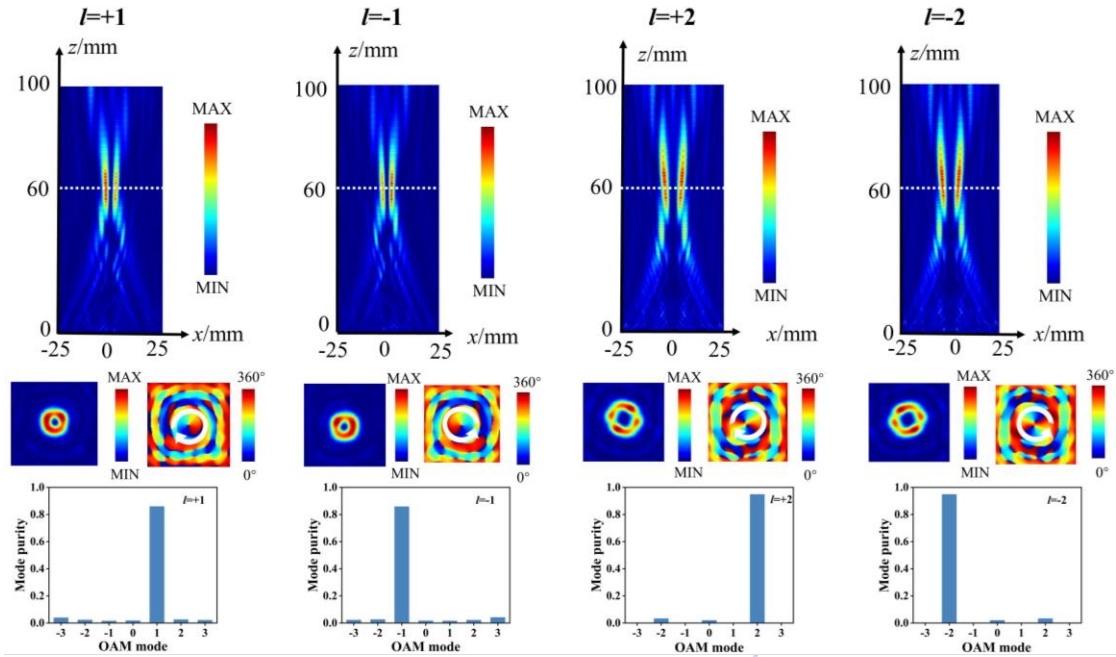


图 3 携带拓扑电荷为-1、+1、-2、+2 的全介质集成超构天线的仿真电场图、相位分布图以及对应的模式纯度谱

Fig.3. Simulated electric field, phase profiles, and corresponding mode purity spectra of the all-dielectric integrated meta-antenna for topological charges l of -1, +1, -2, and +2.

以拓扑电荷 $l=+1$ 的超构天线为例，详细分析了涡旋波束的传播特性。图 4 展示了 $l=+1$ 的涡旋波束在距离超构表面 40 mm、50 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm 的五个观测面上监测的电场强度和相位剖面。此外，计算了集成超构天线在工作频率 0.14 THz 处的效率，为通过焦斑的光功率与入射光的比值^[39]。计算得到在焦平面处，超构天线的效率为 38%。

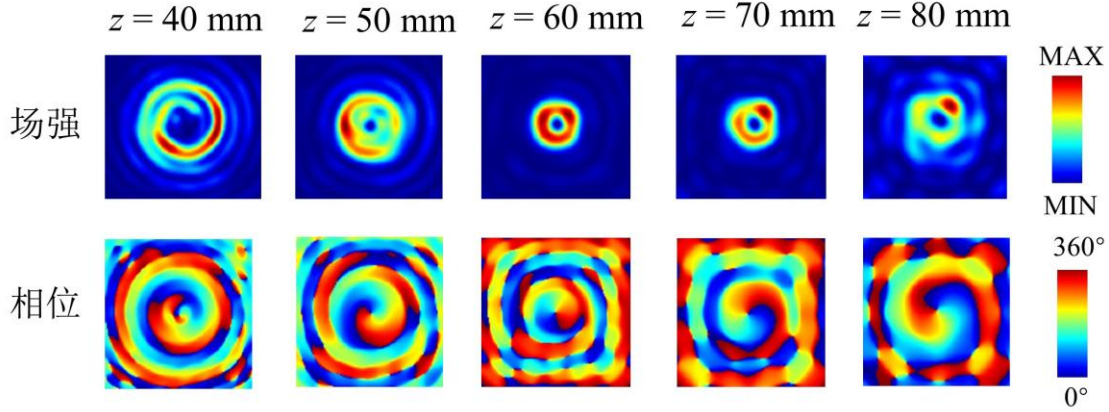


图 4 拓扑电荷 $l=+1$ 的集成超构天线的模拟电场分布及相位分布

Fig.4. Simulated electric field distributions and phase distributions of the integrated meta-antenna with topological charge $l=+1$.

对于涡旋光束，其暗核尺寸由拓扑荷数决定，而环形光斑的大小可以通过精心设计结构单元来调整。图 5 中对比了设计的超构天线生成的聚焦涡旋光束和传统涡旋光束 xoz 截面电场分布 ($l=+1$)，并绘制了 $z=60$ mm 处环形焦斑的归一化电场强度曲线。如图 5 所示，传统非聚焦涡旋光束在传播过程中，能量会逐渐向四周扩散，导致光束的强度逐渐减弱，发散范围不断扩大，在 $z=60$ mm 处，对应的 FWHM=8.08 mm。而设计的超构天线生成的聚焦涡旋光束能量集中在焦平面附近，并在焦平面处产生了小于波长尺度的光斑，对应的 FWHM=2.08 mm，有效地抑制了波束的发散。这证明所设计的超构天线在高效生成和聚焦涡旋波束方面表现出优异的性能。此功能不仅可以与 6G 通信系统兼容，还为传统天线系统赋予了新颖的功能，为太赫兹集成超构天线在光学通信、光学成像等领域的应用提

供了更可靠的技术支持。

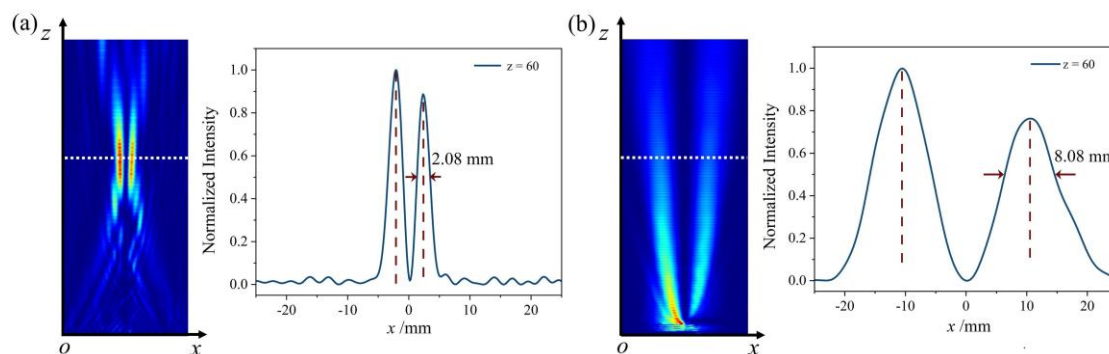


图 5 拓扑电荷 $l=+1$ 的涡旋波束 xoz 平面仿真电场分布图以及 $z=60$ mm 处归一

化电场强度：(a) 聚焦涡旋波束；(b) 传统涡旋波束

Fig.5. Simulated electric field distributions at the xoz plane of vortex beam with topological charge $l = +1$ and corresponding normalized electric field intensity at $z=60$ mm: (a) The focused vortex beam; (b) Traditional vortex beam

4 全介质集成超构天线产生聚焦涡旋电磁波的实验

3D 打印技术为制造太赫兹范围内的复杂元器件提供了一个多功能平台。它为制造 6G 通信系统所必需的工业级组件提供了一种有前途的制造方法。为了验证所设计的超构天线的功能，本文使用的是商用 3D 打印机（ELEGOO Saturn 3 Ultra），材料是紫外线敏感树脂，紫外线敏感树脂通过紫外线辐射固化。紫外敏感树脂通过太赫兹时域光谱系统（THz-TDS Advantest, TAS7500TS）在 0.14 THz 处表征，折射率为 1.6441，介电常数为 2.7029。基于 LCD 的立体光刻技术能够通过高速固化和集成成型制造复杂的 3D 结构，克服减材制造和薄膜技术固有的几何限制。如图 6（a）为制备的超构天线实物图，包含了平凸透镜 I、平凸透镜 II、喇叭天线和超构表面。

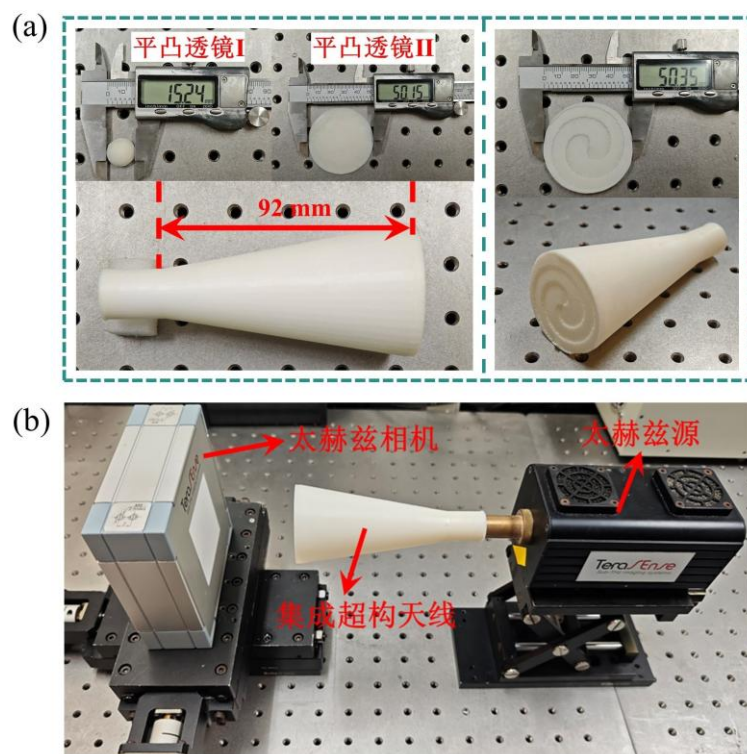


图 6 (a) 制备的超构天线实物图, (b) 实验测试系统图

Fig.6. (a) Physical image of fabricated meta-antenna, (b) Experimental test system.

为了验证所设计的超构天线的聚焦能力, 本文利用太赫兹相机测量其电场分布。如图 6 (b) 所示, 测量系统由太赫兹源 (Terasense, IMPATT 二极管, 工作频率为 0.14 THz) 和太赫兹相机 (Terasense, 工作频率: 0.05 THz-0.70 THz) 组成。太赫兹源通过集成的高增益圆锥喇叭天线辐射电磁波, 一体化天线的小口径端可与太赫兹源直接固定连接。太赫兹波垂直入射到超构表面, 太赫兹相机放置在焦平面上。图 7 展示了携带不同拓扑电荷的超构天线在焦平面上测量的电场强度分布。从图像中可以清晰地观察到, 所生成的涡旋波束在焦平面上均呈现出清晰的环形强度分布, 其中心区域场强接近零, 这种独特的场强分布特性使得涡旋波束在众多领域具有潜在的应用价值。

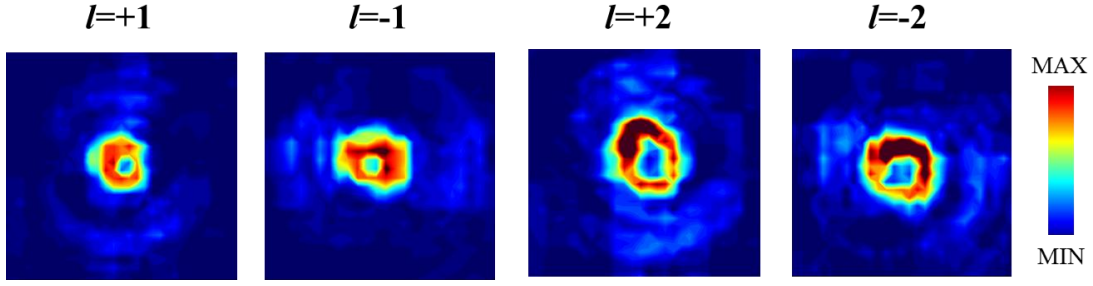


图 7 携带不同拓扑电荷 ($l = +1$ 、 -1 、 $+2$ 和 -2) 的超构天线实测电场强度

Fig.7. Measured electric field intensity of meta-antenna with different topological charges ($l = +1$, -1 , $+2$, and -2).

图 8 显示了拓扑电荷为 $l = +1$ 的超构天线在 x - z 平面 ($y = 0$) 中的电场分布。通过沿传播路径平移太赫兹相机，测量 $z = 40$ 、 50 、 60 、 70 mm 和 80 mm 传播距离处 x - y 平面上的电场强度，这些图像清晰地捕捉到了聚焦涡旋波束从会聚到发散的全过程动态变化，其演变趋势与数值仿真结果高度一致。实验测试结果涡旋光束光斑分布不均匀，与仿真结果存在一定的误差，可能是由下列原因导致的：（1）样品制备时，受限于采用的商用 3D 打印机打印精度，导致结构单元打印存在尺寸误差；（2）使用的太赫兹相机测试分辨率有限。

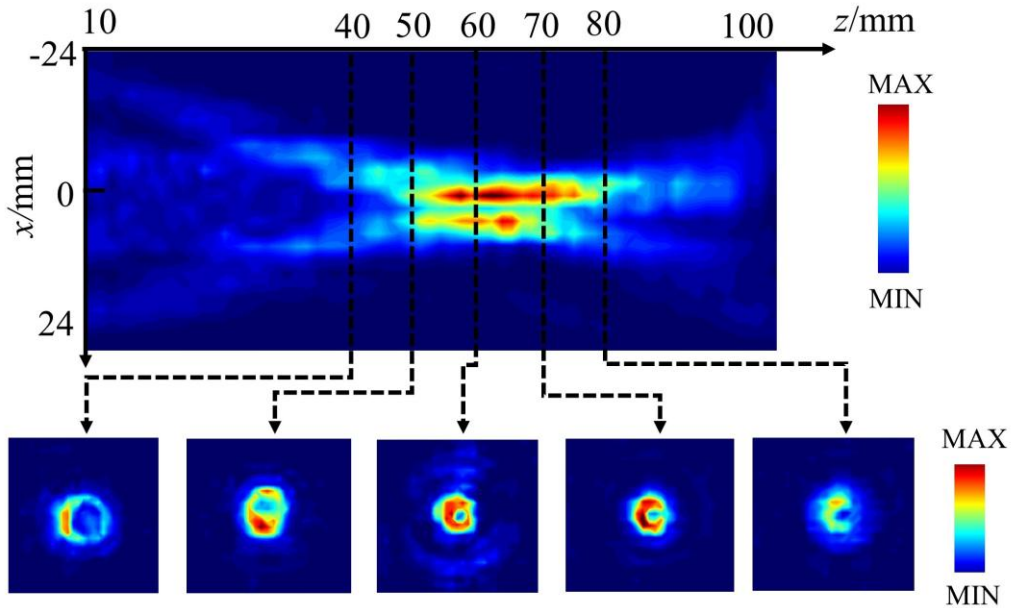


图 8 $l = +1$ 的超构天线的表征

Fig.8. Characterization of the designed integrated meta-antenna with $l = +1$

5 结 论

传统的涡旋发生器通常存在工作带宽窄、效率不佳和测试系统复杂等问题。本文提出了一种基于传播相位的全介质集成器件，能够有效地产生和聚焦携带轨道角动量的涡旋电磁波。该器件能减轻中短传输距离处衍射引起的发散，并解决超构表面和光源之间严格的对准容差，这种方法提高了通信系统的性能。由于其简易的制造和集成能力，所提出的方法在推进涡旋天线方面具有巨大潜力。为了验证其特性，本文分别对拓扑电荷 $l=\pm 1$ 和 $l=\pm 2$ 的超构天线进行仿真分析，着重分析了拓扑电荷 $l=+1$ 的超构天线产生的涡旋光束的传播特性。设计的集成超构天线使用 3D 打印技术制备。在实验测量中，使用太赫兹相机在焦平面处对这四种超构天线进行测量，重点对拓扑电荷 $l=+1$ 的超构天线进行分析。结果表明，该结构通过超构表面重构产生了不同的轨道角动量模式，并且 $l=+1$ 的超构天线的实验和模拟波束演化趋势具有很好的一致性。本文设计的集成超构天线能够在 6G 太赫兹通信窗口中有效地产生聚焦涡旋波束，展示了其波束控制能力。这种多功能性为超构天线提供了相当大的应用潜力，用于通信、成像、处理和量子技术等多种应用。同时，这项工作为创建高效集成的超构天线提供了一种通用设计方法，可能会激发许多不同频域的集成光学应用。

参考文献

- [1] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G 2008 *Nat. Phys.* **4** 282.
- [2] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y X, Yue Y, Dolonar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photonics* **6** 488.
- [3] Qiao Z, Wan Z Y, Xie G Q, Wang J, Qian L J, Fan D Y 2020 *Photonix*. **1** 1.
- [4] Zhuang X W 2004 *Sci.* **305** 188.
- [5] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156.
- [6] Peng L, Yao J, Bai Y H, Sun Y F, Zeng J C, Ren Y X, Xie J X, Hu Z Y, Zhang Q,

- Yang Y J 2024 *ACS Photonics*. **11** 1213.
- [7] Willig K, Rizzoli S O, Westphal V, Jahn R, Hell S W 2006 *Nat.* **440** 935.
- [8] Kozawa Y, Matsunaga D, Sato S 2018 *Optica*. **5** 86.
- [9] Tan P S, Yuan X C, Yuan G H, Wang Q 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 241109.
- [10] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nat.* **412** 313.
- [11] Sit A, Bouchard F, Fickler R, Gagnon-Bischoff J, Larocque H, Heshami K, Elser D, Peuntinger C, Gunthner K, Heim B, Marquardt C, Leuchs G, Boyd R W, Karimi E 2017 *Optica*. **4** 1006.
- [12] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, Shi S, Xiang G Y, Wang X S, Jiang Y K, Shi B S, Guo G C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 050502.
- [13] Chen Y, Zheng S, Li Y, Hui X, Jin X, Chi H, Zhang X 2016 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.* **15** 1156.
- [14] Zhang J C, Xia C Q, Gao R 2021 *OC*. **3** 29 (in Chinese) [章杰侈, 夏长权, 高锐 2021 光通信研究 **3** 29]
- [15] Wu W B, Sheng Z Q, Wu H W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 054102(in Chinese) [吴文兵, 圣宗强, 吴宏伟 2019 物理学报 **68** 054102]
- [16] Xie Z W, Wang X K, Ye J S, Feng S F, Sun W F, Akalin T, Zhang Y 2013 *Sci. Rep.* **3** 3347.
- [17] Brzobohaty O, Cizmar T, Zemanek P 2008 *Opt. express* **16** 12688.
- [18] Zeng Z, Zhao D 2024 *Laser & Photonics Rev.* **18** 2300965.
- [19] Jun C, Feng K D, Min G, Liang F Z 2009 *Chinese Phys. Lett.* **26** 307.
- [20] Wang D P, Cui X S, Liu D, Zou X J, Wang G M, Zheng B, Cai T 2024 *Progress in Electromagnetics Research*. **179** 49-59.
- [21] Cai T, Zhong Y H, Liu D, Huang H L, Wang D P, Yang Y, Chen H S, Lin X 2024 *Progress in Electromagnetics Research*. **181** 35-41.
- [22] Cai T, Tang S W, Zheng B, Wang G M, Ji W Y, Qian C, Wang Z J, Li E P, Chen H

S 2020 *Advanced Photonics*. **3** 016001.

- [23] Cai T, Zheng B, Lou J, Shen L, Yang Y H, Tang S W, Li E P, Qian C, Chen H S
2022 *Advanced Materials*. **34** 2205053.
- [24] Li Y X, Zhang H Y, Chen J X, Wang J C, Zhang M, Jiang Q Y, Liu M, Zhang Y P
2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 010404 (in Chinese) [李禹希, 张会云, 陈炯煦, 王嘉
诚, 张敏, 蒋庆友, 刘蒙, 张玉萍 2026 物理学报 **75** 010404].
- [25] Zhang J P, Wang Y, Yuan H, Wang Z H, Deng Y, Huang C Z, Wu J G, Yang J B
2023 *Chinese Phys. B* **32** 064206.
- [26] Ding X Y, Li Z R, Ren J H, Zheng Z W, Ding F, Tang S W, 2024 *Chin. Opt. Lett.*
22 113601.
- [27] Tang X Y, Liu N N, Liu S Y, Wang N, Jiang S Z, Ren Y X, Hong P L, Liang Y
2025 *Chin. Opt. Lett.* **23** 102602.
- [28] Huo P C, Yu R X, Liu M Z, Zhang H, Lu Y Q, Xu T 2024 *Opto-Electron Adv.* **7**
230184.
- [29] Lu Z C, Deng Y H, Yu Y, Huang C Z, Yang J B 2023 *Chinese Phys. Lett.* **40**
114201.
- [30] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101(in Chinese) [李晓
楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [31] Yang H, Zheng S, Zhang H, He T, Li N, Yang Z M 2024 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.*
23 1124.
- [32] Xu Y, Gu J, Gao Y, Yang Q, Liu W, Yao Z, Xu Q, Han J, Zhang W 2023 *Adv.*
Funct. Mater. **33** 2302821.
- [33] Cui S H, Hhang X J, Sun C Z, Yang H L, Li X Y 2025 *Front. Phys.* **20** 012202.
- [34] Zhang S L, Tian X M, Xu J W, Xu Y N, Li L, Liu J L 2025 *Acta Phys. Sin.* **74**
064201(in Chinese) [张胜蓝, 田喜敏, 许军伟, 徐亚宁, 李亮, 刘杰龙 2025
物理学报 **74** 064201]

- [35] He X, Yang Y, Deng L, Li S, Feng B 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 20770.
- [36] Li W, Meng T, Dong L, Liu L, Liu J, Zhao G 2025 *Sci. Rep.* **15** 7499.
- [37] Shi J, Li M L, Tang L H, Li X G, Jia X, Guo C J, Bai H, Ma H L, Wang X, Niu P J, Weng J D, Yao J Q 2024 *Small*. **20** 2308958.
- [38] Airy G B 1835 *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. **5** 283.
- [39] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7069.
- [40] OU K, LI G H, LI T X, Yang H, Yu F L, Chen J, Zhao Z Y, Cao G T, Chen X S, Lu W 2018 *Nanoscale*. **10** 19154.

录用稿件，非最终出版稿

All-Dielectric integrated metasurface antenna for focused vortex electromagnetic wave generation

YANG Fan¹⁾ ZHU Xiaofei¹⁾ WANG Shaona¹⁾ LI Kai¹⁾ NIU Pingjuan¹⁾ YAO Jianquan²⁾ SHI Jia¹⁾²⁾†

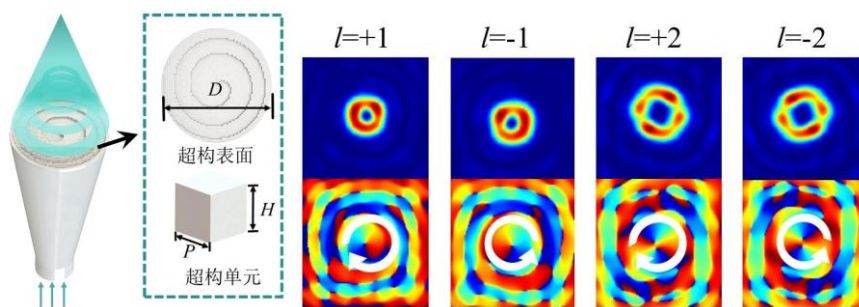
1) (Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

2) (Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

In order to develop low-cost and high-performance vortex generation devices, this paper designs an all-dielectric integrated metasurface antenna system operating in the 6G terahertz communication window, with a focus on investigating the electric field distribution characteristics of focused vortex waves carrying different topological charges. Under physical size constraints, a metasurface capable of generating focused vortex beams is designed by controlling the propagation phase of terahertz waves, significantly enhancing the design flexibility of the antenna. The integrated metasurface antenna is fabricated using stereolithography 3D printing technology. Finally, an imaging system is constructed to analyze the electric field distributions of the integrated metasurface antennas with varying topological charges. The results demonstrate that the device can effectively generate and focus vortex beams at a low cost, mitigate beam divergence, and address the stringent alignment tolerance between the metasurface and the light source. This work provides a simple and cost-effective general design method for all-dielectric integrated metasurface antennas that generate focused vortex beams, offering broad application prospects for 6G communications and high-resolution imaging.

Keywords: vortex beams; orbital angular momentum; spiral phase plate; metasurface



* Project supported by National Natural Science Foundation of China (62505223, 82572688), Joint Funds of the Natural Science Foundation of Tianjin (24JCYBJC00050, 25JCLQJC00140), and Key Research and Development Program of Tianjin (23YFZCSN00090).

† Corresponding author. E-mail: shijia@tiangong.edu.cn

The first author. E-mail: yangffan@tiangong.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿