

双锥面轴棱锥产生长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束

余京京^{1,2,3}, 任姣姣^{1,2,3}, 张丹丹^{1,2,3}, 张霁旸^{1,2,3}, 薛竣文³, 李丽娟^{1,2,3}, 韩旭^{1,2*}¹长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;³长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400

摘要 为了克服传统轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束无衍射距离短的局限,设计了一种双锥面轴棱锥结构。基于几何光学理论对双锥面轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的原理进行了分析,并对太赫兹贝塞尔光束的无衍射特性和双锥面轴棱锥顶点对齐误差对无衍射特性的影响进行了理论和仿真计算分析。同时,采用透射式太赫兹时域光谱系统对双锥面轴棱锥的功能进行了实验验证。仿真和实验结果表明:太赫兹波经过锥面底角为 $\gamma_2=20^\circ$ 、 $\gamma_1=15^\circ$ 的双锥面轴棱锥后能够产生 110 mm 无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束,相较于传统轴棱锥,无衍射距离增加了 82.63 mm;无衍射距离随着锥形底面角度的增加而增大。

关键词 物理光学; 双锥面轴棱锥; 太赫兹贝塞尔光束; 无衍射距离; 太赫兹时域光谱系统

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221782

1 引言

太赫兹波是介于微波与红外之间,频率范围在 0.1~10.0 THz 内的电磁波,由于太赫兹波具有辐射能量低、指纹光谱丰富,以及对大部分非金属和非极性材料有很强的穿透性等特殊性质,故在无损检测^[1-2]、安全检查^[3]和生物检测^[4]等领域中都具有广阔的应用前景。近年来,随着太赫兹技术的发展,太赫兹特殊光束逐渐成为科研人员的研究热点,如贝塞尔光束^[5]、艾里光束^[6]和涡旋光束^[7]等,这些光束独特的衍射特性和光场分布能很好地弥补太赫兹技术在实际应用中存在的不足^[8]。

贝塞尔光束是最为典型的无衍射光束,其无衍射特性指的是贝塞尔光束的中心光斑在一定距离内并不会随着传播距离的变化而发生改变的大焦深特性^[9-10]。自 1987 年 Durnin 等^[11]首次使用环缝法获得贝塞尔光束以来,研究人员还探索出很多产生贝塞尔光束的方法,如轴棱锥法^[12]、计算机全息图法^[13]、球面像差法^[14]和空间调制器法等^[15]。其中,轴棱锥因元件结构简单、转换效率高等优点而被广泛用于太赫兹贝塞尔光束的产生。在入射太赫兹波半径固定的情况下,太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离与轴棱锥的底角和折射率成反比。目前用于制作太赫兹透镜的材料多为高密度聚乙

烯(HDPE),HDPE 的折射率随太赫兹波频率的变化量很小,所以多通过减小轴棱锥的底角来增大太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离,但小角度轴棱锥在加工过程中容易产生误差(轴棱锥非圆对称加工误差、轴棱锥透镜面形偏差等^[16-17]),这些误差会对太赫兹贝塞尔光束的质量造成影响。因此,传统轴棱锥在产生长无衍射距离太赫兹贝塞尔光束上存在一定的局限,限制了太赫兹贝塞尔光束在一些大焦深成像和无损检测等领域中的应用。

近年来,研究人员设计了多种结构来获取长无衍射距离的贝塞尔光束。刘亮等^[18]设计了由负轴棱锥、折射率匹配液和正轴棱锥组成的浸液式组合轴棱锥,通过对多种参数的调节可有效增大最大无衍射传输距离。刘志强等^[19]提出了一种由液晶材料制作的锥度可由电压调整的轴棱锥,在可见光波段下实现了大景深成像。上述文献所设计的光学元件均能获得长无衍射距离的贝塞尔光束,但大多集中在可见光领域。不少研究人员也在太赫兹波段对此开展了研究。Niu 等^[20]和 Wei 等^[21]以轴棱锥结构为基础设计了新型的衍射光学元件,并结合 3D 打印技术,产生任意阶的太赫兹贝塞尔光束。该光学元件适用于零阶贝塞尔光束的太赫兹成像系统和高阶贝塞尔光束的太赫兹通信系统,但结构相对于传统轴棱锥较为复杂。吴巧等^[22]提出了一

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2022-10-27; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 吉林省科技发展计划(20220508032RC)、中山市第二批社会公益和基础研究项目(2022B2012)

通信作者: *hanxu@cust.edu.cn

种轴棱锥-透镜-轴棱锥的相位透镜组结构,在 0.1 THz 波段处获得了具有约 100 mm 投送距离且无衍射长度接近 1 m 的太赫兹贝塞尔光束。类似地,Xiang 等^[23]也提出了一种由多个轴棱锥-透镜级联的结构,在 0.1 THz 波段处获得了具有 1 m 无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束。这两种结构均能产生米级无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束,但由于多个光学元件串联的透镜组合结构需要进行复杂的光路调试,故光能损耗也会增加。

本文设计了一种双锥面轴棱锥结构,该结构是通过将传统轴棱锥底面磨削成一个锥面而成的,结构简单且无需进行复杂的光路调试。通过几何光学和衍射光学理论对双锥面轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的原理和光场分布进行了分析,仿真模拟了不同锥面角度双锥面轴棱锥的光传输特性,并结合实验验证了该结构能产生长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束。

2 元件设计

双锥面轴棱锥是在传统轴棱锥结构的基础上加工而成的,以轴棱锥的轴线为中心,将底角为 20° 、折射率为 n 的轴棱锥底面磨削成底角为 γ_1 ($\gamma_1 < \gamma_2$) 的圆锥面,其结构和光路图如图 1 所示,其中 φ_2 为出射光束的折射角。为方便叙述,将磨削出的锥面定义为锥形底面,轴棱锥的锥面定义为锥形表面。经准直后半径为 R 的太赫兹波入射到双锥面轴棱锥中,经锥形底面折射后形成向轴外偏折的平行光束,折射角大小为 φ_1 ,然后经锥形表面折射在双锥面轴棱锥的前方并聚焦形成一段长度为 Z_{\max} 的菱形区域,该区域即为太赫兹贝塞尔光束的无衍射区域。

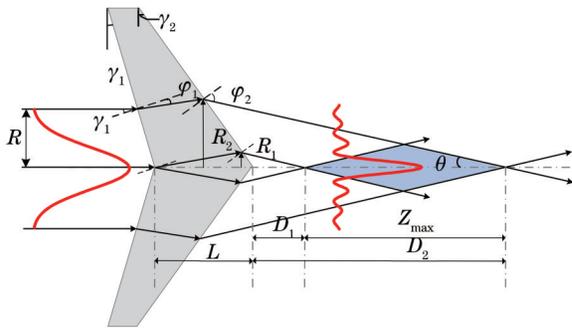


图 1 双锥面轴棱锥光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path of biconical axicon

平行入射的太赫兹波经双锥面轴棱锥折射后光路发生了偏折,根据光学折射定律,可得

$$\begin{cases} n_0 \sin \gamma_1 = n \sin \varphi_1 \\ n \sin(\gamma_2 - \gamma_1 + \varphi_1) = n_0 \sin(\gamma_2 + \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为出射光束与光轴之间夹角的大小; n_0 为空气折射率。近轴条件下有小角度近似,代入式(1)求解可得

$$\theta \approx (n - 1)(\gamma_2 - \gamma_1). \quad (2)$$

结合图 1 中的几何关系,可得

$$\begin{cases} D_1 = R_1 \left(\frac{1}{\tan \theta} - \tan \gamma_2 \right) \\ D_2 = R_2 \left(\frac{1}{\tan \theta} - \tan \gamma_2 \right) \\ R_1 = \frac{\tan(\gamma_1 - \varphi_1) L}{1 + \tan(\gamma_1 - \varphi_1) \tan \gamma_2} \\ R_2 \approx R_1 + R \end{cases}, \quad (3)$$

式中: L 为双锥面轴棱锥的中心最大厚度; D_1 、 D_2 分别为边缘光线与光轴的交点到顶点之间的距离; R_1 、 R_2 分别为锥形表面出射光线的出射高度。由此可得贝塞尔光束的无衍射距离 Z_{\max} 为

$$Z_{\max} = R \left(\frac{1}{\tan \theta} - \tan \gamma_2 \right) = \frac{R}{(n - 1)(\gamma_2 - \gamma_1)}. \quad (4)$$

由式(4)可知,双锥面轴棱锥产生的太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离 Z_{\max} 与入射太赫兹波半径 R 、双锥面轴棱锥的折射率 n 、锥形底面底角 γ_1 和锥形表面底角 γ_2 有关。

底角为 γ_2 的传统轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离为 $R/[(n - 1)\gamma_2]$,在 R 和 n 固定的情况下,多通过减小 γ_2 的大小来增大无衍射距离,底角 γ_2 越小的传统轴棱锥对加工技术和加工精度的要求越高,成本也越高。双锥面轴棱锥在底角 γ_2 固定的情况下,可通过增大锥形底面底角 γ_1 来获取具有更长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束。在无衍射距离大小固定的情况下,双锥面轴棱锥可通过采用较大的底角 γ_1 和 γ_2 来获得所需的太赫兹贝塞尔光束,较大的底角对加工技术和精度的要求相对较低。

3 理论仿真分析

通过对双锥面轴棱锥的几何光学分析可知,太赫兹波经双锥面轴棱锥后产生了一段距离为 Z_{\max} 的无衍射区域。为了进一步研究双锥面轴棱锥的功能,采用衍射积分理论对该结构进行理论分析,并结合有限时域差分法(FDTD)分析不同锥面角度和加工误差对太赫兹贝塞尔光束的影响。

3.1 窄带太赫兹光源

设入射单一频率的太赫兹波沿光轴 Z 方向传播,柱坐标系下广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式^[24]为

$$E_2(r_2) = -\frac{ik}{B} \exp(ikz) \int_0^R E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{B}\right) \times \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ar_1^2 + Dr_2^2)\right] r_1 dr_1, \quad (5)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为光束经光学元件前后的径向坐标; E_1 、 E_2 分别为源点和场点的复振幅; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,其中 λ 为波长; $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数。设太赫兹波在自由空间中传播的距离为 z 时对应的传输变换矩阵

为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 此时坐标 (r_2, z) 处的光场分布可

以表示为

$$E_2(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^R E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left(\frac{ikr_1^2}{2z}\right) r_1 dr_1 \quad (6)$$

入射半径为 R 的太赫兹波通过折射率为 n 、锥面底角为 γ_1 和 γ_2 的双锥面轴棱锥可被视为太赫兹波依次通过一个负轴棱锥和正轴棱锥。正轴棱锥的透过率函数为 $t_1(r) = \exp[ik(n-1)\gamma_1 r]$, 负轴棱锥的透过率函数为 $t_2(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma_2 r]$ ^[25], r 为正轴棱锥和负轴棱锥的径向坐标, 故双锥面轴棱锥的透过率函数可表示为

$$t(r) = t_1(r) \cdot t_2(r) = \begin{cases} \exp[-ik(n-1)(\gamma_2 - \gamma_1)r], & r \leq R \\ 0, & r > R \end{cases} \quad (7)$$

光波通过光学系统后的光场分布变化可表示为 $E_{out} = E_{in} \cdot t(r)$, 其中 E_{in} 和 E_{out} 分别为光学系统前后光场的复振幅。结合式(6)和式(7), 通过积分运算可得太赫兹波经双锥面轴棱锥后的光场分布 $E'_2(r_2, z)$ 为

$$E'_2(r_2, z) = -\frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr_2^2}{2z}\right) \int_0^R E_1(r_1) J_0\left(\frac{kr_1 r_2}{z}\right) \exp\left[\frac{ikr_1^2}{2z} - ik(n-1)(\gamma_2 - \gamma_1)r_1\right] r_1 dr_1 \quad (8)$$

以底角为 $\gamma_2 = 20^\circ$ 、 $\gamma_1 = 15^\circ$ 和折射率为 $n = 1.52$ 的双锥面轴棱锥为例, 由于实验中太赫兹光源的中心频率为 1.0 THz, 故取入射太赫兹波的频率为 1.0 THz, 入射太赫兹波的半径为 $R = 5$ mm。由式(8)模拟可得到太赫兹波沿光轴 Z 方向经过双锥面轴棱锥后在 $Y-Z$

平面上的强度分布(左侧图)和虚线处($z = 50$ mm)的横截面强度分布(右侧图), 如图 2 所示。从数值模拟结果可知, 太赫兹波经过双锥面轴棱锥后, 产生了具有无衍射特性的太赫兹贝塞尔光束, 无衍射距离为 $Z_{max} = 110.18$ mm, 符合式(4)的计算结果。

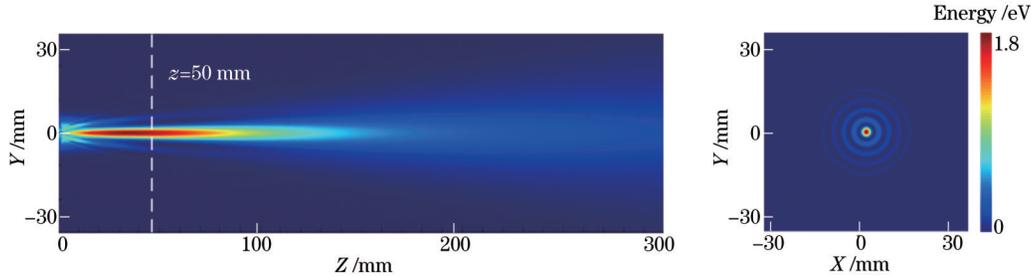


图 2 太赫兹波经过双锥面轴棱锥后的强度分布

Fig. 2 Intensity distribution of terahertz wave passing through biconical axicon

3.2 宽带太赫兹光源

通过对双锥面轴棱锥的原理性分析可知, 单一频率的太赫兹波经过双锥面轴棱锥后能产生具有无衍射特性的太赫兹贝塞尔光束。然而, 由于实验所使用的太赫兹源为宽带太赫兹源, 故为了进一步验证双锥面轴棱锥在宽带太赫兹光源下产生太赫兹贝塞尔光束的特性, 采用 FDTD 方法对该结构进行了仿真计算。需要说明的是, 这些参数是根据太赫兹时域光谱系统的实际参数进行设置的。在光源的设置中, 将实际测得的透射式太赫兹时域光谱系统的脉冲信号作为输入光源, 其有效频谱宽度为 0.2~2.5 THz, 如图 3 所示。同时, 设置入射太赫兹波半径为 $R = 5$ mm。

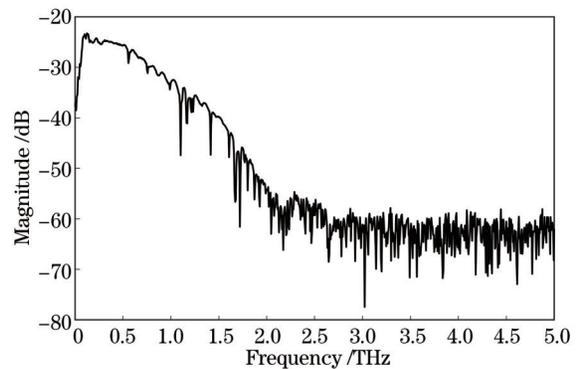


图 3 太赫兹时域光谱系统频谱图

Fig. 3 Spectrum of terahertz time-domain spectroscopy system
线, 如图 4 所示。可以发现, 在 0.2~2.5 THz 范围内 HDPE 的折射率数值为 1.52 ± 0.01 , 即折射率随太赫兹波频率的变化量很小。当折射率的变化量为 ± 0.01

时,太赫兹贝塞尔光束无衍射距离的变化为 4 mm,对实验中无衍射距离的影响并不大,也正是因为该材料的折射率在太赫兹波段中随频率的变化较小,现今大多数太赫兹透镜的材料都选用 HDPE。因此,仿真结构中将材料的折射率 n 设置为 1.52。

分别对底角为 20° 的传统轴棱锥和底角为 $\gamma_2 = 20^\circ$ 、 $\gamma_1 = 15^\circ$ 的双锥面轴棱锥进行仿真计算,仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 中太赫兹波通过传统轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离 Z_{\max} 为 27.55 mm,图 5(b) 在相同参数条件下,双锥面轴棱锥能产生无衍射距离可达 110.18 mm 的太赫兹贝塞尔光束,相比传统轴棱锥,无衍射距离拓宽了 82.63 mm,由仿真结果可知,双锥面轴棱锥能产生比传统轴棱锥更长无衍射距

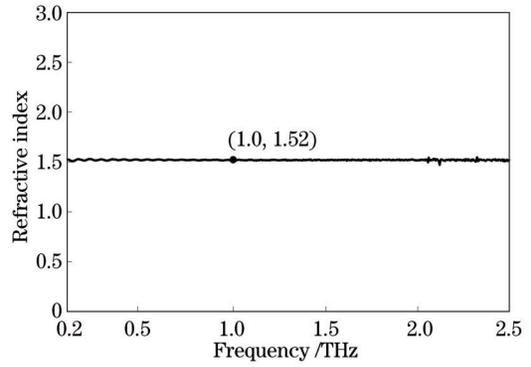


图 4 HDPE 折射率曲线
Fig. 4 Refractive index curve of HDPE

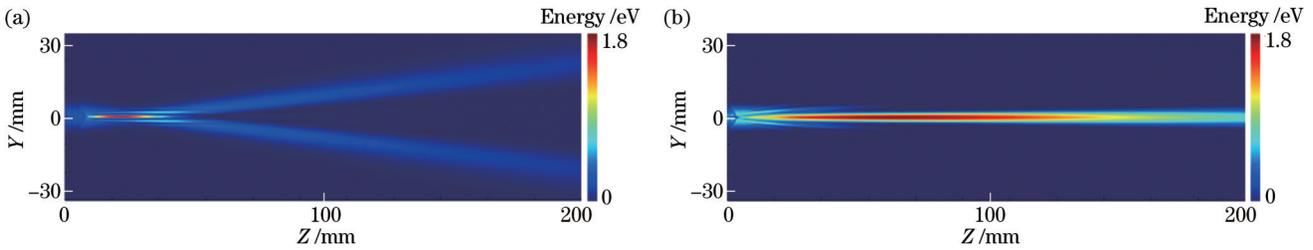


图 5 不同轴棱锥的仿真结果。(a)传统轴棱锥;(b)双锥面轴棱锥
Fig. 5 Simulation results of different axicons. (a) Traditional axicon; (b) biconical axicon

3.3 不同锥形底面角度

保持双锥面轴棱锥锥形表面角度为 $\gamma_2 = 20^\circ$ 不变,改变锥形底面角度 γ_1 的大小,分别取 10° 、 15° 、 18° ,其余参数条件不变,进行仿真计算,仿真结果如图 6 所示。当 γ_1 分别取 10° 、 15° 、 18° 时,太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离 Z_{\max} 分别为 55.09、110.18、275.46 mm,与底角

为 20° 的传统轴棱锥相比,太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离分别拓宽了 27.54、82.63、247.91 mm。由此可知,在底角 γ_2 固定的情况下,随着锥形底面角度 γ_1 的增大,双锥面轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离也在增加。

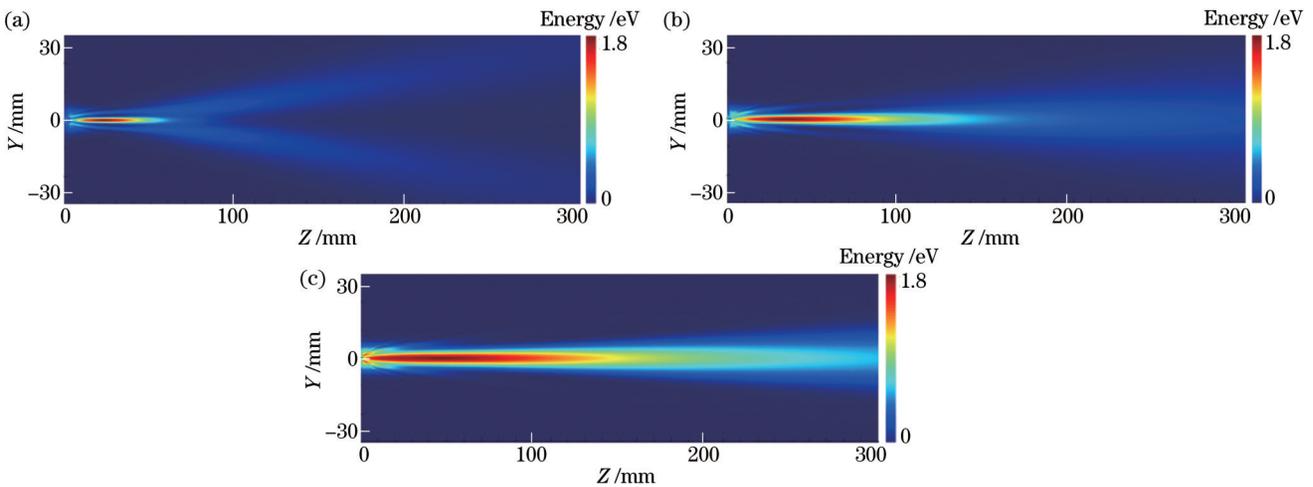


图 6 γ_1 大小不同的双锥面轴棱锥的仿真结果。(a) $\gamma_1 = 10^\circ$;(b) $\gamma_1 = 15^\circ$;(c) $\gamma_1 = 18^\circ$
Fig. 6 Simulation results of biconical axicons with different γ_1 . (a) $\gamma_1 = 10^\circ$; (b) $\gamma_1 = 15^\circ$; (c) $\gamma_1 = 18^\circ$

3.4 加工误差

双锥面轴棱锥是以轴棱锥的轴线为中心磨削加工而成的,在实际的加工过程中,可能会出现两锥面顶点

未理想对齐和两锥面对称轴之间存在夹角误差的情况。

当两锥面顶点未理想对齐时,即两锥面顶点存在

对齐误差时,图 7(a)、(b)分别给出了顶点对齐和顶点未对齐的双锥面轴棱锥的几何示意图,其中 l 为边缘厚度, a 为双锥面轴棱锥的底面半径。

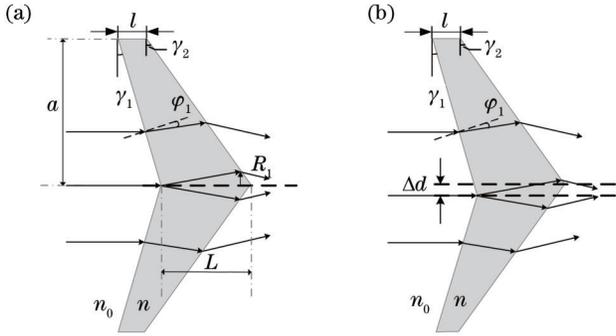


图 7 顶点对齐误差几何示意图。(a)顶点对齐;(b)顶点未对齐
Fig. 7 Geometric diagram of vertex alignment error. (a) Vertex alignment; (b) vertex unalignment

在图 7(b)中,锥形底面顶点相对于锥形表面顶点的偏移量 Δd 即为顶点对齐误差的大小。由 7 图中的几何关系可得: $\Delta d=0$ 对应于双锥面轴棱锥两锥面顶点理想对齐,此时不存在顶点对齐误差;当 $\Delta d \leq R_1$ 时,从锥形底面顶点上方入射的光线经折射后仍然从锥形

表面顶点上方出射,光路并未发生改变;当 $\Delta d > R_1$ 时,从锥形底面顶点上方入射的光线经折射后部分光线从锥形表面顶点下方出射,光路出现偏折。然而,存在顶点对齐误差的双锥面轴棱锥两锥面底角角度大小并未发生改变,故理论上存在顶点对齐误差的双锥面轴棱锥并不会对产生太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离产生影响。

为了研究顶点对齐误差对太赫兹贝塞尔光束传输特性的影响,对不同 Δd 大小的双锥面轴棱锥进行仿真计算分析。以底角为 $\gamma_2=20^\circ$ 和 $\gamma_1=15^\circ$ 的双锥面轴棱锥为例,双锥面轴棱锥的底面半径为 $a=19\text{ mm}$ 、边缘厚度为 $l=2\text{ mm}$ 、折射率为 $n=1.52$,入射太赫兹波的半径为 $R=5\text{ mm}$ 。将这些参数数值代入式(3)即可求得此时出射光线的投射高度为 $R_1 \approx 0.29\text{ mm}$ 。

取 Δd 为 0、0.2、1.0 mm 三种不同的顶点对齐误差进行仿真计算,不同 Δd 大小的双锥面轴棱锥产生的太赫兹贝塞尔光束在 $Y-Z$ 平面上的强度分布如图 8 所示。从仿真结果可知,三种双锥面轴棱锥均能产生无衍射距离为 110.18 mm 的太赫兹贝塞尔光束,与理论分析结果相符。

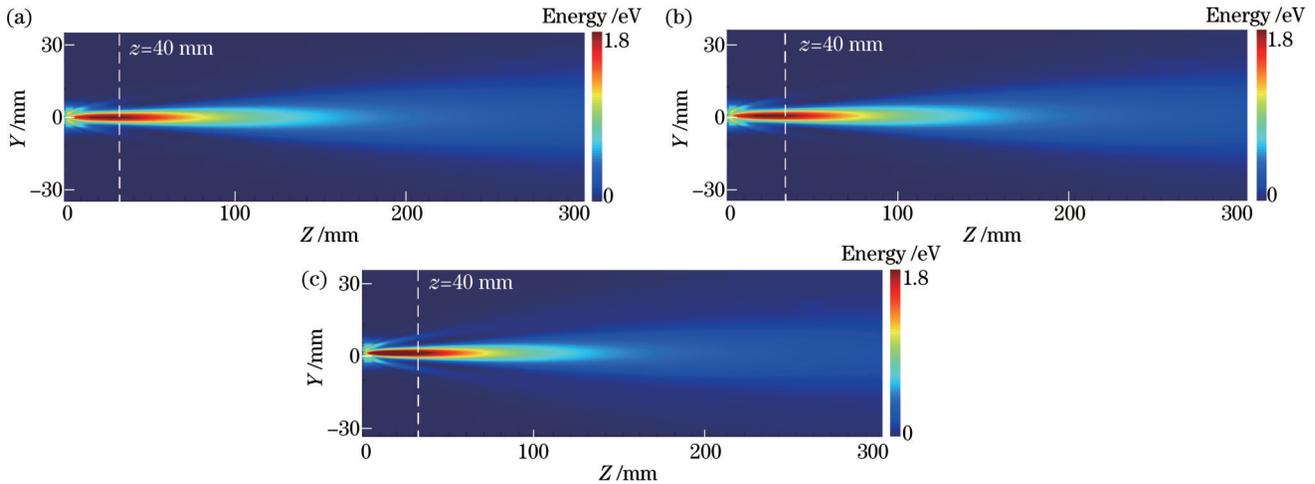


图 8 不同顶点对齐误差的仿真结果。(a) $\Delta d=0$ 时的强度分布;(b) $\Delta d=0.2\text{ mm}$ 时的强度分布;(c) $\Delta d=1.0\text{ mm}$ 时的强度分布
Fig. 8 Simulation results of different vertex alignment errors. (a) Intensity distribution of $\Delta d=0$; (b) intensity distribution of $\Delta d=0.2\text{ mm}$; (c) intensity distribution of $\Delta d=1.0\text{ mm}$

图 9 为太赫兹贝塞尔光束在 $z=40\text{ mm}$ (图 8 中的白色虚线)处的强度分布曲线。图中 $\Delta d=0$ 和 $\Delta d=0.2\text{ mm}$ 的强度分布曲线完全重合,而 $\Delta d=1.0\text{ mm}$ 时,主瓣周围的旁瓣能量增大了 0.12。由仿真结果可知,虽然顶点对齐误差的存在使得能量分布发生了改变,但是中心光斑的大小并未发生变化,造成光场强度分布差异的主要原因是顶点对齐误差使部分光线的光路发生了改变,能量在主瓣周围产生了叠加,旁瓣能量得到了增加。

通过对仿真结果的分析可知:当 $\Delta d \leq R_1$ 时,双锥面轴棱锥产生太赫兹贝塞尔光束的传输特性不受顶点

对齐误差的影响,均能产生高质量的太赫兹贝塞尔光束;当 $\Delta d > R_1$ 时,太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离和中心光斑尺寸保持不变,但旁瓣的能量会随着 Δd 的增大而增大,顶点对齐误差的值过大会使得旁瓣的能量过高,进而影响成像系统的分辨率。

当两锥面对称轴之间存在夹角误差时,两锥面之间的底角差会随着两锥面对称轴之间偏离的夹角和底面方位角的变化而变化。两锥面对称轴之间的夹角误差会使太赫兹贝塞尔光束的光场分布发生畸变,对称性被破坏,衍射光斑沿径向被一分为二并分离。同时,这种分离程度会随着两锥面对称轴之间夹角的增大而

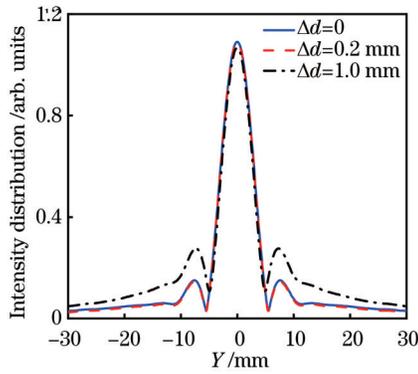


图 9 太赫兹贝塞尔光束在 $z=40$ mm 处的强度分布曲线

Fig. 9 Intensity distribution curves of terahertz Bessel beam at $z=40$ mm

增大:当两锥面对称轴之间的夹角为 $\beta > 1^\circ$ 时,贝塞尔光束的中心光斑便会产生较为明显的对半分现象;当两锥面对称轴之间的夹角为 $\beta = 3^\circ$ 时,衍射光斑几乎完全对半分^[26]。因此,在生产加工中,为避免两锥面对称轴之间夹角偏移过大对太赫兹贝塞尔光束质量造成严重影响,需对夹角 β 进行严格控制,实际加工过程中的夹角误差应当控制在 0.5° 以内。

4 实 验

根据上述理论和仿真结果可知,双锥面轴棱锥可以很好地拓宽太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离。为了进一步验证双锥面轴棱锥结构的功能,对该结构进行了实验验证。搭建了透射式太赫兹时域光谱系统,其光路示意图如图 10(a)所示,其中 RX 和 TX 为太赫兹接收器和发射器。所采用的激光器为锁模钛蓝宝石飞秒激光器,产生的光脉冲中心波长为 1560 nm、重复频

率为 80 MHz、脉冲宽度为 100 fs,太赫兹接收器为 TERA15-RX-FC 探测器,光功率为 20 mW,偶极子间距为 $10 \mu\text{m}$,系统的探测频谱宽度为 0.2~2.5 THz,频谱分辨率为 3.1 GHz,信噪比大于 50 dB。系统工作原理为:飞秒激光器发出的激光脉冲经过分束器后被分为泵浦光和探测光,泵浦光经过频率为 1.11 kHz 的斩波器斩波后照射在 InAs 晶片表面,进而激发产生太赫兹波;探测光经光电导取样测量获得具有时间分辨率的太赫兹光谱信息。将双锥面轴棱锥固定在太赫兹发射器上,太赫兹发射器固定于位移平台上,从太赫兹发射器出射的太赫兹波经过双锥面轴棱锥,出射波束经过光阑由太赫兹接收器接收,太赫兹接收器固定于二维扫描平台上,通过电脑控制其移动来采集纵向平面上的光强数据。双锥面轴棱锥的结构参数如表 1 所示。

实验中设置二维扫描平台沿 X 轴的扫描范围为 $-30 \sim 30$ mm,沿 Y 轴的扫描范围为 $-30 \sim 30$ mm,扫描步距为 0.5 mm,即扫描的每个横截面尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,每个横截面包含的波形数据量为 120×120 。固定在位移平台上的太赫兹发射器沿 Z 轴平移,移动范围为 $31 \sim 200$ mm,以 1 mm 为间隔扫描一次。需要说明的是,受到实验装置的限制,同时也为了确保实验器件之间不发生碰撞,双锥面轴棱锥与太赫兹接收器之间需要保证有一段 30 mm 的安全距离,故无法对 $0 \sim 30$ mm 范围内横截面的光强数据进行采集。实验扫描了沿 Z 轴方向的 170 个横截面,总共采集了 $120 \times 120 \times 170$ 个波形数据,再将这些数据导入计算机中,通过对每个位置处波形强度的计算分析得到了如图 11 所示的实验结果。

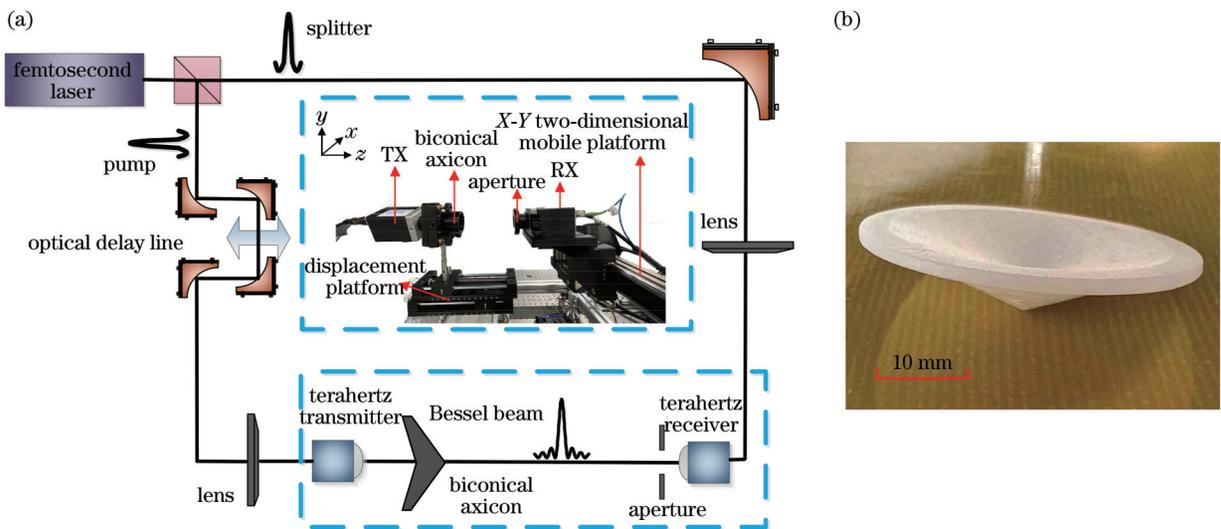


图 10 实验装置图。(a)太赫兹时域光谱系统光路示意图;(b)双锥面轴棱锥

Fig. 10 Experimental setup. (a) Schematic diagram of optical path of terahertz time-domain spectroscopy system; (b) biconical axicon

图 11 为实验得到的太赫兹波经过双锥面轴棱锥后出射波束在 Y-Z 平面上的强度分布,以及出射波束

分别在 $z=40$ mm、 $z=60$ mm、 $z=80$ mm、 $z=100$ mm 和 $z=120$ mm 处在 X-Y 平面上的横截面强度分布。

表 1 双锥面轴棱锥结构参数
Table 1 Structural parameters of biconical axicon

Structural parameter	Description
Conical bottom angle $\gamma_1 / (^\circ)$	15
Conical surface bottom angle $\gamma_2 / (^\circ)$	20
Radius a / mm	19
Material	HDPE
Refractive index n	1.52 ± 0.01 (0.2-2.5 THz)
Transmittance / %	>96 (0.2-2.5 THz)
Deviation error of symmetry axis $\beta / (^\circ)$	<0.5
Vertex alignment error $\Delta d / \text{mm}$	<0.2
Surface flatness / μm	<0.01
Dimensional tolerance / mm	± 0.25
Angular tolerance / $(^\circ)$	± 0.1

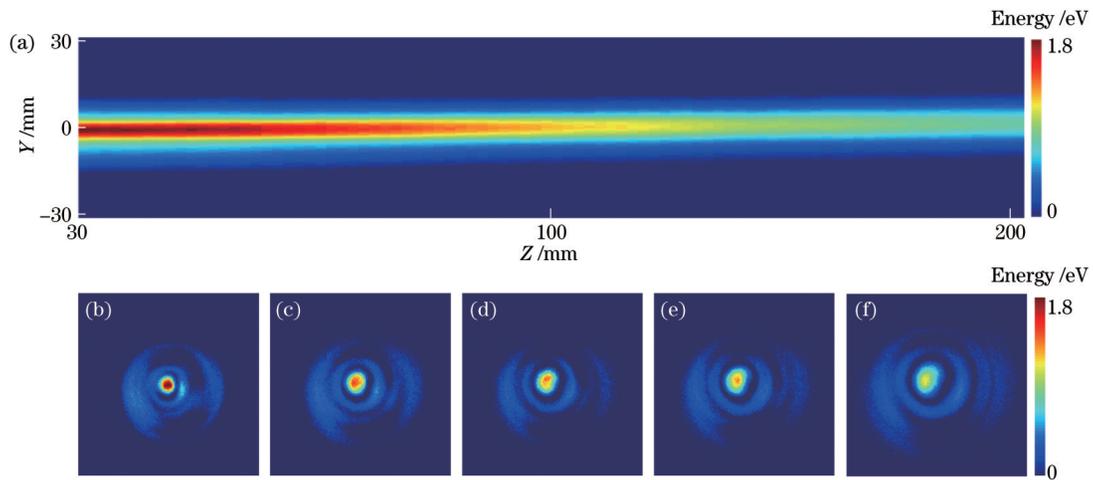


图 11 实验产生的太赫兹贝塞尔光束的强度分布图。(a) Y-Z 平面上的光强分布；(b) $z=40 \text{ mm}$ 处 X-Y 平面上的横截面强度分布；(c) $z=60 \text{ mm}$ 处 X-Y 平面上的横截面强度分布；(d) $z=80 \text{ mm}$ 处 X-Y 平面上的横截面强度分布；(e) $z=100 \text{ mm}$ 处 X-Y 平面上的横截面强度分布；(f) $z=120 \text{ mm}$ 处 X-Y 平面上的横截面强度分布

Fig. 11 Intensity distribution of generated terahertz Bessel beam in experiment. (a) Intensity distribution on Y-Z plane; (b) cross-sectional strength distribution on X-Y plane at $z=40 \text{ mm}$; (c) cross-sectional strength distribution on X-Y plane at $z=60 \text{ mm}$; (d) cross-sectional strength distribution on X-Y plane at $z=80 \text{ mm}$; (e) cross-sectional strength distribution on X-Y plane at $z=100 \text{ mm}$; (f) cross-sectional strength distribution on X-Y plane at $z=120 \text{ mm}$

由实验结果可知,太赫兹波经过双锥面轴棱锥后出射波束的光斑半径在 110 mm 范围内都小于 5 mm,没有明显的扩束现象,即在 110 mm 范围内形成了具有无衍射特性的太赫兹贝塞尔光束,与仿真计算结果相符。同时,从 X-Y 平面内的横截面强度分布可以看出,太赫兹贝塞尔光束主瓣和旁瓣的分布与仿真结果有着相同的分布规律,但旁瓣清晰度不如仿真结果,经分析认为导致该现象出现的原因:当使用二维扫描平台对横截面光强数据进行采集时,X 方向和 Y 方向的步进距离均设置为 0.5 mm,而在仿真模型的设置中,为了得到精确结果,将 X 方向和 Y 方向的步进距离均设置为 0.01 mm,由于实验中设置的沿 X 方向和 Y 方向的步进距离都远大于仿真模型,故实验分辨率会远小于仿真结果;与仿真中的理想介质不同,实验环境中的湿

度较大,太赫兹波会被空气中的水蒸气吸收,从而导致实验结果的信噪比降低,清晰度下降。

为研究双锥面轴棱锥对脉冲太赫兹时域波形的影响,分别取未安装双锥面轴棱锥时在 $z=60 \text{ mm}$ 处光斑中心的太赫兹时域波形,以及安装双锥面轴棱锥后在 $z=40 \text{ mm}$ 、 $z=60 \text{ mm}$ 、 $z=80 \text{ mm}$ 、 $z=100 \text{ mm}$ 和 $z=120 \text{ mm}$ 处光斑中心的太赫兹时域波形进行对比分析。图 12 中虚线为未安装双锥面轴棱锥时 $z=60 \text{ mm}$ 处的太赫兹时域波形。 $z=40 \text{ mm}$ 、 $z=60 \text{ mm}$ 、 $z=80 \text{ mm}$ 和 $z=100 \text{ mm}$ 的曲线为太赫兹贝塞尔光束无衍射区域内在 Z 轴不同位置处光斑中心的太赫兹时域波形, $z=120 \text{ mm}$ 的曲线为无衍射区域外的太赫兹时域波形。

在 $z=60 \text{ mm}$ 处,未安装双锥面轴棱锥时太赫兹时域波形的峰峰值为 0.1294,安装双锥面轴棱锥后太赫

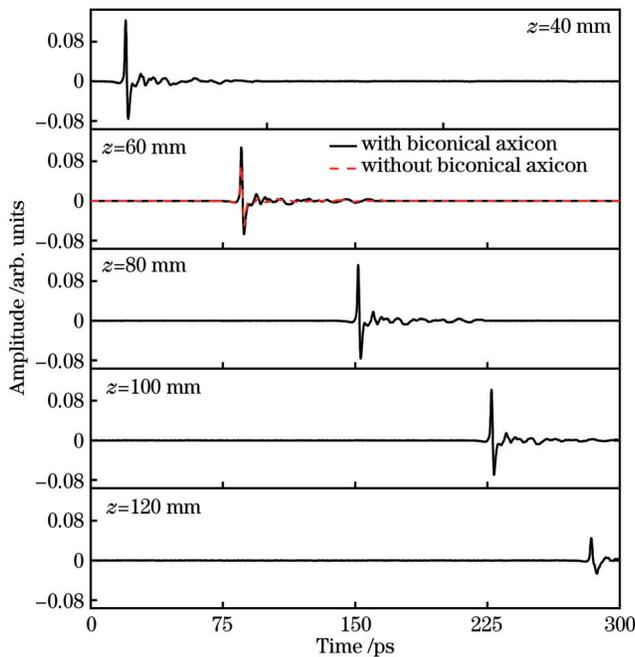


图 12 太赫兹波经双锥面轴棱锥后不同位置处的太赫兹时域波形

Fig. 12 Terahertz time domain waveforms at different positions after terahertz wave passing through biconical axicon

兹时域波形的峰峰值为 0.1907。由此可见,在安装双锥面轴棱锥后,太赫兹时域波形的峰峰值增大了约 47.4%。在无衍射区域内,太赫兹时域波形的峰峰值在 $z=40$ mm、 $z=60$ mm、 $z=80$ mm、 $z=100$ mm 处分别为 0.2013、0.1951、0.1927、0.1906,峰峰值最大变化量为 0.0107,即,在无衍射距离内峰峰值变化很小。位于 $z=120$ mm 位置处的时域波形的峰峰值为 0.0835,相较于 100 mm 处的峰峰值,能量降低了约 56.2%。由此可知,脉冲太赫兹波经过双锥面轴棱锥后,由于双锥面轴棱锥对太赫兹波的会聚作用,故时域波形的幅值显著提高,且,在无衍射距离内太赫兹贝塞尔光束表现出很好的无衍射特性。研究表明,双锥面轴棱锥能拓宽无衍射距离,产生具有长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束。

5 结 论

设计了一种能够产生更长无衍射距离太赫兹贝塞尔光束的双锥面轴棱锥结构。基于几何光学理论分析其产生太赫兹贝塞尔光束的机理,结合衍射理论推导了产生太赫兹贝塞尔光束的光场分布表达式,并对无衍射光束的传输特性和加工误差对传输特性的影响进行了仿真计算分析。仿真结果表明,相较于传统轴棱锥,双锥面轴棱锥能够产生具有更长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束,无衍射距离随着锥形底面底角的增加而增大,并且顶点对齐误差不超过 0.2 mm 时并不会对太赫兹贝塞尔光束的无衍射距离产生影响。同时,搭建了透射式太赫兹时域光谱系统来验证双锥面

轴棱锥的功能,使用底角为 $\gamma_2=20^\circ$ 、 $\gamma_1=15^\circ$ 的双锥面轴棱锥产生了具有 110 mm 无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束,相比于传统轴棱锥,无衍射距离拓宽了 82.63 mm,实验结果和理论仿真结果相符。研究结果表明,双锥面轴棱锥能够产生长无衍射距离的太赫兹贝塞尔光束,提高太赫兹贝塞尔光束在太赫兹无损检测中的实用性。

参 考 文 献

- [1] Tokizane Y, Yamaguchi T, Minamikawa T, et al. Ultralow-frequency ultranarrow-bandwidth coherent terahertz imaging for nondestructive testing of mortar material[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 4392-4401.
- [2] 王奇书, 牟达, 周桐宇, 等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1712003.
Wang Q S, Mu D, Zhou T Y, et al. Terahertz nondestructive test of delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1712003.
- [3] Takida Y, Nawata K, Minamide H. Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2529-2537.
- [4] 王与焯, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0711001.
Wang Y Y, Jiang B Z, Xu D G, et al. Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0711001.
- [5] Vicente O C, Caloz C. Bessel beams: a unified and extended perspective[J]. *Optica*, 2021, 8(4): 451-457.
- [6] Hao W M, Wang J, Chen L. Compact broadband silicon-integrated Airy beam emitter[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4084-4087.
- [7] Wang Z, Yuan Z, Gao Y, et al. Twin curvilinear vortex beams [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 14112-14125.
- [8] 李鹤婷, 王新柯, 张岩. 太赫兹特殊光束的研究与应用[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614007.
Li H T, Wang X K, Zhang Y. Study and applications of terahertz special beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614007.
- [9] Li F J, Wang S, Li X P, et al. Perfect diffractive circular metagrating for Bessel beam transformation[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(6): 1375-1378.
- [10] Xiang F D, Yu M, Zhang M T, et al. Terahertz ptychography using a long-distance diffraction-free beam as the probe[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 238-241.
- [11] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [12] Scott G, McArdle N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(12): 2640-2643.
- [13] Lu Y, Jiang B, Lü S C, et al. Arrays of Gaussian vortex, Bessel and Airy beams by computer-generated hologram[J]. *Optics Communications*, 2016, 363: 85-90.
- [14] Chen W T, Khorasaninejad M, Zhu A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(5): e16259.
- [15] Yuan J P, Wang X W, Wang L R, et al. Tunable high-order Bessel-like beam generation based on cross-phase modulation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 15978-15985.
- [16] 曾夏辉, 吴逢铁, 邢笑雪, 等. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞尔光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, 33(6): 809-813.
Zeng X H, Wu F T, Xing X X, et al. Influence of manufacture error with non-circular symmetry in an axicon on the Bessel

- beams quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(6): 809-813.
- [17] 杨贵洋, 马国鹭, 曾国英. 轴棱锥透镜面形偏差对无衍射光束传播特性的影响[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0126002.
Yang G Y, Ma G L, Zeng G Y. Influence of the surface deviation axicon on the propagation characteristics of non-diffracting beam[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(1): 0126002.
- [18] 刘亮, 黄秀军, 徐红艳, 等. 浸液式组合轴棱锥产生长距离无衍射贝塞尔光束[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1114001.
Liu L, Huang X J, Xu H Y, et al. Generating long-distance nondiffracting Bessel beams with liquid-immersion composite-axicon[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1114001.
- [19] 刘志强, 胡铁瑶, 叶茂. 液晶轴棱锥[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0823001.
Liu Z Q, Hu Y Y, Ye M. Liquid crystal axicon[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0823001.
- [20] Niu L T, Wang K J, Yang Y Q, et al. Diffractive elements for zero-order Bessel beam generation with application in the terahertz reflection imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 5900212.
- [21] 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.
- [22] 吴巧, 项飞获, 黄倩, 等. 长距离太赫兹无衍射波束的产生[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614024.
Wu Q, Xiang F D, Huang Q, et al. Generation of terahertz beams with long diffraction-free length[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614024.
- [23] Xiang F D, Liu D F, Xiao L, et al. Generation of a meter-scale THz diffraction-free beam based on multiple cascaded lens-axicon doublets: detailed analysis and experimental demonstration[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 36873-36883.
- [24] 吕百达. 激光光学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Lü B D. Laser optics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [25] 冯国英, 吕百达, 蔡邦维. 轴棱锥光学系统对激光束的变换及应用[J]. 激光技术, 1996, 20(3): 138-143.
Feng G Y, Lü B D, Cai B W. Transformation properties of laser beams passing through axicon system and their applications [J]. Laser Technology, 1996, 20(3): 138-143.
- [26] 胡润, 吴逢铁. 轴棱锥顶点离轴加工误差对贝塞尔光束的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1205002.
Hu R, Wu F T. Influence of axicon vertex off axis machining error on Bessel beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1205002.

Terahertz Bessel Beams with Long Non-Diffracting Distance Generated by Biconical Axicon

Yu Jingjing^{1,2,3}, Ren Jiaojiao^{1,2,3}, Zhang Dandan^{1,2,3}, Zhang Jiyang^{1,2,3}, Xue Junwen³,
Li Lijuan^{1,2,3}, Han Xu^{1,2*}

¹Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China

Abstract

Objective This study designs a biconical axicon to overcome the limitation of a short non-diffraction distance of terahertz Bessel beams generated by a traditional axicon. The traditional axicon is widely used to generate terahertz Bessel beams because of its simple structure and high conversion efficiency. However, when the radius of the incident terahertz wave is fixed, the non-diffracting distance of the terahertz Bessel beam is inversely proportional to the base angle and refractive index of the axicon. At present, the materials used to make terahertz lenses are mostly high-density polyethylene (HDPE), and the refractive index changes little with the frequency of the terahertz wave. Most studies increase the non-diffracting distance of terahertz Bessel beams by reducing the base angle of the axicon. However, the small-angle axicon is prone to produce errors in the processing process, which affects the quality of terahertz Bessel beams. Hence, the traditional axicon has certain limitations in generating terahertz Bessel beams with a long non-diffracting distance, which restricts the application of terahertz Bessel beams in some fields such as large depth-of-focus imaging and nondestructive testing. Therefore, on the basis of the traditional axicon, we design a biconical axicon with a simple structure, which does not require complex optical path adjustment to generate terahertz Bessel beams with a long non-diffracting distance.

Methods The theory of geometric optics is used to analyze the principle of generating terahertz Bessel beams by the biconical axicon and derives the expression of the non-diffracting distance of terahertz Bessel beams. Then, the optical field distribution of the terahertz wave after passing through the biconical axicon is analyzed with the integral theory of diffraction. The finite-difference time-domain method is employed to simulate and analyze the transmission characteristics of terahertz Bessel beams and the influence of different processing errors on the transmission characteristics. Finally, the

function of the biconical axicon is verified by the transmission terahertz time-domain spectroscopy system.

Results and Discussions By the finite-difference time-domain method, the traditional axicon with a base angle of 20° and the biconical axicon with base angles of $\gamma_2=20^\circ$ and $\gamma_1=15^\circ$ are simulated and calculated. The non-diffracting distance of the terahertz Bessel beams generated by the terahertz wave through the traditional axicon is 27.55 mm. Under the same parameter conditions, the biconical axicon can generate terahertz Bessel beams with a non-diffracting distance of 110.18 mm, namely that the non-diffracting distance is broadened by 82.63 mm (Fig. 5). The non-diffracting distance increases as the base angle of the biconical axicon grows (Fig. 6). Meanwhile, the simulations show that the vertex alignment error does not affect the non-diffracting distance of the terahertz Bessel beams when it does not exceed 0.2 mm (Fig. 8). The experimental results demonstrate that the terahertz Bessel beams with a non-diffracting distance of 110 mm can be generated by the terahertz wave through the biconical axicon with base angles of $\gamma_2=20^\circ$ and $\gamma_1=15^\circ$ (Fig. 11), which is consistent with the simulations.

Conclusions In this paper, a biconical axicon capable of generating terahertz Bessel beams with a long non-diffracting distance is designed. The theory of geometrical optics is used to analyze the generation mechanism of terahertz Bessel beams, and the diffraction theory is applied to derive the expression of the optical field distribution of terahertz Bessel beams. The transmission characteristics of non-diffracting beams and the influence of processing errors on transmission characteristics are simulated and analyzed. The simulations show that compared with the traditional axicon, the biconical axicon can generate terahertz Bessel beams with a longer non-diffracting distance. The non-diffracting distance increases with the rise in the base angle of the conical bottom surface, and the vertex alignment error does not affect the non-diffracting distance of the terahertz Bessel beams when it does not exceed 0.2 mm. Meanwhile, a transmission terahertz time-domain spectroscopy system is built to verify the function of the biconical axicon. The biconical axicon with base angles of $\gamma_2=20^\circ$ and $\gamma_1=15^\circ$ is used to generate terahertz Bessel beams with a non-diffracting distance of 110 mm. Compared with the case of the traditional axicon, the non-diffracting distance is broadened by 82.63 mm. The experimental results are consistent with the theoretical simulations. The results indicate that the biconical axicon can generate terahertz Bessel beams with a long non-diffracting distance, which improves the practicability of terahertz Bessel beams in terahertz nondestructive testing.

Key words physical optics; biconical axicon; terahertz Bessel beams; non-diffracting distance; terahertz time-domain spectroscopy system