

长距离太赫兹无衍射波束的产生

吴巧¹, 项飞菝¹, 黄倩¹, 杨振刚², 刘劲松¹, 王可嘉^{1*}

¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

²华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 提出一种轴棱锥-透镜-轴棱锥的相位透镜组结构, 对该结构进行理论分析和模拟仿真计算, 并采用快速三维打印技术制备的轴棱锥进行实验验证, 获得无衍射长度接近 1000 mm 的太赫兹贝塞尔波束。该波束的无衍射区域不再紧贴轴棱锥, 而是具有约 100 mm 的投送距离。该研究结果可促进太赫兹贝塞尔波束在大景深成像方面的应用。

关键词 太赫兹技术; 贝塞尔波束; 透镜组; 多轴棱锥; 时域有限差分法

中图分类号 140.3099

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614024

Generation of Terahertz Beams with Long Diffraction-Free Length

Wu Qiao¹, Xiang Feidi¹, Huang Qian¹, Yang Zhengang², Liu Jinsong¹, Wang Kejia^{1*}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract This study aims to propose a structure of axicon-lens-axicon phase lens group. The structure is simulated and analyzed theoretically. The experimental verification is conducted using the rapid 3D printing technology to prepare an axonal pyramid, and a terahertz Bessel beam with 1000 mm diffraction-free length is generated. The results indicate that the diffraction-free region of such a beam is no longer proximal to the axial pyramid, but has a 100 mm distance from the final axicon. The findings in this study are helpful for the application of a terahertz Bessel beam in the field of large depth of field imaging.

Key words terahertz technology; Bessel beam; lens group; multi-axicon; finite difference time domain method

OCIS codes 040.2235; 140.3300; 080.3620; 120.5060

1 引 言

近几十年来,具有特殊空间强度分布或者相位分布的结构化光束成为光学领域的研究热点之一^[1-11]。结构化光束具有许多优良的特性,例如无衍射、自聚焦、自弯曲、自修复以及携带轨道角动量等,因此在许多具有挑战性的领域得到应用:使用携带轨道角动量的涡旋光束,可以极大地提高无线通信系统的通信容量和谱效率^[5-6];无衍射光束可用于激光微加工^[7]和扩展成像系统的焦深^[8-9];具有自弯曲和自愈特性的加速艾里光束可用于显微成像和

等离子体物理等领域^[10-11];利用自聚焦圆对称艾里光束,可以对微粒进行自由操纵^[12]。

无衍射光束是结构化光束中最为典型的一类光束,例如贝塞尔光束^[13]、马丢光束^[14]、抛物型光束^[15]、加速艾里光束^[16]以及圆对称艾里光束^[17]等。其中,贝塞尔光束是最著名的无衍射光束,由 Durnin 等^[13]在 1987 年首次提出并使用环缝法获得。随着技术的发展,人们探索了许多在可见光和红外波段产生贝塞尔光束的方法,例如轴棱锥法、球面相差法、计算机全息图法、超材料法、超表面法和空间光调制器法等^[18-25]。使用轴棱锥产生贝塞尔光

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-02-13; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(11574105, 61475054)

* E-mail: wkjto@sina.com

束具有器件简单、转换效率高特点,是最简单且最常见的方法。

太赫兹 (THz) 波是指电磁波谱中频率为 0.1~10 THz 的电磁辐射,其波长为 30 μm~3 mm。太赫兹波的一个特性是能够有效穿透很多低密度介电材料,可以对许多光学不透明物体进行透视成像。利用这一特性开发的太赫兹主动式成像设备^[26]已成功应用于人体安检、工业无损探伤以及文物修复等领域。在这些成像设备中,一般采用聚焦的方式将太赫兹波投射到成像目标物体上。这种方式的一个缺点是聚焦太赫兹波束的焦深很短,无法实现大景深成像。因此,有研究者提出使用太赫兹贝塞尔波束来扩展焦深。2008 年,Lo 等^[27]设计出 0.1~1.5 THz 波段的太赫兹非球面透镜,所产生的贝塞尔波束可实现 75 mm 景深的太赫兹反射式成像。Ok 等^[28]将使用单轴棱锥在 0.14 THz 频率处产生的贝塞尔波束应用于物质检测,成像焦深为 10.7 mm,分辨率为 1.11 mm。2015 年,Busch 等^[29]将贝塞尔波束应用于带宽为 0.1~1 THz 的时域光谱系统 (TDS) 系统,实现了景深为 120 mm、分辨率小于 2 mm 的太赫兹反射式成像。

上述研究结果表明,使用轴棱锥可以简单、高效地产生太赫兹贝塞尔波束,但利用单一轴棱锥产生的太赫兹贝塞尔波束总是紧贴产生轴棱锥,不能将焦深区域投送到远距离。换句话说,轴棱锥没有“焦

距”这个概念,即便是拥有 200 mm 无衍射长度的太赫兹贝塞尔波束,轴棱锥也很难走向实际应用,尤其是不能满足远距离反射成像需求。那么,如何解决这个限制太赫兹贝塞尔波束实用性的问题? 一个很自然的想法就是单个轴棱锥不行,那么使用多个轴棱锥是否可以? 本文提出了一种轴棱锥-透镜-轴棱锥的透镜组结构,成功地产生了无衍射长度接近 1000 mm 的太赫兹贝塞尔波束,而且该波束的无衍射区域 (即焦深) 不再紧贴轴棱锥,而是具有约 100 mm 的“焦距”。

2 理论设计与仿真

2.1 基于角谱理论的原理分析

如前所述,使用轴棱锥产生的太赫兹贝塞尔波束总是紧贴产生轴棱锥,如图 1(a) 所示。根据几何光学分析,准直的高斯波束入射到轴棱锥后,出射的锥形波束在空间交叠干涉,形成贝塞尔波束。在小角度近似下,无衍射区域的长度 $z_0 = \frac{\omega_0}{\tan \gamma (n-1)}$, 其中 ω_0 为入射波束的束腰半径, γ 和 n 分别为轴棱锥底角和材料的折射率。如果将入射的准直高斯波束更换为一个环状波束,那么根据几何光学分析,交叠区域就会远离轴棱锥,即形成的贝塞尔波束不再紧贴轴棱锥,如图 1(b) 所示。为了论述方便,定义图 1(b) 中 z_1 为贝塞尔波束无衍射区域的投送距离。

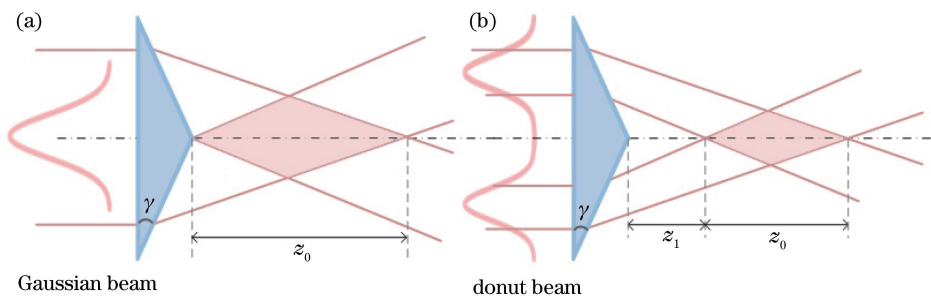


图 1 不同入射情况下产生贝塞尔光束的示意图。(a) 高斯光束; (b) 环状光束

Fig. 1 Schematic for generation of Bessel beams under different incident conditions. (a) Gaussian beam; (b) donut beam

增大贝塞尔波束无衍射区域的投送距离的关键是产生环状入射波束。为此,根据文献^[30],设计了如图 2 所示的透镜组结构,该透镜组包含两个不同底角的轴棱锥 (A1、A2) 和一个凸透镜 (L)。轴棱锥 A1 的作用是将入射的准直高斯波束变换为贝塞尔波束。将 L 放置在该贝塞尔波束无衍射区域,其作用是将贝塞尔波束变换为一个环状波束,进而入射到 A2 上,产生新的具有一定投送距离的贝塞尔波束。由于太赫兹波的波长比可见光长,其波动效应

也更加明显,难以采用简单的几何光学理论进行分析。为此,以下采用基于波动光学的角谱理论来对该结构进行原理性分析。

鉴于器件的圆对称性,若将器件置于高斯波束的束腰位置,可将入射到 A1 的准直高斯波束写为: $E_0(\rho) = \exp(-\rho^2/\omega_0^2)$, 其中 ω_0 为波束的腰斑半径。若 x 、 y 表示某一点在笛卡儿坐标系下的坐标,则 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为对应柱坐标系下的半径。若将光学器件作为薄器件处理,不考虑吸收损耗,则器件

前、后表面的光场变化可以表示为： $E_{out} = E_{in} t(\rho)$ ，其中 $t(\rho)$ 为光学器件的透射率函数。波数 $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长。在底角 γ 较小的情况下，单个轴棱锥

的透射率函数为： $t(\rho) = \exp[-ik(n-1)\gamma\rho]$ ；凸透镜的透射率函数为： $t(\rho) = \exp(-ik\rho^2/2f)$ ， f 为透镜焦距。

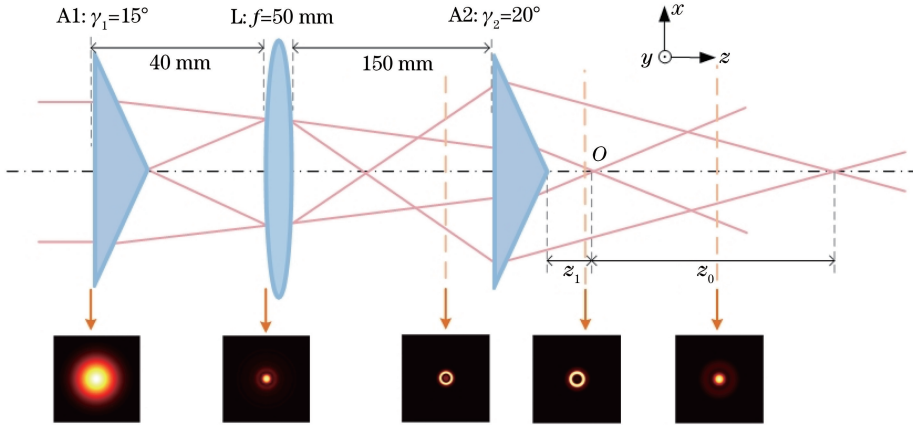


图 2 设计的透镜组结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of designed lens group

角谱理论是指将复杂光场分解为沿不同方向传播的平面波，将空域问题转换为频域问题进行讨论。确定了观察平面光场的角谱后，再通过傅里叶逆变换还原出空域的波束场。波束场在平面 $z=0$ 处的傅里叶变换可表示为

$$A(f_x, f_y, 0) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \quad (1)$$

式中： $E(x, y, 0)$ 为 $z=0$ 平面的复振幅分布； f_x 和 f_y 分别为 x 与 y 方向上的空间频率。当传播至 z 处的平面时，光场复振幅分布 $E(x, y, z)$ 的傅里叶变换为

$$A(f_x, f_y, z) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y, z) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (2)$$

由角谱理论可得：

$$A(f_x, f_y, z) = A(f_x, f_y, 0) H(f_x, f_y), \quad (3)$$

式中： $H(f_x, f_y) = \exp[ikz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}]$ 表示间隔为 z 的两个面之间的传递函数。由(3)式可计算出 $A(f_x, f_y, z)$ ，对其进行傅里叶逆变换即可得到 z 平面处的光场分布：

$$E(x, y, z) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y, z) \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y. \quad (4)$$

根据以上理论体系，可以得到上述相位透镜组结构每个位置的场强分布。图 2 中的附图为几个典型位置处的波束横截面分布。从图 2 可以清晰地看出，入射到 A2 的波束为一个环状波束，出射的波束为一个收缩的环状波束，最终经过一段投射距离后转换为贝塞尔波束，O 点为贝塞尔波束的起点。

2.2 基于时域有限差分法的仿真分析

为了进一步验证该相位透镜组结构的功能，并确定后续的部分实验参数，采用时域有限差分(FDTD)方法进行仿真计算。其中，将频率为 0.1 THz 的准直高斯波束作为入射源，腰斑半径 $\omega_0 = 10$ mm。3 个相位器件直径均为 50.8 mm，A1 的底角 $\gamma_1 = 15^\circ$ ，L 的焦距 $f = 50$ mm，A2 的底角 $\gamma_2 = 20^\circ$ 。需要指出的是，这组参数是通过仿真最终优化的参数，其他参数已标注在图 2 中。仿真过程为逐步添加器件计算每个出射波束的场强分布，计算结果如图 3 所示。图 3(a) 所示为入射的准直波束经过轴棱锥 A1 后变换为一个标准的贝塞尔波束，紧贴 A1。这一贝塞尔波束的无衍射长度约为 60 mm。在该贝塞尔波束无衍射区域内放置透镜 L，出射波束依次经过聚焦、扩散后，即转换为一个扩束的环状波束。最后，将轴棱锥 A2 放置在环状波束区域，以获得最终的出射波束。从图 3(c) 可以清晰地看出，最终出射波束首先保持环状分布，随着距离增加开始收缩，经过一定传播距离后开始形成贝塞尔波束。

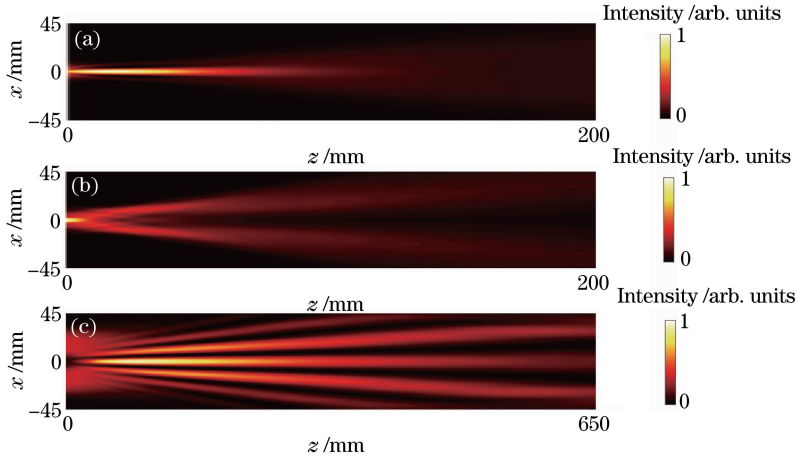


图 3 各器件后出射波束的仿真结果。(a)从 A1 出射的贝塞尔波束;(b)从 L 出射的环状波束;(c)从 A2 出射的贝塞尔波束
 Fig. 3 Simulation results of output beams after each device. (a) Bessel beam emerging from A1;
 (b) donut beam emerging from L; (c) Bessel beam emerging from A2

3 实验验证与讨论

根据上述理论与仿真结果,进一步采用实验验证该相位透镜组的功能。图 4 为本实验的装置示意图,太赫兹辐射源为单频耿氏二极管,频率为 0.1 THz,功率为 50 mW。采用一个焦距为 65.0 mm、直径为 50.8 mm 的聚甲基戊烯(TPX)透镜对辐射源出射波束

进行准直,获得光斑直径为 21 mm 的准直高斯波束 [图 5(a)],然后入射到 A1 上。太赫兹探测器为肖特基二极管,将其放置在三维平移台(x 、 y 、 z 轴的行程分别为 200 mm、200 mm 和 800 mm)上进行单点式探测,即在 x 、 y 、 z 三个方向对出射波束进行扫描。两个轴棱锥采用快速三维(3D)打印技术制备^[31],其成型材料在 0.1 THz 频段折射率为 1.648。

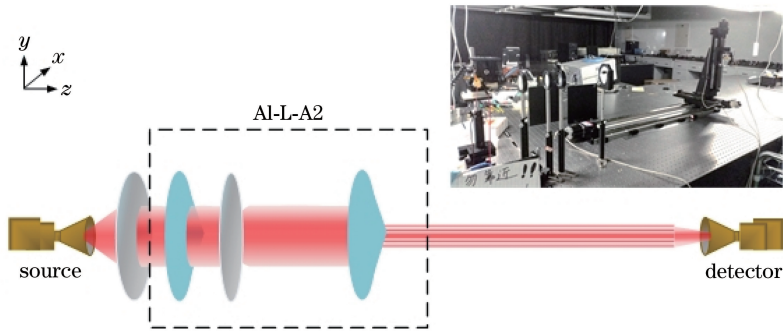


图 4 实验装置示意图
 Fig. 4 Schematic of experimental setup

首先对 A1 的出射波束进行表征。A1 的直径为 2 inch(1 inch=2.54 cm),底角 $\gamma_1 = 15^\circ$,放置在距离准直透镜 10 mm 处,其出射波束紧贴器件表面,分布如图 5(b)所示,虚线处截面分布为贝塞尔波束分布,主瓣直径约为 20 mm,无衍射长度约为 60 mm。

出的是,由于入射到 A2 上的光束为一个扩束的环状波束,为更好地收集入射波束功率,将 A2 的直径改为 3 inch。图 5(d)为最终出射的波束分布图,虚线截面清晰显示出其从 A2 出射后依然为一个环状波束,经过一段距离的传播后才演变为贝塞尔波束。相比于采用单轴棱锥法产生的贝塞尔波束 [图 5(b)],由轴棱锥-透镜-轴棱锥的相位透镜组产生的贝塞尔波束的无衍射距离更长,且具有一段投送距离。

将焦距 $f = 50$ mm、直径为 2 inch 的高密度聚乙烯(HDPE)透镜放置在贝塞尔波束无衍射区域内距离 A1 40 mm 处。图 5(c)为出射波束分布图,虚线截面显示其经过一段距离传输后形成一个环状波束,波束直径约为 40 mm。第二个轴棱锥 A2 放置在距离透镜 L 150 mm 处,其底角 $\gamma_2 = 20^\circ$ 。需要指

图 6 为整个透镜组结构出射的波束分布图, z 轴扫描范围为 1200 mm,由于使用的平移台行程只有 800 mm,因此图 6(a)中 x - z 平面的强度分布图

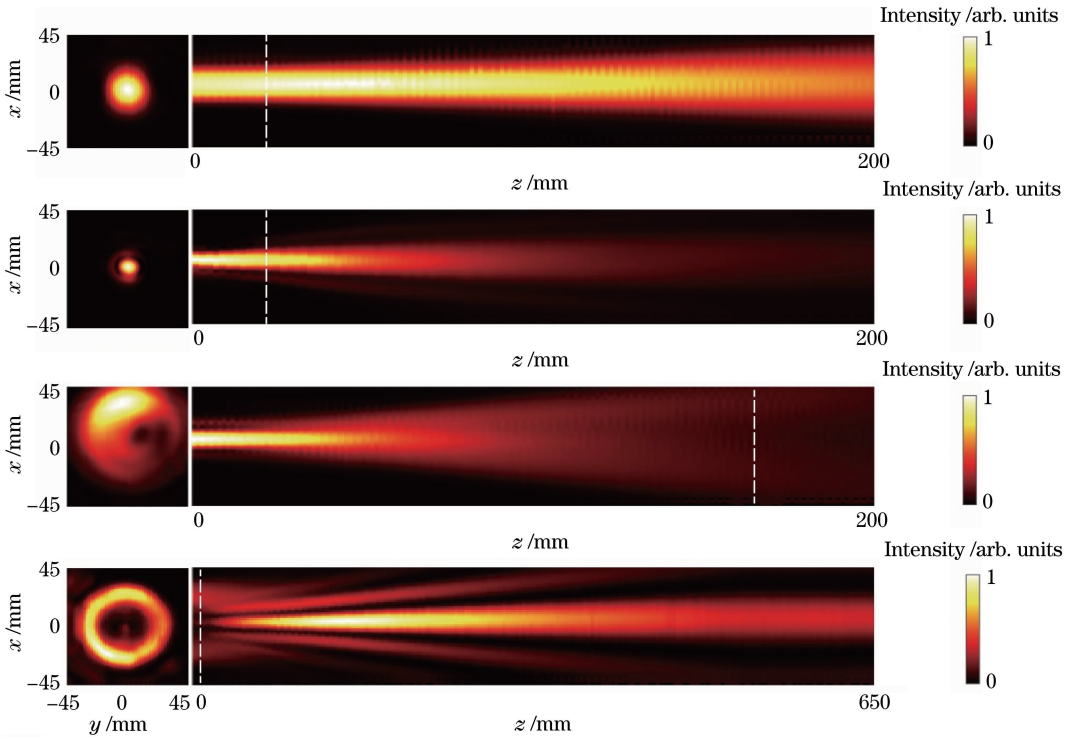


图 5 截面光斑图与光束传播图。(a)准直高斯波;(b)从 A1 出射的贝塞尔波束;
(c)从 L 出射的环状波束;(d)从 A2 出射的贝塞尔波束

Fig. 5 Sectional spots and beam propagation maps. (a) Collimating Gaussian beam; (b) Bessel beam emerging from A1;
(c) donut beam emerging from L; (d) final Bessel beam emerging from A2

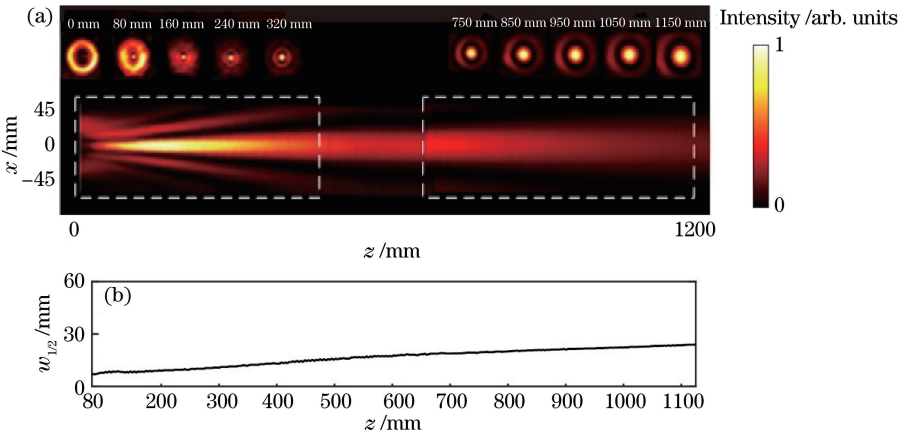


图 6 整个系统最终的效果。(a)光束传播图与截面光斑图;(b)半峰全宽曲线

Fig. 6 Final results of whole system. (a) Beam propagation map and sectional spots;
(b) curve of full width at half maximum

为两组数据拼接而成。由不同的截面图可以看出，从 A2 出射的波束为一个收缩的环状波束，经过接近 100 mm 的传输后，其中心主瓣开始显现，旁瓣变弱，随着距离的增长，最终形成贝塞尔波束。图 6 (b)为根据实验数据计算的出射贝塞尔波束的中心主瓣半峰全宽($w_{1/2}$)。从图 6(b)可以看出，出射波束的 $w_{1/2}$ 在接近 1000 mm 的范围内始终都小于 20 mm，没有发生非常明显的扩束行为，即在这一区

域内形成了无衍射波束。

4 结 论

为提高无衍射太赫兹贝塞尔波束的实用性，设计了一组含有两个轴棱锥的透镜组结构；基于角谱理论和 FDTD 方法，对该结构进行了原理性分析和模拟仿真计算；使用快速 3D 打印技术制备了不同底角的轴棱锥。利用构建的透镜组结构，在

0.1 THz波段获得一个具有 80 mm 投送距离的太赫兹贝塞尔波束,其无衍射区域长达 1000 mm。实验结果与理论仿真结果符合得很好。该工作可促进太赫兹无衍射波束在大景深成像方面的应用。

参 考 文 献

- [1] Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry M V, *et al.* Roadmap on structured light[J]. Journal of Optics, 2017, 19(1): 013001.
- [2] Turunen J, Friberg A T. Propagation-invariant optical fields [M] // Wolf E. Progress in Optics. Amsterdam: Elsevier, 2010, 54: 1-88.
- [3] Padgett M J. Orbital angular momentum 25 years on [Invited][J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11265-11274.
- [4] Won R. Structured light spiralling up [J]. Nature Photonics, 2017, 11(10): 619-622.
- [5] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [6] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496.
- [7] Wu P H, Huang W H. Theoretical analysis of quasi-Bessel beam for laser micromachining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(s1): s102002.
吴平辉, 黄文华. 准贝塞尔光束在激光微加工中的理论分析[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s102002.
- [8] McGloin D, Dholakia K. Bessel beams: diffraction in a new light [J]. Contemporary Physics, 2005, 46(1): 15-28.
- [9] 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.
- [10] Vettenburg T, Dalgarno H I C, Nylk J, *et al.* Light-sheet microscopy using an Airy beam [J]. Nature Methods, 2014, 11(5): 541-544.
- [11] Minovich A, Klein A E, Janunts N, *et al.* Generation and near-field imaging of Airy surface plasmons [J]. Physical Review Letters, 2011, 107(11): 116802.
- [12] Zhang P, Prakash J, Zhang Z, *et al.* Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2883-2885.
- [13] Durnin J, Miceli J J, Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [14] Gutiérrez-Vega J C, Iturbe-Castillo M D, Chávez-Cerda S. Alternative formulation for invariant optical fields: mathieu beams [J]. Optics Letters, 2000, 25(20): 1493-1495.
- [15] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C, Chávez-Cerda S. Parabolic nondiffracting optical wave fields [J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 44-46.
- [16] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-981.
- [17] Davis J A, Cottrell D M, Sand D. Abruptly autofocusing vortex beams [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13302-13310.
- [18] Scott G, McArdle N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. Optical Engineering, 1992, 31(12): 2640-2644.
- [19] Herman R M, Wiggins T A. High-efficiency diffractionless beams of constant size and intensity [J]. Applied Optics, 1994, 33(31): 7297-7306.
- [20] Turunen J, Vasara A, Friberg A T. Holographic generation of diffraction-free beams [J]. Applied Optics, 1988, 27(19): 3959-3962.
- [21] Vasara A, Turunen J, Friberg A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1989, 6(11): 1748-1754.
- [22] Chen W T, Khorasaninejad M, Zhu A Y, *et al.* Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces [J]. Light: Science & Applications, 2016, 6(5): e16259.
- [23] Chattapiban N, Rogers E A, Cofield D, *et al.* Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator [J]. Optics Letters, 2003, 28(22): 2183-2185.
- [24] Ni D D, Xie C, Zhao Z Y, *et al.* Bessel-like beams with the precisely controllable central lobe size [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0714001.
倪丹丹, 谢辰, 赵振宇, 等. 中心主瓣尺寸可精细调控的类贝塞尔光束 [J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0714001.
- [25] Liu X Q, Xue C X. Design of diffractive optical elements based on axicon and its light analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040501.
刘晓庆, 薛常喜. 基于轴棱锥的衍射光学元件设计及其光场分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040501.
- [26] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0814001.

- 闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0814001.
- [27] Lo Y H, Leonhardt R. Aspheric lenses for terahertz imaging[J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15991-15998.
- [28] Ok G, Park K, Lim M C, *et al.* 140-GHz subwavelength transmission imaging for foreign body inspection in food products [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 221: 124-131.
- [29] Busch S F, Town G E, Scheller M, *et al.* Focus free terahertz reflection imaging and tomography with Bessel beams [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36(3): 318-326.
- [30] Belyi V, Forbes A, Kazak N, *et al.* Bessel-like beams with z -dependent cone angles [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 1966-1973.
- [31] Zhang Z Q, Wei X L, Liu C M, *et al.* Rapid fabrication of terahertz lens via three-dimensional printing technology [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(2): 022201.