

太赫兹特殊光束的研究与应用

李鹤婷, 王新柯*, 张岩

首都师范大学物理系, 北京 100048

摘要 太赫兹特殊光束具有独特的光场分布和衍射特性, 在粒子操控、光学成像和光通信等众多领域都有着明显的发展优势。综述了近年来本课题组和其他科研团队在太赫兹特殊光束方面展开的部分研究, 包括太赫兹贝塞尔光束、涡旋光束、艾里光束、瓶子光束和径向偏振光束, 系统地阐述了这些光束的光场分布特征、衍射特性及其潜在应用前景, 旨在探讨太赫兹特殊光束对未来太赫兹技术的推动作用。

关键词 太赫兹技术; 激光光学; 贝塞尔光束; 涡旋光束; 艾里光束; 瓶子光束; 径向偏振

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614007

Study and Applications of Terahertz Special Beams

Li Heting, Wang Xinke*, Zhang Yan

Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract Terahertz (THz) special beams have unique field distributions and diffraction characteristics, showing significant advantages in the applications of particle manipulation, optical imaging, and optical communications. Some recent researches of several groups, including ours, on THz special beams are reviewed herein, such as THz Bessel beam, vortex beam, Airy beam, bottle beam, and radially polarized beam. The field distributions, diffraction characteristics, and application prospects of these beams are systematically described. The aim herein is to discuss the effect of THz special beams to the advancement of THz technology.

Key words terahertz technology; laser optics; Bessel beam; vortex beam; Airy beam; bottle beam; radial polarization

OCIS codes 140.3300; 110.6795

1 引言

太赫兹 (THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 波是指频率介于微波与红外波段之间的电磁辐射, 通常定义其频段为 $0.1 \sim 10 \text{ THz}$ 。太赫兹波具有较低的光子能量和较高的成像分辨率, 并且对于很多电介质材料具有较强的穿透性。由于这些特性, 太赫兹技术已被广泛应用于通信、安检、药物检测和半导体工业等诸多领域^[1-3]。随着太赫兹技术的不断成熟和发展, 越来越多的科研人员把目光聚焦在太赫兹特殊光束上, 如贝塞尔光束和涡旋光束等。利用太赫兹特殊光束独特的光场分布特点和衍射特性, 可以将其应用于现代太赫兹光谱与成像技术中, 以弥补传统太赫兹技术的不足, 推动太赫兹技术的进一步发展。

目前, 对于太赫兹特殊光束的研究已成为本领域的热门发展方向之一。2009 年, Winnerl 等^[4]尝试利用大面积的光电导天线来产生具有径向和角向偏振的太赫兹贝塞尔高斯光束。同年, Shaukat 等^[5]使用聚四氟乙烯锥透镜和量子级联激光器生成了连续波太赫兹贝塞尔光束。2015 年, Knyazav 等^[6]利用自由电子激光器和带有螺旋形区域的硅基二元衍射光学元件生成具有不同拓扑荷数的太赫兹涡旋光束, 并通过金属/介质交界面产生了表面等离子波。同年, Wei 等^[7]利用三维 (3D) 打印技术制作了具有不同拓扑荷数的聚合物螺旋轴棱锥, 生成了高阶太赫兹贝塞尔光束。2016 年, Liu 等^[8]利用两个 3D 打印的衍射元件生成了加速的太赫兹艾里光束, 并得到了大于 100 mm 的无衍射距离。这些研

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-18; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (11474206, 11374216, 11404224, 1174243, 11774246)

* E-mail: wxk82721@cnu.edu.cn

究都从不同角度探讨了太赫兹特殊光束的特性,分析了利用太赫兹特殊光束实现紧聚焦和超长焦深聚焦的可能性,以及将太赫兹技术用于高分辨率成像等领域的发展前景。

本文综述了近年来本课题组和其他科研团队对太赫兹特殊光束的部分研究成果,包括太赫兹贝塞尔光束、涡旋光束、艾里光束、瓶子光束和径向偏振光束的产生、表征及应用,描述了这些太赫兹特殊光束的光场分布特点和衍射特性。同时,本文也对太赫兹特殊光束的未来发展前景进行了评述和展望。

2 太赫兹贝塞尔光束

贝塞尔光束是一种典型的无衍射光束,其强度分布在一定传播距离内且不会出现发散现象。这类光束具有主光斑尺寸小、方向性好、强度高和传输距离远的特点。贝塞尔光束的另一个重要特征是具有自修复特性,即在贝塞尔光束传播过程中放置一个障碍物,被阻碍的光波在传播一段距离后又重新恢复为原来的光场分布。因此,这类光束在光学成像、光学加工和粒子操控等领域有着十分重要的应用。2012年,Bitman等^[9]利用聚四氟乙烯轴棱锥产生了太赫兹贝塞尔光束,并将其应用于太赫兹扫描成像系统中,以提高纵深信息的获取能力。图1(a)展示了用宽带太赫兹高斯光束扫描测量物体的实验装置,用两个平凸聚四氟乙烯透镜和一个双凸透镜,在样品测量位置生成太赫兹高斯光束。图1中XYZ为平面直角坐标系,Z方向为传播方向, f_1 为太赫兹源内部透镜和太赫兹探测器内部透镜的焦距, f_2 为聚四氟乙烯透镜的焦距, f_3 为双凸透镜的焦距,A和B分别表示聚四氟乙烯透镜和双凸透镜的焦平面。图1(b)展示了用零阶贝塞尔光束扫描待测物体的实验装置,该装置使用焦距为300 mm的平凸聚四氟乙烯透镜和两个底角为 26° 的聚四氟乙烯轴棱锥生成太赫兹贝塞尔光束。比较两种光束的成像效果,所选用的测量目标是三个矩形狭缝。使用二维平移台对狭缝进行逐点扫描,沿Z方向在距离透镜或轴棱锥不同位置处进行测量。图1(c)~(h)分别显示了测量目标位于距物镜30,40,50 mm时,用高斯光束和零阶贝塞尔光束进行扫描测量的强度分布。可以看出,高斯光束在焦平面(40 mm)处获得了最大的对比度,而当远离焦平面时光束逐渐发散,图像对比度降低。利用贝塞尔光束获得的图像在无衍射范围内一直保持良好的分辨率和对比度,且提高了获取物体纵深信息的能力。

在此工作的基础上,Bitman等^[10]于2014年又利用太赫兹贝塞尔光束进行了计算机断层摄影(CT)的测量。图1(i)展示了测量过程中使用的狮子模型以及用于断层扫描的旋转轴,图1(j)、(k)分别展示了利用太赫兹贝塞尔光束和高斯光束测量获得的相位图像,结果显示采用太赫兹贝塞尔光束可以获得更多的细节信息。通过将不同角度测量的二维太赫兹图像堆叠在一起可以重建样品的三维图像,图1(l)显示了用太赫兹贝塞尔光束测量重建的三维图像,可以看出样品深度信息被更好地提取。实验结果证明,传统太赫兹成像系统的景深有限,沿光轴方向的纵向分辨率会受到光束发散的影响,通过将贝塞尔光束引入太赫兹成像系统,可以显著提高获取物体纵深信息的能力。

2017年,Wu等^[11]同样利用聚四氟乙烯轴棱锥产生了具有线偏振的零阶太赫兹贝塞尔光束,使用太赫兹数字全息成像系统对太赫兹贝塞尔光束的横向电场 E_x 和纵向电场 E_z 进行了表征,并观察了太赫兹贝塞尔光束的矢量衍射特性。图2(a)展示了其测试系统,将激光分成抽运光束和探测光束,分别用于激发和探测太赫兹波。在抽运光路中,斩波器配合成像部分的电荷耦合器件(CCD)一起使用,接着光束经过凹透镜L1被扩束,照射到ZnTe晶体上。太赫兹波通过金属抛物面镜(PM)的反射进行准直。在探测光路中,依次通过半波片(HWP)和偏振片(P)来调整探测光束的偏振态,然后通过非偏振分束器(BS)将探测光束反射到探测晶体上。因此,探测光和太赫兹光都照射到探测晶体上,在探测晶体中发生普克尔电光效应,太赫兹场会调制探测光束的偏振态,从而将二维太赫兹信息加载到探测光束上。在成像部分,光束先后通过了透镜L2、四分之一波片(QWP)、偏振分光棱镜(PBS)、透镜L3和CCD相机。实验中采用底角 α 为 30° 的轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束,通过 z 扫描方式测量太赫兹贝塞尔光束的衍射过程。通过在样品前放置太赫兹四分之一波片(TQWP),可以将入射的线偏振太赫兹波转换成圆偏振太赫兹波。图2(b)显示了0.6 THz的 x 线偏振太赫兹贝塞尔光束在 $z=12$ mm处的 E_x 横向振幅分布及其在 $x-z$ 平面上的纵向振幅分布。太赫兹场呈现出圆形中心主峰和同心圆旁瓣,纵向截面显示了其在 $z=0\sim 24$ mm范围内的无衍射特性。图2(c)显示了在 $z=12$ mm处的 E_x 横向相位分布及其在纵向截面上的相位演变过程。可以看出,相位分布由几个同心圆组成,在每个圆形区域上,相位值几乎保持恒定,这导致了太赫兹

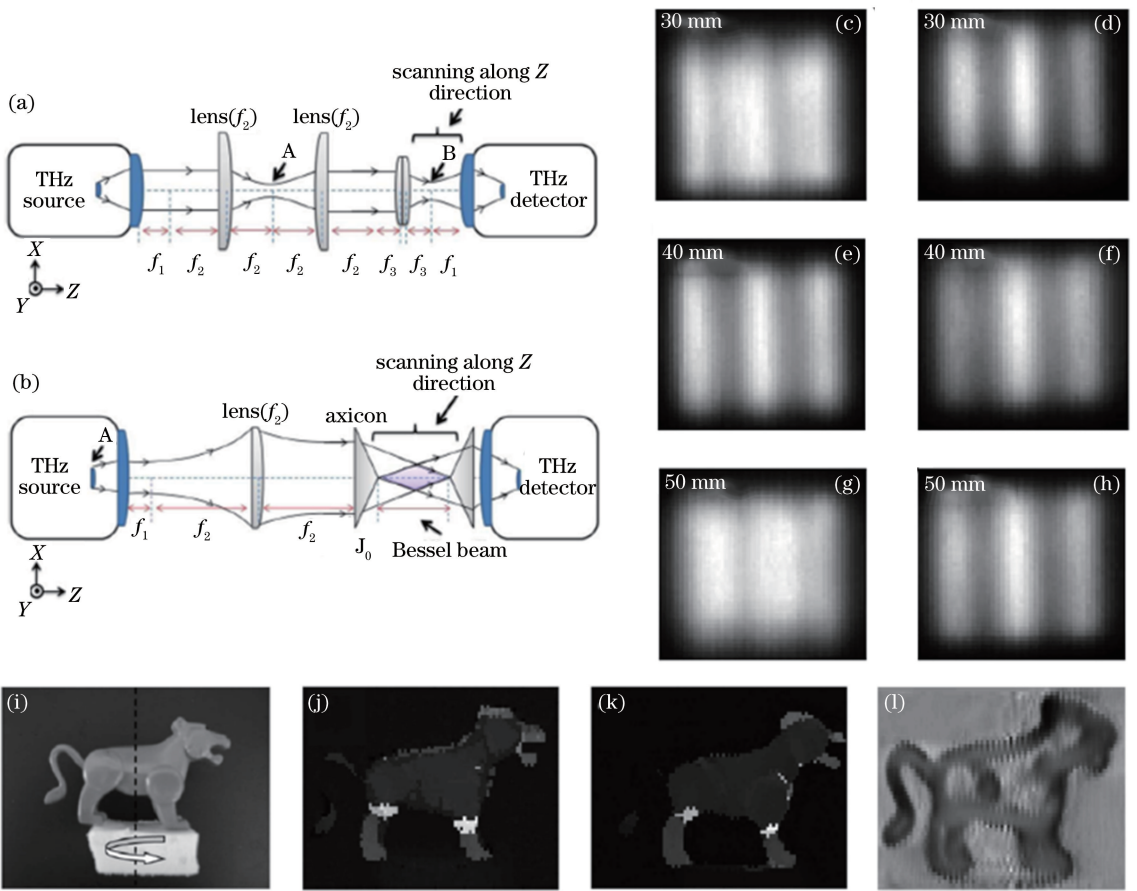


图 1 太赫兹高斯光束与贝塞尔光束的扫描成像^[9-10]。(a)基于宽带太赫兹高斯光束的成像系统；(b)基于太赫兹贝塞尔光束的成像系统；(c)(e)(g)距离透镜 30,40,50 mm 时目标的太赫兹强度图像；(d)(f)(h)距离轴棱锥 30,40,50 mm 时目标的太赫兹强度图像；(i)狮子模型；(j)用太赫兹贝塞尔光束测量的狮子模型透射相位图像；(k)用太赫兹高斯光束测量的狮子模型透射相位图像；(l)用太赫兹贝塞尔光束测量的狮子模型重建三维图

Fig. 1 Scanning imaging with THz Gaussian and Bessel beams^[9-10]. (a) Imaging system based on broadband THz Gaussian beam; (b) imaging system based on THz Bessel beam; (c)(e)(g) THz intensity images of object at 30, 40, and 50 mm from objective lens; (d)(f)(h) THz intensity images of object at 30, 40, and 50 mm from axicon; (i) lion effigy; (j) transmitted phase image of lion effigy measured by THz Bessel beam; (k) transmitted phase image of lion effigy measured by THz Gaussian beam; (l) reconstructed 3D image of lion effigy measured by THz Bessel beam

波的相长干涉。同时，相邻圆区域之间的界面上发生的 π 相位跳变，导致了太赫兹波的相消干涉。在 $x-z$ 平面上，相位分布表现出了经过轴棱锥之后太赫兹波的干涉效应，太赫兹贝塞尔光束的锥形波前，导致相位在光轴上基本呈线性变化。本次工作还测量了太赫兹电场的纵向分量 E_z ，对于频率为 0.6 THz 的光谱分量， $z=12$ mm 处 E_z 横向和纵向振幅分布如图 2(d) 所示。 E_z 分量表现出双侧月牙形的对称振幅分布，且中心具有零振幅区域，整个振幅分布呈现出偶极子辐射的特征。同时，从纵向截面的振幅分布中可以看出，太赫兹贝塞尔光束的 E_z 分量依然具有无衍射特性。 E_z 横向和纵向相位分布分别展示在图 2(e) 中。 E_z 的

相位由几个半环区域组成，这些半环区域反对称地位于 y 轴两侧，相邻的半环区域之间存在 π 的相位跳跃。在纵向截面上，随着传播距离的增加，光轴上始终存在 π 的相位跳变，表明在 $y-z$ 平面左右侧的两个 E_z 分量在传播过程中始终处于相消干涉的状态。这项工作对太赫兹贝塞尔光束的矢量特征进行了全面地表征与分析，促进了太赫兹贝塞尔光束的研究进展，也对太赫兹技术的应用起到了一定的推进作用。

除了在自由空间实现对太赫兹贝塞尔光束的生成和分析，2018 年，Wang 等^[12] 依据轴棱锥特性设计排布了矩形天线狭缝阵列，实现了类似贝塞尔函数特征的表面等离子体(SPP)光束，并完成了对于

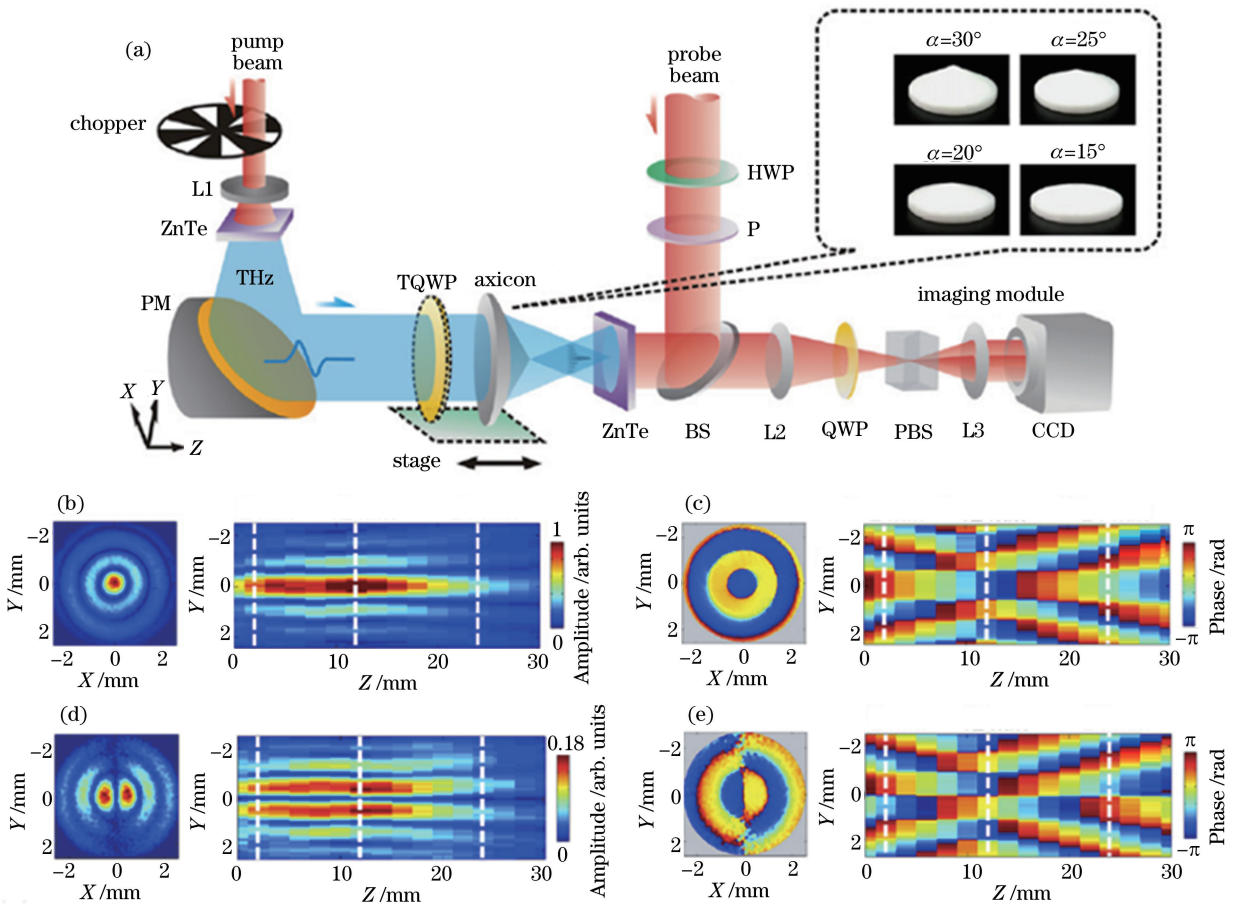


图 2 用太赫兹数字全息成像系统对太赫兹贝塞尔光束进行矢量表征^[11]。(a) 成像系统及样品；(b) 在 12 mm 处 0.6 THz 的 E_x 横向振幅分布及其在 $y=0$ mm 截面上 E_x 纵向振幅分布；(c) E_x 相对应的横向和纵向相位分布；(d) 在 12 mm 处 0.6 THz 的 E_z 横向和纵向振幅分布；(e) 在 $y=0$ mm 截面上 E_z 横向和纵向相位分布

Fig. 2 Vectorial characterization of THz Bessel beam by using THz digital holographic imaging system^[11]. (a) Imaging system and sample; (b) transverse amplitude pattern of E_x with 0.6 THz at 12 mm and longitudinal amplitude pattern on cross-section of $y=0$ mm; (c) corresponding transverse and longitudinal phase patterns of E_x ; (d) transverse and longitudinal amplitude patterns of E_z with 0.6 THz at 12 mm; (e) transverse and longitudinal phase patterns of E_z on cross-section of $y=0$ mm

SPP 光束的偏振调控。如图 3(a) 所示，狭缝阵列由上下两个亚阵列组成，沿着 y 轴以角度 θ 倾斜放置，上下子阵列关于 x 轴对称，因此两个子阵列中狭缝的取向角分别为 φ 和 $-\varphi$ 。由于每个狭缝取向角的绝对值是相同的，因此产生的 SPP 光束具有相同的振幅，但其相位不同。当一束光垂直入射时，每个狭缝产生的 SPP 光束将在 x - y 平面传播并发生干涉，在沿着 x 正方向的中心区域上形成具有贝塞尔分布特征的 SPP 光束。当入射光的线偏振态为水平和垂直时，所生成的 SPP 光束分布情况分别展示在图 3(b)、(c) 中。可以看出，由水平偏振光产生的 SPP 光束在中心处有最大强度的主光斑和若干离轴旁瓣，而由垂直偏振光产生的 SPP 光束，其中间的主光斑消失并且出现了

具有中心暗场的中空光束。同时，在两种情况下产生的 SPP 光束都表现出贝塞尔光束典型的无衍射特性。对于左旋圆偏振光和右旋圆偏振光入射的情况，SPP 光束分布情况分别展示在图 3(d)、(e) 中。可以看出，SPP 光束的分布与零阶贝塞尔光束十分类似，但是主光斑的位置从中心位置发生了向下和向上的横向偏移。这是由于上下子阵列激发的 SPP 光束的几何相位与入射光自旋方向有关，左旋圆偏振光与右旋圆偏振光入射时所产生的几何相位不同，导致主瓣发生了横向偏移。这项工作中提到的用狭缝阵列产生具有贝塞尔分布特征的 SPP 光束，为贝塞尔光束的产生提供了更多的可能性，也进一步推动了表面等离子波在太赫兹领域的发展。

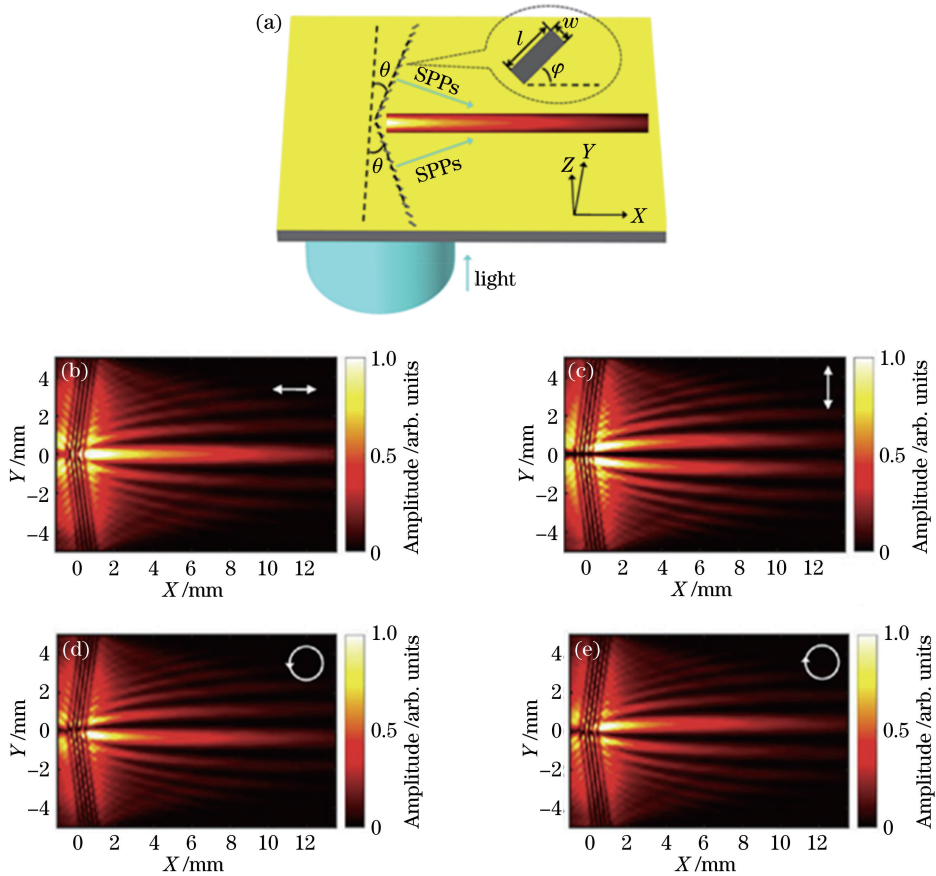


图 3 太赫兹贝塞尔表面等离子体光束(TSPBB)的生成与偏振调控^[12]。(a)矩形天线狭缝阵列示意图;(b)水平和竖直偏振入射的 0.75 THz 零阶 TSPBB 的强度分布;(c)水平和竖直偏振入射的 0.75 THz 一阶 TSPBB 的强度分布;(d)左旋圆偏振入射 TSPBB 的强度分布;(e)右旋圆偏振入射 TSPBB 的强度分布

Fig. 3 Generation and polarization modulation of THz surface plasmon Bessel beam (TSPBB)^[12]. (a) Schematic of slit array of rectangular antenna; (b) intensity patterns of TSPBB with zeroth-order at 0.75 THz for horizontal and vertical polarized incident beams; (c) intensity patterns of TSPBB with first-order at 0.75 THz for horizontal and vertical polarized incident beams; (d) intensity patterns of TSPBB excited by left-circularly polarized incident beams; (e) intensity patterns of TSPBB excited by right-circularly polarized incident beams

3 太赫兹涡旋光束

涡旋光束在光学领域一直是一个特殊的研究对象,其具有螺旋波前、相位奇点和量子化的轨道角动量等特点,可以应用在粒子操控和光学信息传输等方面。2013 年,He 等^[13]利用 V 型天线组成了超表面太赫兹涡旋相位板,并利用太赫兹数字全息成像系统研究了所生成的太赫兹涡旋光束的远场传输特性。图 4(a)展示了所设计的太赫兹涡旋相位板(VPP),VPP 由不同开口角度和不同方位角的 V 型金属天线排布而成。当具有水平偏振的太赫兹波入射到涡旋相位板时,透射的竖直偏振太赫兹波在每个单元的天线上都具有相同的透射强度以及相应的相位调制,由此形成太赫兹涡旋场。为了研究涡旋光束在远场的

衍射特性,用一个硅透镜对太赫兹涡旋光束进行聚焦,在焦平面附近同步移动透镜和涡旋相位板并进行 z 扫描测量,如图 4(b)所示。图 4(c)、(d)展示了在距离焦点位置 $-20, -10, 0, 10, 20$ mm 处 0.75 THz 太赫兹涡旋光束的振幅和相位分布。由于存在中心相位奇点,会聚的太赫兹波在振幅上显示出典型的面包圈形状,同时太赫兹相位呈现出螺旋变化,且随着传播一直沿顺时针方向旋转。在通过焦点后,螺旋相位的旋进方向发生了反转。为了描述这些变化,利用 Laguerre-Guassin 模型对此过程进行了模拟,模拟的太赫兹涡旋光束相位分布如图 4(e)所示,完全重现了实验现象。这项工作的完成对于太赫兹涡旋光束的研究,太赫兹信息传输,以及太赫兹平板光学元件的研发都具有积极的推动作用。

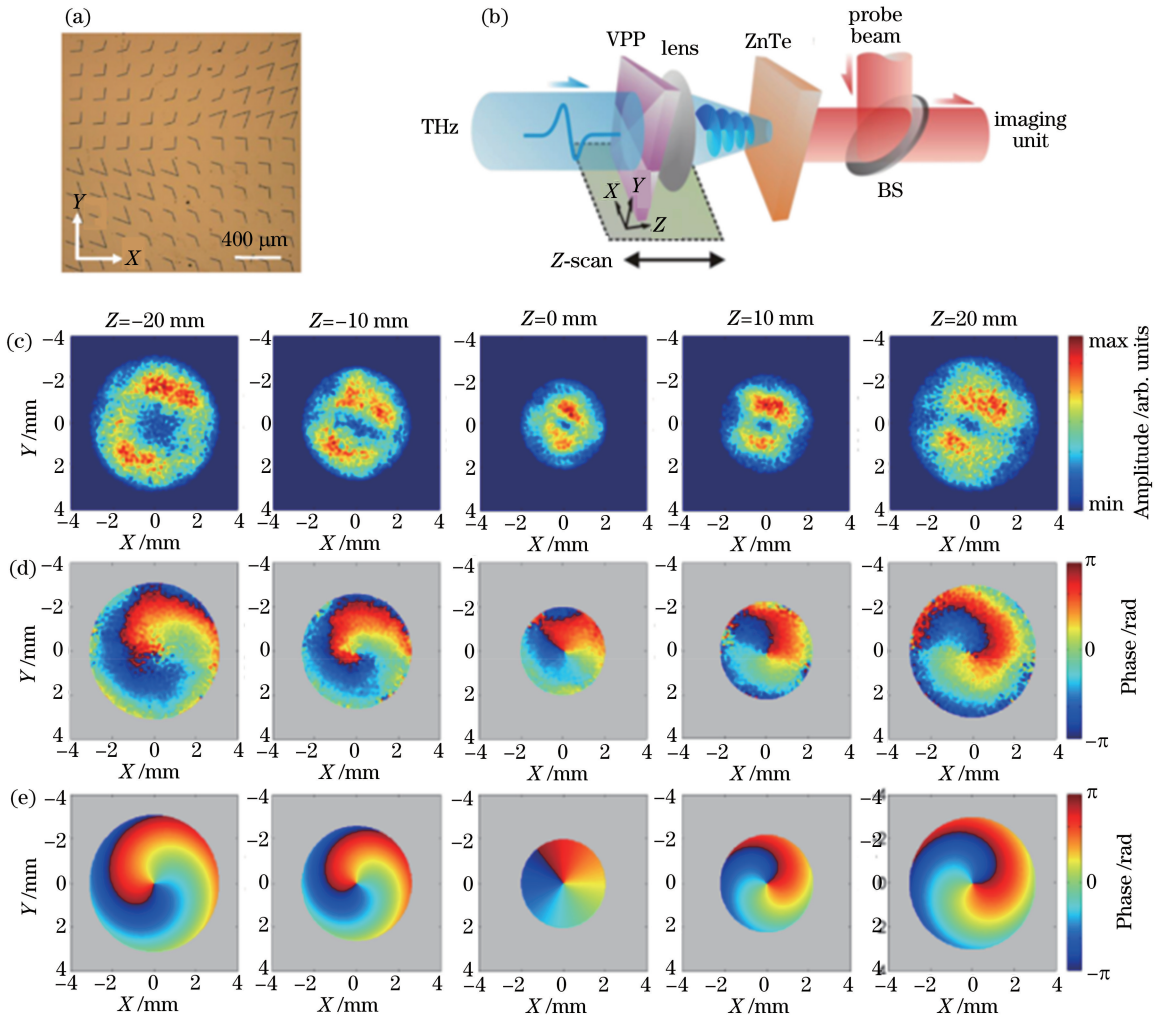


图 4 基于超表面技术的太赫兹涡旋光束的生成与分析^[13]。(a)基于 V 型金属天线的太赫兹涡旋相位板；(b)太赫兹数字全息成像系统；(c)测得的太赫兹振幅分布；(d)测得的太赫兹相位分布；(e)在不同观测面上模拟的太赫兹涡旋光束相位分布
 Fig. 4 Generation and analysis of THz vortex beam based on meta-surface technique^[13]. (a) THz vortex phase plate based on V-shaped metallic antenna; (b) THz digital holographic imaging system; (c) measured THz amplitude patterns; (d) measured THz phase patterns; (e) simulated phase patterns of THz vortex beam on different observation planes

在前人工作的基础上,2016 年 Wang 等^[14]使用太赫兹数字全息成像系统对聚焦太赫兹涡旋光束的矢量特性进行了表征与分析。实验中采用了聚乳酸介质涡旋相位板作为波前调制器,设计了拓扑荷数分别为 $l=1$ 和 $l=2$ 的两个涡旋相位板。图 5(a)为涡旋相位板的照片。图 5(b)展示了用于表征会聚太赫兹涡旋光束的太赫兹数字全息成像系统。图 5(c)显示了 0.62 THz 的 x 线偏振入射光通过拓扑荷数 $l=1$ 的涡旋相位板和透镜后,焦平面上横向电场 E_x 的振幅和相位分布。可以看出,由于存在中心相位奇点,振幅呈现出典型的环状分布,相位则显示出预期的涡旋分布。拓扑荷数 $l=2$ 的太赫兹涡旋光束横向电场 E_x 的振幅和相位分布展示在图 5(d)中。由于具有

较高的拓扑荷数,其振幅表现出更大的环形分布,相位变化则显示出围绕着光轴的两个周期性 2π 相移。本次工作还测量了太赫兹纵向电场分量 E_z 的分布情况。图 5(e)显示了焦平面上 $l=1$ 的 x 线偏振太赫兹涡旋光束在 0.62 THz 的 E_z 振幅和相位分布,其振幅在光轴上显示出一个椭圆形光斑和两个离轴旁瓣,相位呈现出 180° 的旋转对称模式。当拓扑荷数 $l=2$ 时, x 线偏振太赫兹涡旋光束 E_z 振幅和相位分布展示在图 5(f)中,其显示出更为复杂的场分布。 E_z 振幅近似为圆形轮廓,沿 x 方向存在三个极小值,相位呈现出双侧反对称模式。有趣的是,当太赫兹光场的偏振态变为圆偏振时,拓扑荷数 $l=1$ 的纵向电场分量 E_z 表现出了圆形实焦点和同心圆环的相位分布,

如图 5(g)所示。在相同聚焦条件下,通过比较 E_x 和 E_z 的焦斑,可以看出 E_z 的焦斑明显小于 E_x , E_z 的聚焦特性表现出类似径向偏振光束聚焦后纵向电场分量的分布特性,如图 5(h)所示,该特性可用于提高

太赫兹共焦扫描成像系统的空间分辨率。这项工作的完成能够使人们更加全面地理解太赫兹涡旋光束的矢量特性,对于将太赫兹波应用于高分辨显微和通信技术是很有价值的。

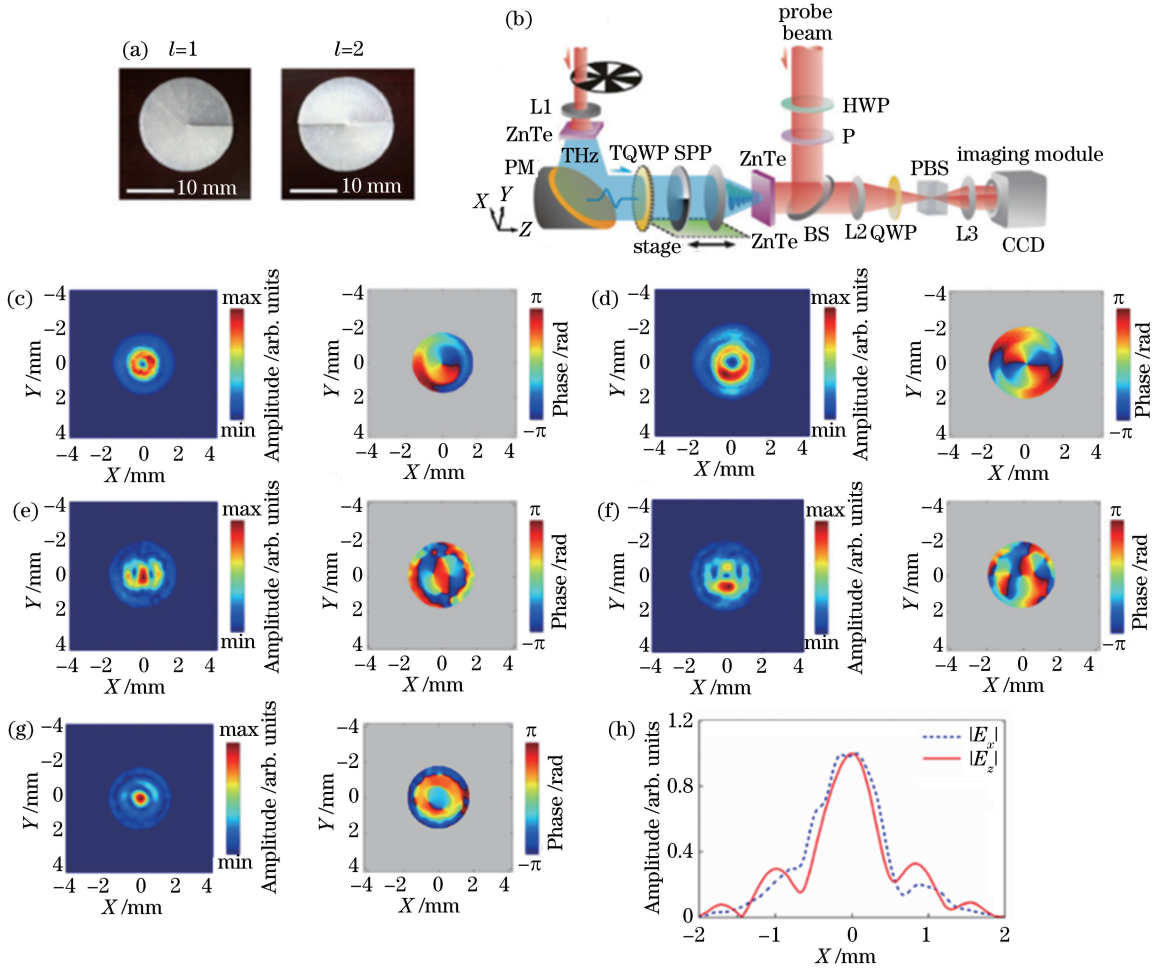


图 5 太赫兹会聚涡旋光束的矢量特性^[14]。(a)聚乳酸介质涡旋相位板;(b)太赫兹数字全息成像系统;(c) $l=1$ 的线偏振太赫兹涡旋光束在焦平面上的 E_x 振幅和相位分布,对应波段为 0.62 THz;(d)在 $l=2$ 时, E_x 振幅和相位分布;(e) $l=1$ 的线偏振太赫兹涡旋光束在焦平面上的 E_z 振幅和相位分布;(f)在 $l=2$ 时, E_z 振幅和相位分布;(g) $l=1$ 的圆偏振太赫兹涡旋光束的 E_z 振幅和相位分布;(h) E_z 与 E_x 的振幅包络对比

Fig. 5 Vectoral characteristics of THz converging vortex beams^[14]. (a) Polyactic vortex phase plates ; (b) THz digital holographic imaging system; (c) amplitude and phase patterns of E_x at 0.62 THz on focal plane for linearly polarized THz vortex beam with $l=1$; (d) amplitude and phase patterns of E_x with $l=2$; (e) amplitude and phase patterns of E_z for linearly polarized THz vortex beam with $l=1$; (f) amplitude and phase patterns of E_z with $l=2$; (g) amplitude and phase patterns of E_z for circularly polarized THz vortex beam with $l=1$; (h) comparison between amplitude envelopes of E_z and E_x

在贝塞尔光束上还可以加载涡旋相位调制,形成涡旋贝塞尔光束。这类光束不仅具有相位奇点和量子轨道角动量,而且保持着贝塞尔光束的无衍射特性。2018 年, Wu 等^[15]利用由聚四氟乙烯制作的涡旋相位板和轴棱锥产生了太赫兹涡旋贝塞尔光束,并对其衍射过程中的横向电场 E_x 和纵向电场 E_z 进行了深入分析。如图 6(a)所示,采用一阶涡

旋相位板和底角 α 为 30° 的轴棱锥产生 $l=1$ 的 x 线偏振太赫兹涡旋贝塞尔光束。通过 z 扫描测量和傅里叶变换提取 0.5 THz 光谱分量,构建太赫兹光束的传输过程。图 6(b)显示了在 $x-z$ 平面上太赫兹 E_x 分量的纵向振幅分布和在 $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm 处的 E_x 横向振幅截面。实验结果显示,由于涡旋相位板中心的相位奇点和轴棱锥的相位调制,

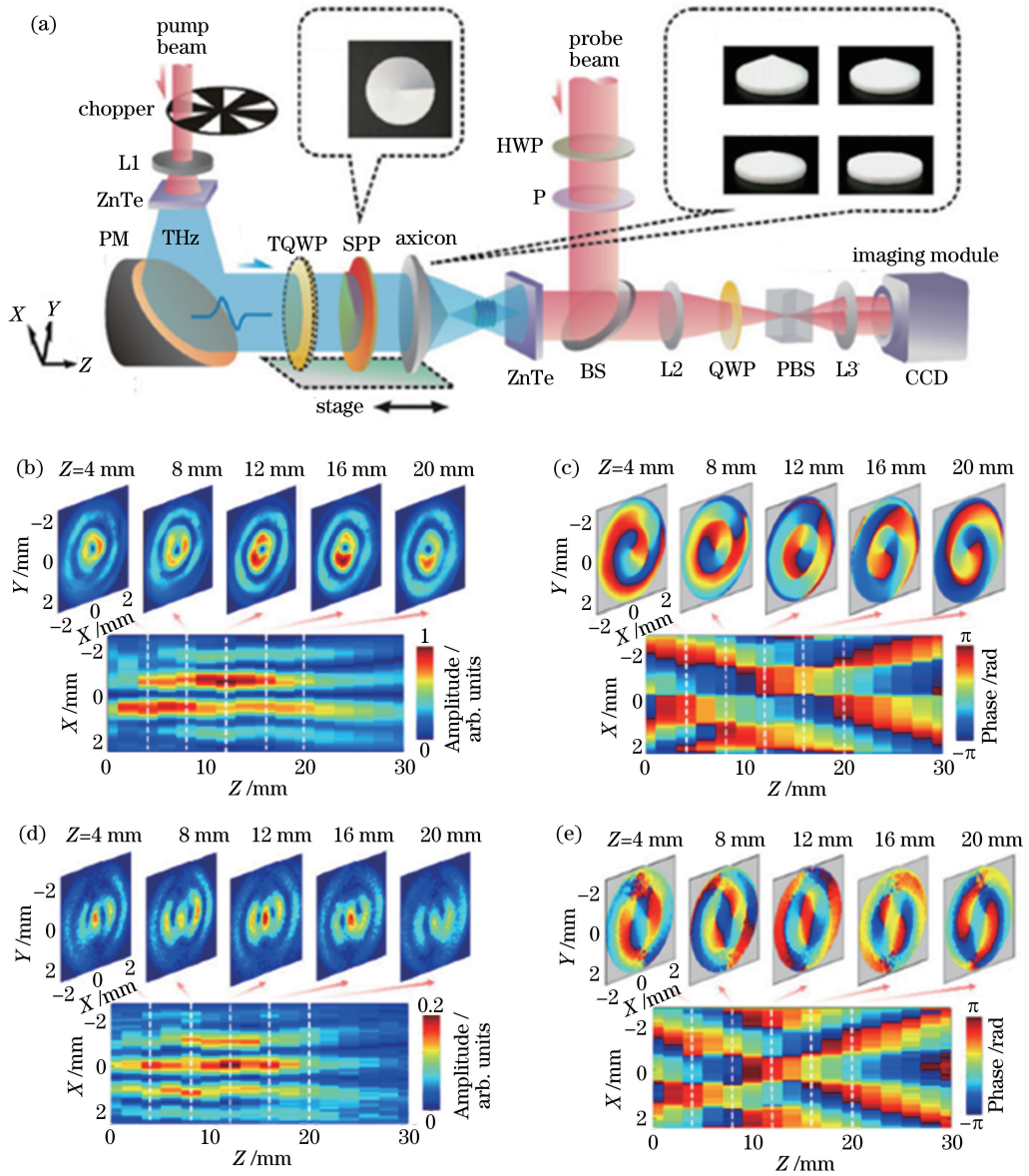


图 6 太赫兹涡旋贝塞尔光束的生成与分析^[15]。(a)太赫兹成像系统、涡旋相位板和轴棱锥；(b)在 $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm 处的 E_x 横向和纵向振幅截面；(c)相应的 E_x 横向和纵向相位截面；(d)在 $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm 处的 E_z 横向和纵向振幅截面；(e)相应的 E_z 横向和纵向相位截面

Fig. 6 Generation and analyses of THz vortex Bessel beams^[15]. (a) THz imaging system, vortex phase plate, and axicons; (b) amplitude patterns of E_x on transverse and longitudinal cross-sections at $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm; (c) corresponding phase patterns of E_x on transverse and longitudinal cross-sections; (d) amplitude patterns of E_z on transverse and longitudinal cross-sections at $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm; (e) corresponding phase patterns of E_z on transverse and longitudinal cross-sections

E_x 振幅呈现出主光环和环形旁瓣。同时，太赫兹光束也表现出明显的无衍射特性，通过比较不同传播距离处 E_x 的振幅分布，可以看出太赫兹光环的大小几乎保持不变。此外，本次工作测量了 E_x 分量的纵向相位截面分布并提取了不同传播距离处的横向相位截面，如图 6(c) 所示。可以看出，相位在主光环和环形旁瓣的区域上呈现螺旋分布，在传播过程中，

两个涡旋相位总是以逆时针方向旋转，并且在焦点前后相位的扭转方向是相反的。为了表征太赫兹涡旋贝塞尔光束的矢量性，通过相同的测量方法获得了纵向电场分量 E_z 的振幅和相位分布。图 6(d) 分别显示了 $x-z$ 平面上的 E_z 纵向振幅分布和 $z=4, 8, 12, 16, 20$ mm 处的 E_z 横向振幅截面分布。可以看出， E_z 振幅呈现出中心椭圆形主光斑和双侧对称

月牙形旁瓣。从纵向振幅截面上可以看出,主光斑的大小在 $z=0\sim 24$ mm 范围内几乎保持不变,显现出明显的无衍射特征。相应的相位分布显示在图 6 (e)中,在无衍射范围内,中央相位平坦区域保持固定的尺寸,并且在平坦区域的两侧始终保持着两个相位奇点。这项工作的完成加深了人们对于高阶太赫兹贝塞尔光束矢量传输特性的理解,对于将太赫兹技术应用在光学成像、通信和微粒操纵领域具有很重要的价值。

此外,太赫兹涡旋光束还可用于轨道角动量(OAM)复用的通信链路。2015年,Hui等^[16]提出了基于准太赫兹波的新型OAM模式天线,可以同时提供两个同轴传播的OAM模式光束,并实现了双信道通信。图7(a)、(b)分别展示了此天线的设计图和实物图,天线包含环形谐振器、金属板、相移网络、环形聚焦抛物面镜反射器和法兰连接器。该

天线可以产生 60 GHz 的准太赫兹波并携带 $l=\pm 3$ 的双 OAM 状态。图 7(c)、(d)分别显示了当 $l=+3$ 时距离天线 20 mm 处的准太赫兹波振幅和相位。图 7(e)、(f)分别显示了当 $l=-3$ 时测量的准太赫兹波振幅和相位。可以看出,准太赫兹振幅呈现环形分布,相位呈现涡旋态分布并具有中心奇点,符合涡旋光束的特点。为了验证双 OAM 模式准太赫兹光束在通信链路的应用,将一个 $l=+3$ 的 OAM 模式天线用作发射天线,另一个 $l=+3$ 或者 $l=-3$ 的天线用作接收天线,两个天线同心放置,接收天线的信号由频谱分析仪测量,如图 7(g)所示。图 7(h)展示了测量结果,蓝色实线是 60 GHz 的信号由 $l=+3$ 端口接收到的强度,红色实线是由 $l=-3$ 端口接收到的信号强度。可以看出,当输入信号是一个方波信号时, $l=+3$ 接收端口测得的信号呈现明显的周期性方波,表明建立了通信链路;

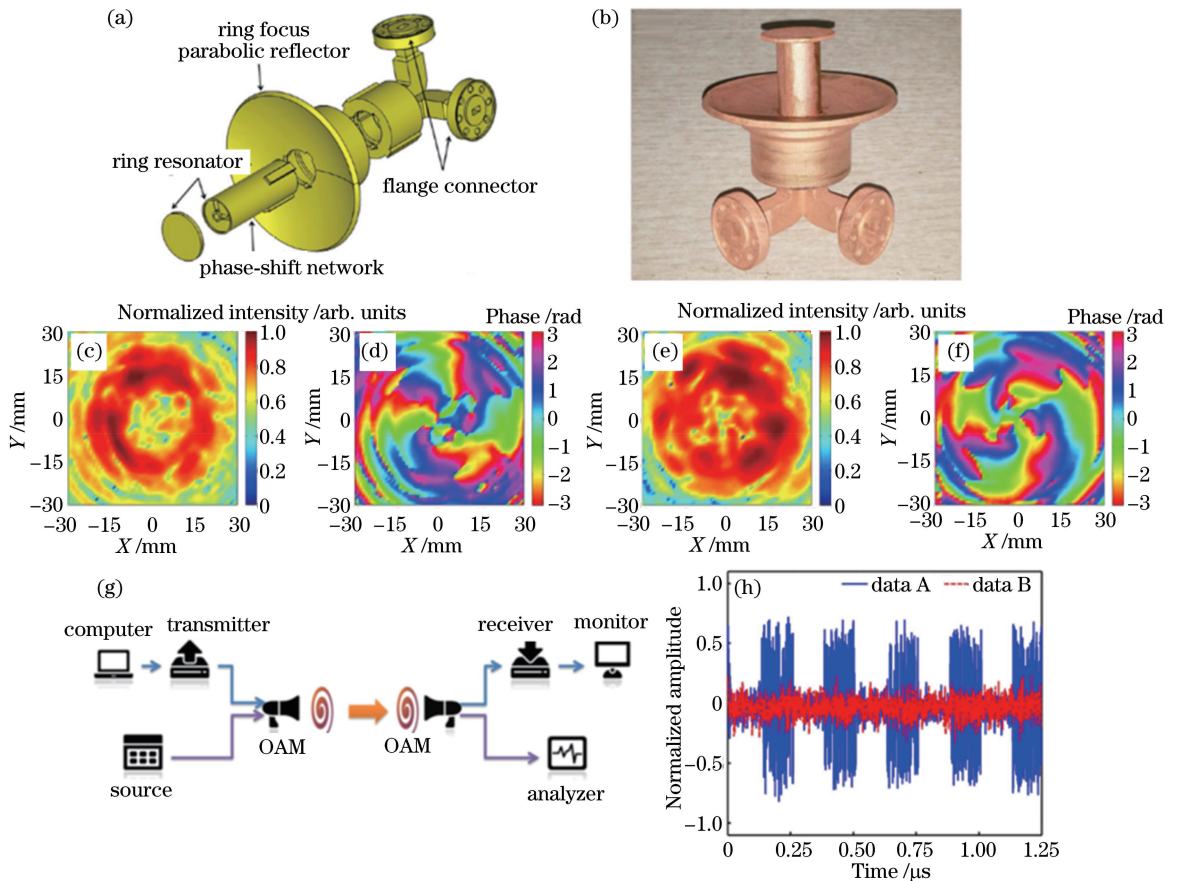


图 7 双轨道角动量(OAM)模式天线用于多路准太赫兹通信^[16]。(a)(b)双 OAM 模式天线的设计图与实物图;(c)(d)天线产生的 $l=+3$ 准太赫兹波振幅及相位,对应频率为 60 GHz;(e)(f)天线产生的 $l=-3$ 准太赫兹波振幅及相位;(g)用 OAM 模式天线实现双信道通信示意图;(h) $l=+3$ 和 $l=-3$ 接收端口获得的时域信号

Fig. 7 Multiplexed sub-THz communications with dual OAM mode antenna^[16]. (a)(b) Schematic and photo of dual OAM mode antenna; (c)(d) sub-THz amplitude and phase patterns with $l=+3$ and frequency of 60 GHz radiated by antenna; (e)(f) sub-THz amplitude and phase patterns with $l=-3$ radiated by antenna; (g) schematic of dual-channel communications with OAM mode antenna; (h) temporal signals measured by $l=+3$ and $l=-3$ receivers

$l = -3$ 接收端口测得的信号呈现平坦的噪声分布,证明了通信的低串扰并确保了双 OAM 通道信息传输的可靠性。

4 太赫兹艾里光束

环形艾里光束是一种特殊的无衍射光束,具有抛物线的传输轨迹和横向的加速度,并且在传播过程中具有自聚焦的特性,因此在生物医学、激光手术等领域有着重要的应用潜力。2016 年,He 等^[17]设计制作了 C 型阵列的环形艾里全息超表面(RAM)器件,通过同时调节太赫兹光波的振幅和相位,产生了自聚焦的环形艾里光束。利用太赫兹数字全息成像系统和 z 扫描的实验测量方法,对所生成的太赫兹

兹环形艾里光束光场进行相干探测。图 8(a)显示了所设计的全息超表面样品,插图部分样品的光学显微镜图,图 8(b)为太赫兹数字全息成像系统示意图。图 8(c)展示了 0.8 THz 光谱分量在样品出射面处的光强分布,可以看出中心环的强度最大,其外面包围着两个强度较弱的同心圆环。为了研究艾里光束的传播特性,提取了传播方向上 0.8 THz 太赫兹艾里光束沿 $x-z$ 截面的纵向振幅,如图 8(d)所示。不难发现,随着传播距离的增大,艾里光束光环的半径逐渐减小并最终聚焦于一点,表现出良好的自聚焦效应。图 8(e)、(f)展示了太赫兹环形艾里光束在横截面和纵截面的模拟结果,可以看出模拟结果与实验结果保持着很好的一致性。

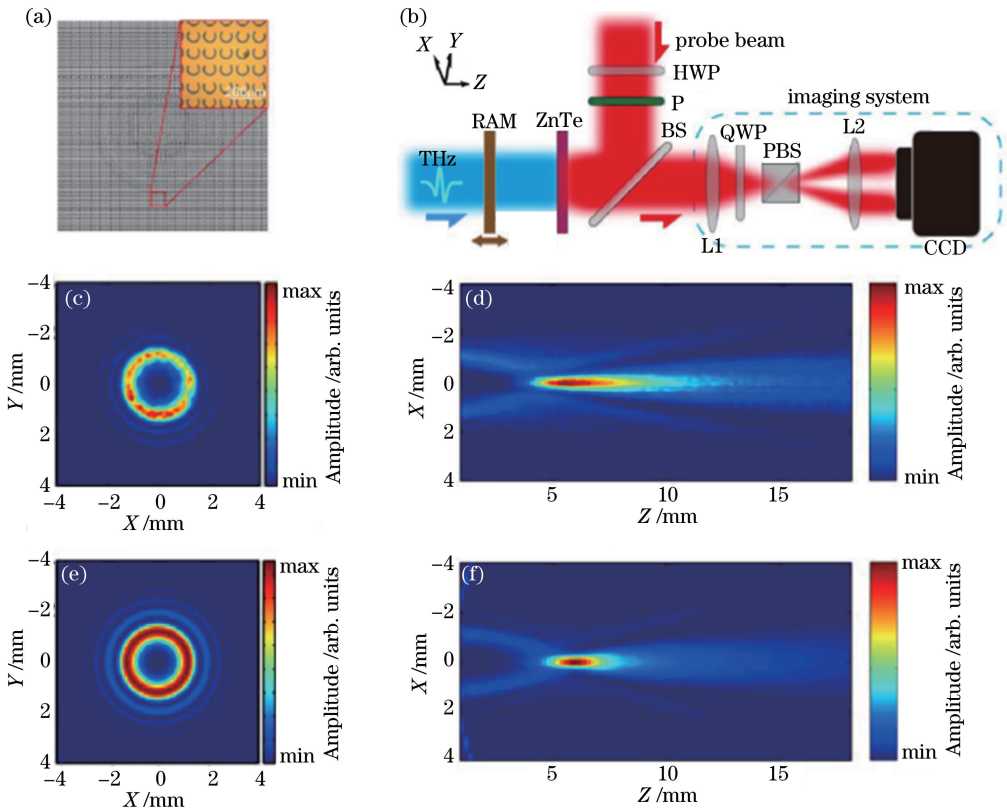


图 8 太赫兹环形艾里光束的产生和表征^[17]。(a)用于产生太赫兹环形艾里光束的超表面器件,插图部分样品的光学显微镜图;(b)太赫兹数字全息成像系统;(c)实验和(e)模拟上获得的在样品出射面 0.8 THz 光谱分量强度分布图;(d)实验和(f)模拟在 0.8 THz 太赫兹环形艾里光束纵向强度分布

Fig. 8 Generation and characterization of THz ring-Airy beam^[17]. (a) Designed ring-Airy meta-hologram device with optical microscope image of partial sample in inset; (b) THz digital holographic imaging system; (c) experimental and (e) simulated intensity patterns of spectral component at 0.8 THz on exit surface of sample; longitudinal intensity patterns of THz ring-Airy beam at 0.8 THz extracted from (d) experiment and (f) simulation

艾里光束还可以与涡旋光束结合形成艾里涡旋光束。2017 年,Liu 等^[18]提出了将光场轨道角动量加载到径向对称的艾里光束中,形成涡旋艾里光束。图 9(a)为用于产生太赫兹环形涡旋艾里光束的实

验装置,其中包含两块相位板 R1 和 R2。如图 9(a)中上插图所示,相位板 R1 包含径向立方相位、轴棱锥相位和涡旋相位,光束通过相位板 R1 后,在相位板 R2 的平面对其进行傅里叶变换后会包含额外的

相差,相位板 R2 则用于校正这些像差,光束通过相位板 R2 后就会产生太赫兹环形涡旋艾里光束。图 9(a)中下插图表示入射到相位板 R1 上的太赫兹光束强度分布。图 9(b)展示了当拓扑荷数 l 从 0 变化到 3 时,生成的太赫兹环形涡旋艾里光束在 x - z 平面上的传播过程。可以看出,太赫兹环形涡旋艾里光束展示出了明显的自聚焦特征,并且包含了携带轨道角动量光束的典型特征。在传播一段距离后,拓扑荷数 $l=0$ 的太赫兹光束形成了实心焦点;拓扑荷数 $l=1,2,3$ 的光束则开始发散,沿传播方向呈现空

心的强度分布。图 9(c)分别显示了这些光束在 $z=0$ mm 和 $z=100$ mm 处的强度分布,在 $z=0$ mm 的平面上所有光束都呈现出环形的强度分布;在 $z=100$ mm 的平面上 $l=0$ 的艾里光束呈现出实焦点, $l=1,2,3$ 的艾里光束呈现出环形分布,环形强度的尺寸随拓扑荷数 l 的增大而增大,这与拉盖尔高斯光束特征一致。这项工作证实了太赫兹涡旋艾里光束能够携带轨道角动量并在传播过程中实现自聚焦功能,这种光束在新型太赫兹成像系统和基于轨道角动量的通信链路中有着非常大的应用前景。

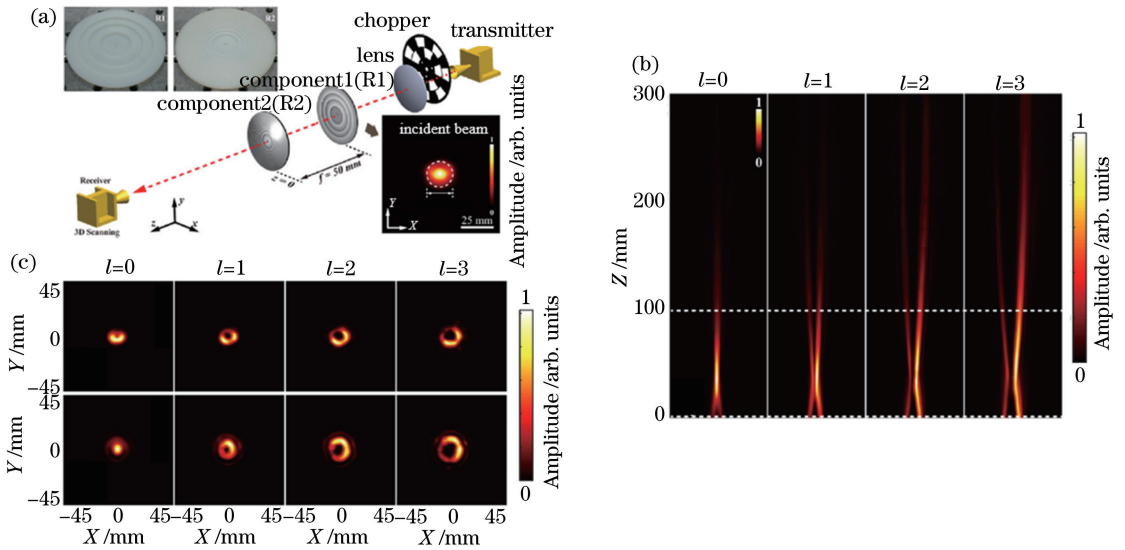


图 9 太赫兹涡旋艾里光束的生成与分析^[18]。(a)用于生成太赫兹涡旋艾里光束的实验装置示意图,上插图表示由 3D 打印获得的 R1 和 R2 相位板照片,下插图表示入射太赫兹光束强度分布;(b)太赫兹环形涡旋艾里光束在 x - z 平面上的传播过程,拓扑荷数从 $l=0\sim 3$;(c)在 $z=0$ mm 和 $z=100$ mm 处不同拓扑荷数太赫兹环形涡旋艾里光束的强度分布

Fig. 9 Generation and analysis of THz Airy vortex beam (TAVB)^[18]. (a) Schematic of experimental setup for generating TAVBs (upper inset: photos of 3D-printed phase plates R1 and R2, lower inset: intensity pattern of incident THz beam); (b) propagation processes of TAVBs with topological charges of $l = 0-3$ on x - z plane; (c) intensity patterns of TAVBs with various topological charges at $z=0$ mm and $z=100$ mm

5 太赫兹瓶子光束

通过对光场波前进行适当的相位调制,还可以生成一种瓶子光束,即光场在传播过程中形成一个被三维壁垒包围的光学势阱,由于其可以实现低折射率的粒子操控和提高荧光显微中的纵向分辨率,在可见光范围内已被广泛研究和应用,而这类光束在太赫兹波段的应用还鲜有报道。2018 年, Li 等^[19]采用聚四氟乙烯轴棱锥与硅透镜组合的方式产生了太赫兹瓶子光束。如图 10(a)所示,采用太赫兹数字全息成像系统作为测量平台,通过让 x 线偏振太赫兹准平面波连续通过轴棱锥和硅透镜来形成太赫兹瓶子光束,并用 z 扫描方式记录和分析了太赫兹瓶子光束的形成过

程。如图 10(b)所示,在 $z=4.5$ mm 和 $z=-4.5$ mm 处,太赫兹光束具有中心主光斑和环形旁瓣,呈现出类似贝塞尔函数的分布特征;而在 $z=0$ mm 处,太赫兹光束呈现单个圆环分布,表明其具有由光学壁垒围绕的中心暗焦点。如图 10(c)所示,在 x - z 截面上,随着传播距离的增加,太赫兹场的中心峰值强度逐渐衰减,并且出现太赫兹光环,最终在焦平面处出现暗焦点;太赫兹波通过 $z=0$ mm 处后其光场呈现相反的演变趋势,太赫兹光环的边缘逐渐变得模糊且中央暗焦点开始收缩,最后太赫兹强度集中到中心并再次成为峰值,表现出瓶子光束典型的变化特征。图 10(d)、(e)分别展示了太赫兹波相位在横向和纵向截面的分布,从图中可以更清晰地了解太赫兹瓶子光束的形成

机理。可以看出,太赫兹光束连续通过轴棱锥和硅透镜后,经历了会聚和发散的过程,而瓶子光束的形成源于会聚或发散太赫兹光波的相互干涉。这项工作

的完成实现了太赫兹波段的光学瓶子分布,对于未来将太赫兹技术应用于粒子操控和荧光增强显微方面具有积极的推动作用。

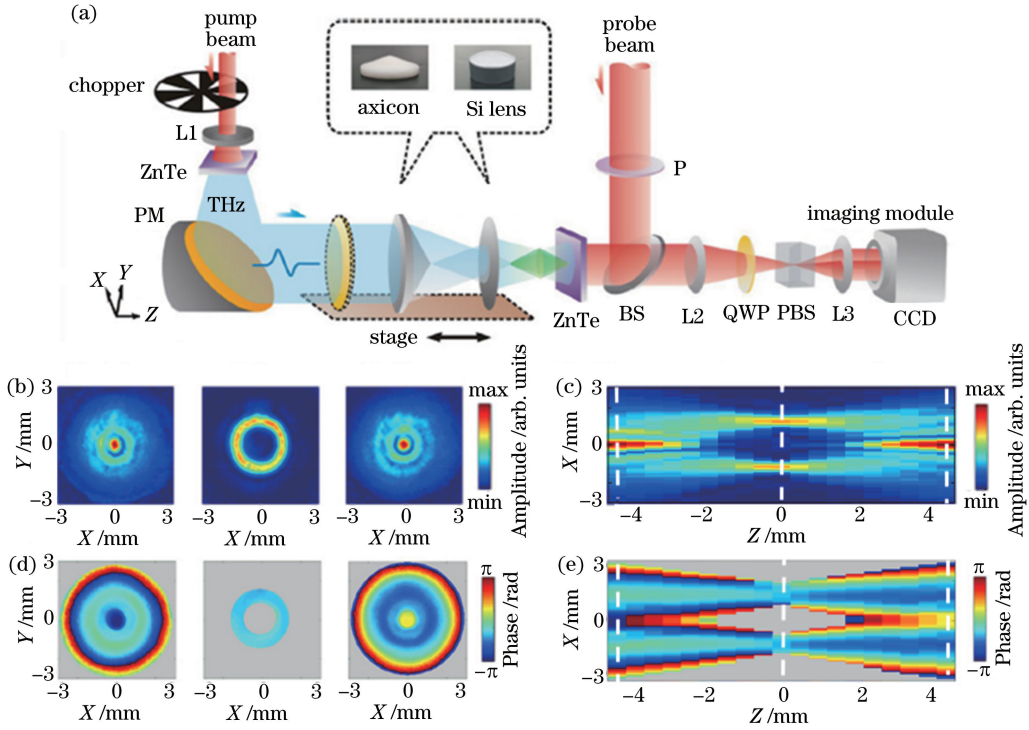


图 10 太赫兹瓶子光束的生成与表征^[19]。(a)太赫兹表征系统与样品;(b)在 $z = -4.5, 0, 4.5$ mm 处 x - y 平面的太赫兹振幅图像;(c)在 x - z 平面上太赫兹纵向振幅截面;(d)(e)横向和纵向截面的太赫兹相位分布

Fig. 10 Generation and characterization of THz bottle beam^[19]. (a) THz characterization system and samples; (b) THz amplitude images on x - y plane at $z = -4.5, 0, 4.5$ mm; (c) longitudinal amplitude cross-section of THz field on x - z plane; (d)(e) THz phase patterns on transverse and longitudinal cross-sections

6 太赫兹径向偏振光束

除了通过相位调制生成具有独特波前分布的特殊光束,具有独特偏振分布的特殊光束也引起了人们的普遍关注,径向偏振光束就是其中的典型例子。径向偏振光束在波阵面上具有轴对称的沿径向的非均匀偏振态,这一独特性质使径向偏振光束可以应用于高分辨率成像、光学捕获和高效表面等离子体激发等领域。2015年,Xie等^[20]将亚波长金属光栅与光控太赫兹全息图的技术相结合,实现了太赫兹径向偏振光束的产生。在实验过程中,入射的太赫兹波通过四分之一波片后转换为圆偏振,照射硅基金属亚波长环形光栅。利用环形光栅可以调制不同位置透射的太赫兹偏振态,并利用空间光调制器对抽运光加载特定叉型光栅图案,照射硅基表面,形成特定的光致载流子空间分布,进而调制透过太赫兹波的复振幅,最终在透射太赫兹一级衍射分量中形成径向偏振光束。太赫兹径向偏振光束在水平和垂直偏振态上的分量可

以通过太赫兹数字全息成像系统的偏振检测功能获取。图 11(a)展示了实验结果;在水平分量上,太赫兹波振幅为左右两个半圆形分布,其中左右两个瓣的偏振态相反并存在 π 的相位差;在垂直分量上,太赫兹波振幅为上下两瓣,偏振态相反并存在 π 的相位差;将二者合成为径向分量,则太赫兹波振幅呈中心圆环分布,所有的偏振态都沿半径方向呈辐射状,对应的相位则为平坦分布。图 11(b)展示了相应的模拟结果,其与实验结果很好地吻合。这项工作的完成验证了生成矢量偏振太赫兹光束的可行性,为将来生成其他特殊偏振的光束,以及更加灵活和动态地控制太赫兹波打下基础。

2012年,Imai等^[21]提出了利用具有三重旋转对称晶向的非线性晶体产生太赫兹矢量光束。将 8 块不同晶向的 GaP 晶体组合,对于水平入射的激发光,晶体可以产生径向偏振太赫兹波,对于 45° 偏振入射的激发光,晶体可以产生角向偏振太赫兹波,如图 12(a)所示。图 12(b)分别展示了径向偏振光束和

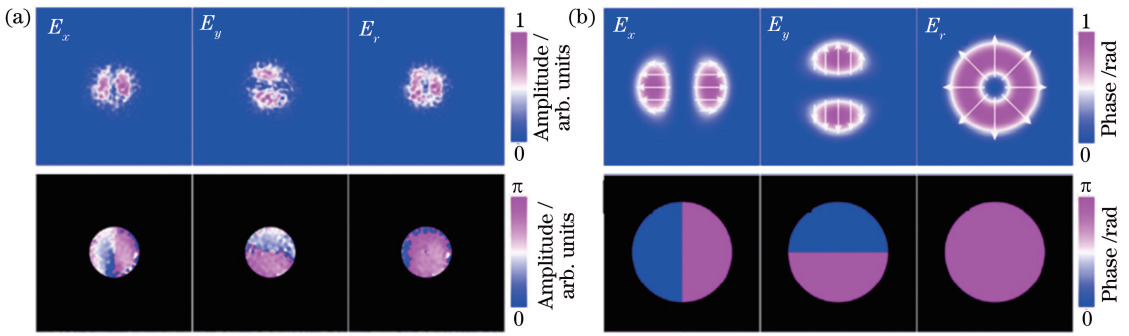


图 11 太赫兹径向偏振光束的生成与表征^[20]。(a)实验测量的径向偏振太赫兹光束振幅、相位在不同偏振方向下的分布;(b)相应的模拟结果

Fig. 11 Generation and characterization of radially polarized THz beam^[20]. (a) Experimental amplitude and phase patterns on different polarization orientations for radially polarized THz beam; (b) corresponding simulation results

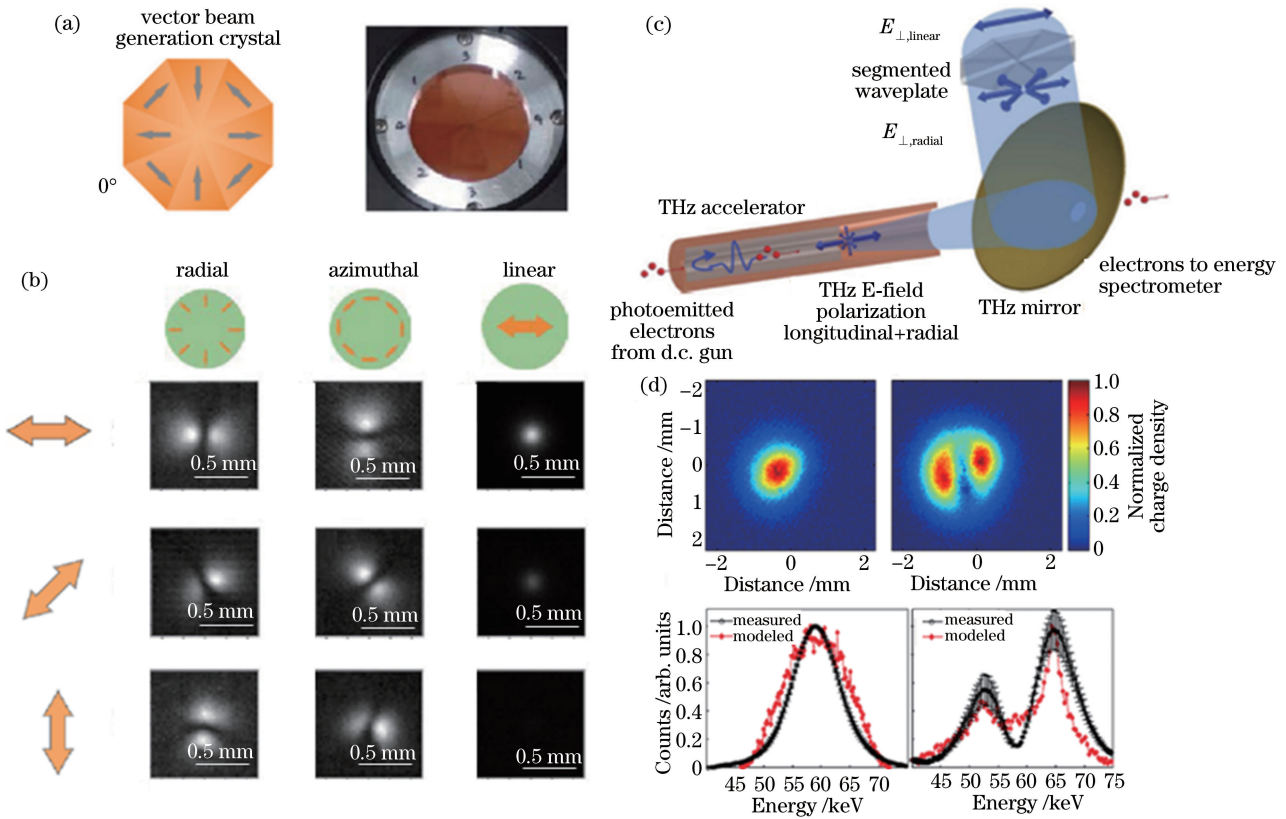


图 12 太赫兹径向偏振光束的产生与应用^[21-22]。(a)具有三重旋转对称晶向的分段非线性晶体示意图与照片;(b)太赫兹径向、角向和 x 线偏振光束在 x 、 y 、 45° 偏振方向上的强度图像;(c)太赫兹直线电子加速器示意图;(d)利用微通道板探测器获取的电子密度分布图像以及电子能量光谱,左侧和右侧分别对应没有和有太赫兹场加速的情况

Fig. 12 Generation and application of THz radially polarized beam^[21-22]. (a) Schematic and photo of segmented nonlinear optical crystal with threefold rotational symmetry; (b) THz intensity images projected along x , y , and 45° polarization orientations for THz radially, azimuthally, and x -linearly polarized beams; (c) schematic of THz linear electron accelerator; (d) electron density distribution images as well as electron energy spectra recorded by micro-channel plate without THz field (left) and with THz field (right)

角向偏振光束沿 x 、 y 和 45° 偏振方向上的强度分布图,同时还展示了线偏振太赫兹光束在三个偏振方向的强度分布。实验结果表明,太赫兹径向和角向偏振

光束在不同偏振投影下都有两个波瓣,并且沿着不同偏振方向一直保持对称,同时二者的光斑方向始终是正交的,证明了两种太赫兹矢量光束可以通过此方法

生成和转化。这项工作的完成为实现宽带太赫兹矢量光束提供了有效的产生方法。

2015年, Nanni等^[22]提出了利用太赫兹径向偏振光束的纵向分量 E_z 对电子进行加速。太赫兹加速器示意图如图12(c)所示, 线偏振太赫兹波通过由不同晶向组合的波片转换为径向偏振太赫兹波, 随后太赫兹波被抛物面镜聚焦耦合至波导中, 并在波导的末端被反射, 与电子束相互作用。由于太赫兹波具有径向偏振特性, 其会聚光场的纵向分量 E_z 具有方向单一、强度高和光斑小的特点, 因此电子束被与其同方向传输的太赫兹波 E_z 场加速, 电子束离开波导并通过抛物面镜中的小孔, 最终被探测到。图12(d)展示了利用微通道板探测器获取的电子密度分布图像和电子能量光谱曲线。可以看出, 当没有受到太赫兹场加速时, 测量结果显示了单峰特征; 而当存在太赫兹场加速时, 测量结果显示了双峰特征。出现该现象的原因是: 部分电子被太赫兹场加速而部分电子被减速, 导致电子能量不同, 同时磁性偶极子光谱仪的作用导致双峰的出现。其中, 电子的加速和减速, 是由电子束与太赫兹脉冲之间的相速度不匹配导致的。这项工作通过实验观测到了太赫兹场对电子的加速过程, 开拓了太赫兹技术的应用领域, 特别是为将太赫兹径向偏振光束应用到基础研究领域打下基础。

7 结束语

综述了本课题组和其他团队近年来在发展太赫兹特殊光束方面所作的一些努力, 主要针对太赫兹贝塞尔光束、涡旋光束、艾里光束、瓶子光束和径向偏振光束的各种产生方法、表征手段及应用领域进行了讨论。随着人们对太赫兹辐射了解的逐渐深入, 太赫兹技术的发展逐渐成熟, 太赫兹特殊光束也势必会成为本领域的一个主流研究方向。利用这些太赫兹特殊光束独特的传输特性, 如太赫兹涡旋光束的量子化轨道角动量, 太赫兹贝塞尔光束的无衍射和自修复特性, 太赫兹艾里光束的自聚焦特性, 太赫兹瓶子光束的三维光学势阱, 以及太赫兹径向偏振光束的强 E_z 分布等, 有望将太赫兹技术应用于粒子操控、光学显微、光学加工和光通信等诸多领域中。当然, 目前将太赫兹特殊光束真正用于人们的生产生活尚未实现, 有一些问题还需要解决。例如: 当前产生强太赫兹脉冲的设备比较笨重, 而连续波太赫兹源所携带的信息太少, 如何产生宽带强太赫兹特殊光束是太赫兹特殊光束用于粒子操控、光学加工等领域需要突破的瓶颈; 目前太赫兹波段还是缺乏有效的调制器件, 产生

高质量的太赫兹特殊光束仍然比较困难, 这是将太赫兹特殊光束应用于光学显微、光通信等领域必须解决的问题。幸运的是, 随着具有高非线性系数电光晶体(如 LiNbO_3 ^[23]、DSTMS^[24]等)的应用, 太赫兹辐射场已经可以达到几十甚至大于100 MV/cm, 大大增强了太赫兹特殊光束在基础研究领域的应用价值。目前已有研究报道, 利用强太赫兹脉冲可以打穿金属薄膜, 表明太赫兹技术不仅可作为探测手段, 更有望成为一种加工手段^[25]。另一方面, 超表面器件已逐渐成为太赫兹调制器的主要发展方向, 由于其具有功能强、体积小和集成度高等特点, 势必会取代传统太赫兹调制器成为产生太赫兹特殊光束的主要器件, 这一点在文中已经有了明显的体现。

总之, 随着太赫兹光子学领域的不断发展, 更强的太赫兹源、更灵敏的太赫兹探测技术和众多太赫兹波段的功能器件不断被研制, 相信在不久的将来太赫兹特殊光束必定会出现在新一代太赫兹光谱与成像系统中。本团队将继续致力于该领域的开发和应用, 推动其向实用化和工业化方向发展, 为祖国科研事业的腾飞作出贡献。

参 考 文 献

- [1] Wang L H, Wang Y X, Liu Y Y, *et al.* Establishment and the usage of terahertz spectral database[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0815002.
王凌辉, 王迎新, 刘圆圆, 等. 太赫兹光谱数据库的建立和使用[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0815002.
- [2] Li H Y, Li Q, She J Y, *et al.* Influence of Gaussian beam on terahertz radar cross section of a conducting flat plate in two dimension[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0711001.
李慧宇, 李琦, 余剑雨, 等. 高斯光束对二维导体平板太赫兹雷达散射截面影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0711001.
- [3] Wang W A, Liu W, Yang X, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of anhydrous glucose[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1111001.
王文爱, 刘维, 杨茜, 等. 无水葡萄糖的太赫兹时域光谱特性[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1111001.
- [4] Winnerl S, Zimmermann B, Peter F, *et al.* Terahertz Bessel-Gauss beams of radial and azimuthal polarization from microstructured photoconductive antennas [J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1571-1576.
- [5] Shaikat M U, Dean P, Khanna S P, *et al.* Generation of Bessel beams using a terahertz quantum cascade laser [J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 1030-1032.
- [6] Knyazev B, Choporova Y, Mitkov M, *et al.* Generation

- of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive Bessel beams with orbital angular momentum [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115 (16): 163901.
- [7] Wei X L, Liu C M, Niu L T, *et al.* Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range [J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (36): 10641-10649.
- [8] Liu C M, Niu L T, Wang K J, *et al.* 3D-printed diffractive elements induced accelerating terahertz Airy beam [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29342-29348.
- [9] Bitman A, Moshe I, Zalevsky Z. Improving depth-of-field in broadband THz beams using nondiffractive Bessel beams [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4164-4166.
- [10] Bitman A, Goldring S, Moshe I, *et al.* Computed tomography using broadband Bessel THz beams and phase contrast [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1925-1928.
- [11] Wu Z, Wang X K, Sun W F, *et al.* Vector characterization of zero-order terahertz Bessel beams with linear and circular polarizations [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 13929.
- [12] Wang S, Wang S Y, Zhang Y. Polarization-based dynamic manipulation of Bessel-like surface plasmon polaritons beam [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (5): 5461-5468.
- [13] He J W, Wang X K, Hu D, *et al.* Generation and evolution of the terahertz vortex beam [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [14] Wang X K, Shi J, Sun W F, *et al.* Longitudinal field characterization of converging terahertz vortices with linear and circular polarizations [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7178-7190.
- [15] Wu Z, Wang X K, Sun W F, *et al.* Vectorial diffraction properties of THz vortex Bessel beams [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1506-1520.
- [16] Hui X N, Zheng S L, Chen Y L, *et al.* Multiplexed millimeter wave communication with dual orbital angular momentum (OAM) mode antennas [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10148.
- [17] He J W, Wang S, Xie Z W, *et al.* Abruptly autofocusing terahertz waves with meta-hologram [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2787-2790.
- [18] Liu C M, Liu J S, Niu L T, *et al.* Terahertz circular Airy vortex beams [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3891.
- [19] Li H T, Wang X K, Wang S, *et al.* Vector measurement and performance tuning of a terahertz bottle beam [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13177.
- [20] Xie Z W, He J W, Wang X K, *et al.* Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 359-362.
- [21] Imai R, Kanda N, Higuchi T, *et al.* Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 21896-21904.
- [22] Nanni E A, Huang W R, Hong K H, *et al.* Terahertz-driven linear electron acceleration [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8486.
- [23] Hebling J, Yeh K L, Hoffmann M C, *et al.* Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(7): B6-B19.
- [24] Vicario C, Monoszlai B, Hauri C P. GV/m single-cycle terahertz fields from a laser-driven large-size partitioned organic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112 (21): 213901.
- [25] Agranat M, Chefonov O, Ovchinnikov A, *et al.* Damage in a thin metal film by high-power terahertz radiation [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(8): 085704.