

基于三维打印技术的太赫兹波段的柱透镜

张涵祎¹, 王可嘉¹, 张玉立¹, 叶曦², 刘劲松¹, 杨振刚², 汪盛烈¹

¹华中科技大学武汉光电国家实验室, 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 设计了一种工作在太赫兹波段的柱透镜, 并且使用三维(3D)打印技术制作出了样品。对样品进行了测试, 将测试结果与数值仿真结果以及商用太赫兹柱透镜的测试结果进行了对比。结果表明, 两种柱透镜的焦距均在 100 mm 左右, 与仿真结果相符, 且打印的柱透镜在不同传播距离下的光斑半峰全宽与商用柱透镜的很接近, 证明了 3D 打印技术可以用于制作太赫兹波段的柱透镜等光学器件。

关键词 激光技术; 太赫兹; 柱透镜; 3D 打印; 焦距

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.011415

Terahertz Cylindrical Lenses Based on Three-Dimensional Printing Technique

Zhang Hanyi¹, Wang Kejia¹, Zhang Yuli¹, Ye Xi², Liu Jinsong¹, Yang Zhengang², Wang Shenglie¹

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

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

Abstract A cylindrical lens working in the terahertz (THz) frequency range is designed and its sample is also fabricated by using the three-dimensional (3D) printing technique. A test on this sample is conducted. The comparison among the testing results, the simulation results, and the testing results of the commercial THz lenses is made. The results show that the focal lengths of two kinds of lenses are both about 100 mm, which matches with the simulation results. Moreover, under different propagation distances, the full widths at half maximum of spots for the printed lenses are very close to those for the commercial lenses, which proves that the 3D printing technique can be used in the fabrication of THz optical devices, such as cylindrical lenses.

Key words laser technique; terahertz; cylindrical lens; 3D printing; focal length

OCIS codes 140.3390; 300.6495; 220.3630; 050.6875

1 引言

太赫兹波频率为 0.1~10 THz, 波长为 0.03~3 mm, 其电磁波谱介于微波和红外光之间^[1-2], 兼有微波和红外光的部分特性, 在探测(包括无损检测和安全检测等)^[3-5]、成像^[6]、通信^[7-8]、生物医学^[9-10]等领域应用广泛, 并得到迅猛发展。

太赫兹技术各个领域的成熟应用不仅建立在

高效的太赫兹发射源和探测器的基础上, 而且也需要各类太赫兹无源器件的支持, 其中包括工作在太赫兹波段的光学器件, 如波导^[11-13]、反射器^[14-15]、分束器^[16-17]、波片^[18-20]和透镜^[21-23]等。大部分在光波段透明的传统透镜材料, 如玻璃等, 由于本征介电损耗太高而无法应用于太赫兹器件中。但某些聚合物材料对太赫兹波的透过性很好, 可以用于制作太赫兹透镜等器件, 比如高密度聚乙烯(HDPE)、聚四氟

收稿日期: 2017-08-14; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61475054, 11574105, 61405063)、湖北省科技条件资源开发项目(2015BCE052)

作者简介: 张涵祎(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹器件与系统方面的研究。E-mail: bluemess@foxmail.com

导师简介: 王可嘉(1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事太赫兹科学与技术方面的研究。

E-mail: wkjtoode@sina.com(通信联系人)

乙烯、聚丙烯,以及聚 4-甲基戊烯-1(TPX)等^[24],其中商用的太赫兹透镜有 HDPE 透镜、TPX 透镜和 Tsurupica 透镜等。

传统太赫兹器件的制作方法有数控加工、注塑等,需要进行磨削、抛光等操作,制作过程十分复杂,且耗时较长。近年来,新兴的三维(3D)打印技术以其极高的制作速度和精度而备受学者们的关注。3D 打印技术可以用于制作建筑模型^[25]、修复机械结构^[26]等,同时也可以用于制作光学器件,国外已经发表了许多关于基于 3D 打印技术制作太赫兹器件的文章^[27-30]。2015 年以来,国内研究者使用 3D 打印技术制作了太赫兹波段的平凸透镜^[31]和轴棱锥^[32]等器件,快速、高效地实现了对太赫兹波的聚焦、准直,以及贝塞尔太赫兹光束的产生,这对太赫兹波的探测、成像系统的搭建有重要意义。不同于传统的减式加工工艺,3D 打印技术通过逐层增加材料的方式来形成 3D 实体,属于增材制造,具有快速、直接、精度高等优点。

柱透镜是一种基本的光学器件,平行光经过正柱透镜后将会聚在一条焦线上。柱透镜可以用于拉伸图像,产生线光源,以及将入射的 HG(Herrmite-

Gaussian)模光束转换为 LG(Laguerre-Gaussian)模光束^[33]等,在许多太赫兹系统中有重要作用^[34-36]。本文设计了一种工作在太赫兹波段的柱透镜,并且使用 3D 打印技术制作出样品,在发射源频率为 100 GHz 的太赫兹点扫描系统中验证了该柱透镜的光学特性;在相同的实验条件下,测试了一种商用太赫兹柱透镜,将测试结果与打印出的器件进行了对比。

2 原理与仿真

常用的球面透镜是中心对称的,而柱透镜是轴对称的。柱透镜对入射平行光的作用和主截面光路如图 1 所示。柱透镜中垂直于圆柱轴线的截面称为主截面(面 $ABCD$ 和 $A'B'C'D'$),正柱透镜主截面内的平行光线会聚于 F 点,垂直于主截面的平面内的平行光不会发生会聚或发散,故柱透镜的作用是使入射平行光会聚于焦线 FF' 上,焦线长度等于柱透镜的通光高度。柱透镜的焦距^[37]为

$$f = \frac{R}{n-1}, \quad (1)$$

式中 f 为焦距, R 为柱透镜主截面的曲率半径, n 为柱透镜材料的折射率。

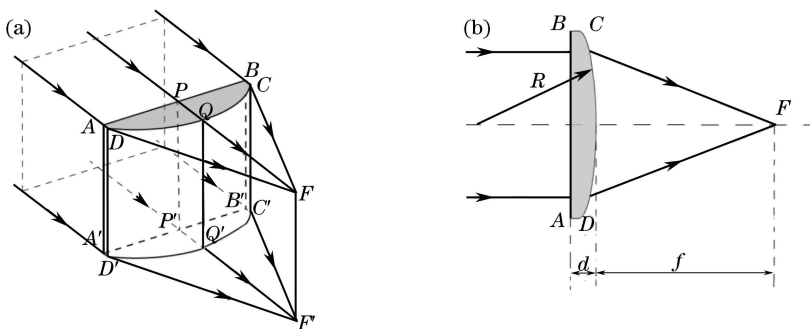


图 1 (a)柱透镜对入射平行光的作用;(b)主截面光路

Fig. 1 (a) Effect of cylindrical lens on incident parallel light; (b) light path at principal section

设计的柱透镜曲率半径为 65 mm,厚度为 9.34 mm,尺寸为 60 mm×60 mm。3D 打印柱透镜使用的材料在 100 GHz 下的折射率为 1.648,故由(1)式计算出的焦距为 100.3mm。

由于柱透镜具有轴对称性质,因此使用二维时域有限差分(FDTD)法分别对柱透镜的主截面 $ABCD$ 和垂直于主截面的平面 $PP'Q'Q$ 进行建模和数值计算,模拟其对入射光的作用。仿真时将入射光源设置为 100 GHz 的单频高斯光,束腰半径设置为 10 mm,束腰位置置于物方焦点附近;柱透镜所用材料的折射率设置为 1.648,柱透镜前表面(平坦表面)置于 $y=0$ mm 处(x 和 y 为模拟时用到的

坐标)。单频高斯光垂直入射于柱透镜的平坦折射面上,设置监视器,观察出射光场的强度分布。柱透镜会聚平行光的仿真结果如图 2 所示。图 2(a)、(c)分别为平面 $ABCD$ 和 $PP'Q'Q$ 内的光场强度分布,可以看出,在平面 $ABCD$ 内,柱透镜对入射光有明显的聚焦作用,在出射光束半径最小处, y 约为 100 mm;在平面 $PP'Q'Q$ 内,柱透镜对入射光没有聚焦作用。为了进一步分析其作用特性,图 2(b)、(d)分别给出了当 $x=0$ mm 时,在平面 $ABCD$ 和 $PP'Q'Q$ 内 y 方向上的光场强度变化,为了方便观察,对图中的光场强度进行了归一化处理。可以看出,在平面 $ABCD$ 内,随着 y 的增大,光强先

是不断增大,直至 $y = 102$ mm 时,达到最大值,然后逐渐减小;在平面 $PP'Q'Q$ 内,轴向光场强度则是不断减小。由应用光学知识可知,平凸透镜主平

面位于凸面中心处($y = 7.34$ mm)^[37],故仿真得到的柱透镜焦距为 94.66 mm,与理论值 100.3 mm 相近。

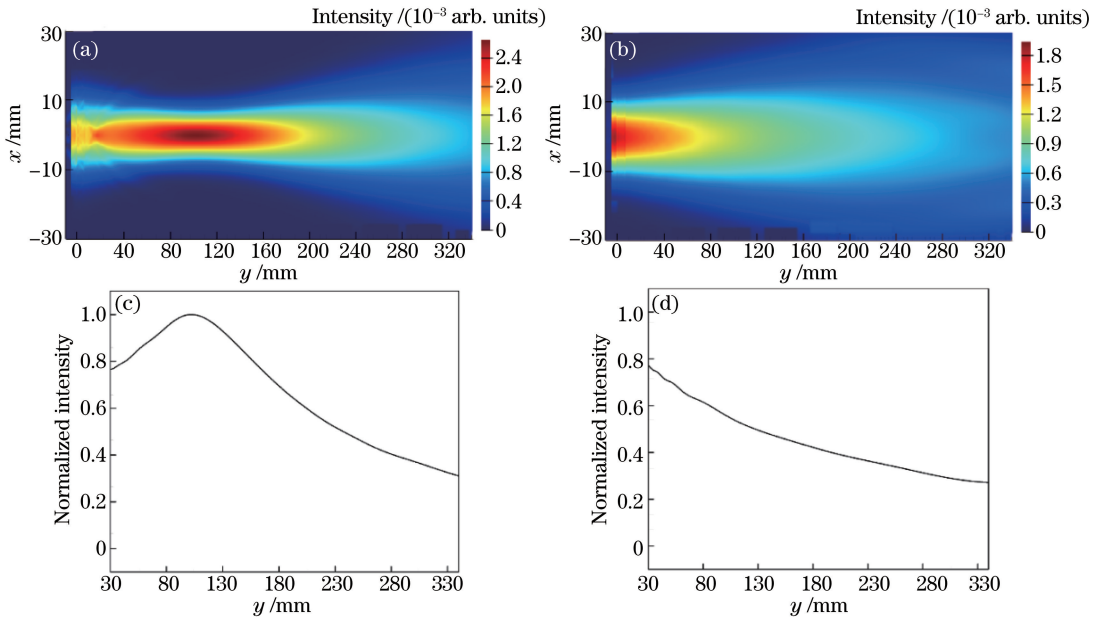


图2 柱透镜会聚平行光的仿真结果。(a)平面 $ABCD$ 和(b) $PP'Q'Q$ 内仿真的二维光场强度分布;
(c)平面 $ABCD$ 和(d) $PP'Q'Q$ 内的 y 轴方向上的光场强度

Fig. 2 Simulation results for cylindrical lens converging parallel light. Two-dimensional light field intensity distributions in (a) $ABCD$ and (b) $PP'Q'Q$ planes; light field intensity along y -direction in (c) $ABCD$ and (d) $PP'Q'Q$ planes

3 透镜制作与测试

采用以色列 Objet 公司生产的 Object30 型 3D 打印机制作太赫兹柱透镜。将设计好的三维模型文件转换为标准三角语言文件,并将其导入打印机的控制软件,然后对打印模式和材料进行相应的设置,就可以打印出所设计的结构。在打印之前,软件会自动对三维模型进行处理,按照最优化的方式确定打印实体的摆放取向。Object30 打印机采用 Object 公司推出的聚合物喷射技术来打印实体,在打印过程中,机器内置的程序首先根据设计的三维实体自动计算出成型材料和支撑材料的分布,并将三维实体沿 z 方向分为若干层,以进行逐层打印。接下来打印喷头在 x 方向和 y 方向上往返运动,逐层喷出光敏聚合物,在紫外光的作用下,光敏聚合物迅速固化堆积在工作台上。当一层的喷射和固化过程完成后,工作台就会沿 z 方向向下移动一层厚度的距离,然后进行下一层的作业,直至所有分层打印完毕,完成整个三维实体的制作。最后使用高压水流等方法去除打印好的实体上的支撑材料,剩余的成型材料不需要进行后续的固化操作就可以直接使用。Object30 型打印机在 x 、 y 、 z 方向上的精度分

别为 42.3, 42.3, 28 μm ,可以打印的最大实体尺寸为 294 mm \times 192 mm \times 148.6 mm,打印精度远小于低频太赫兹波的波长(1 THz 以下)。

使用太赫兹时域光谱系统测量成型材料 VeroWhite 材料在太赫兹波段的光学参数,得到其折射率为 1.648,吸收系数为 0.2 cm^{-1} ^[32]。使用该材料打印制作出的实体硬度和强度较高,且不易变形,在实际使用中能够满足太赫兹系统对器件的要求。

使用 SolidWorks 软件对柱透镜进行建模。柱透镜模型、3D 打印的柱透镜和商用柱透镜如图 3 所示,其中商用柱透镜的材料为 HDPE,其外形尺寸为 50 mm \times 50 mm,焦距为 100 mm。

使用三维太赫兹点扫描系统来测试 3D 打印柱透镜和 HDPE 商用柱透镜的聚焦性能,并与仿真结果进行对比。点扫描系统的发射源采用 100 GHz 耿氏振荡源,其发出的波束经一个焦距为 100 mm 的平凸透镜准直后,正入射在打印的柱透镜的平坦面上。探测器固定在三轴电控平移台上,可以在 x 、 y 、 z 三个方向上平移,从而完成三维逐点扫描,其中 x 、 y 方向的扫描范围为 90 mm \times 90 mm, z 方向的扫描范围为 60~140 mm,得到的结果为 5 个轴向传播距离下的 x - y 平面场分布。实验测得的 3D 打

印柱透镜和商用柱透镜在焦点附近 5 个不同位置处的光场强度分布如图 4 所示。可以看出,入射高斯光束在经过打印的柱透镜后,在 x 方向上先会聚再发散,在 y 方向上逐渐发散,这与仿真结果相符,因为入射的光束并不是完全准直的,有一定的发散角;商用 HDPE 柱透镜的二维光场分布和打印的柱透镜的类似,但是光斑形状较不规则,可能是由于商用 HDPE 柱透镜没有放置在与入射光束完全垂直的位置上。

图 5 所示为不同传播距离下两种柱透镜在 x

方向的半峰全宽和横截面光强最大值。可以看出,在 x 方向上,两种柱透镜都在 $z=100$ mm 处取得半峰全宽的最小值及横截面最大光强的最大值,故可以认为它们的焦距均在 100 mm 左右,这与理论计算和仿真结果十分接近。同时,经过 3D 打印柱透镜的光束在各个传播距离下的半峰全宽与经过 HDPE 柱透镜的十分接近,且前者略低;经过 3D 打印柱透镜的光束在各个传播距离下的最大光强要远小于经过 HDPE 柱透镜的。

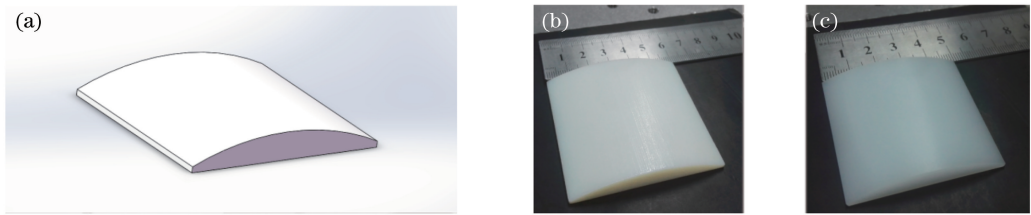


图 3 (a) 柱透镜模型; (b) 3D 打印的柱透镜; (c) 商用柱透镜

Fig. 3 (a) Cylindrical lens model; (b) 3D printed cylindrical lens; (c) commercial cylindrical lens

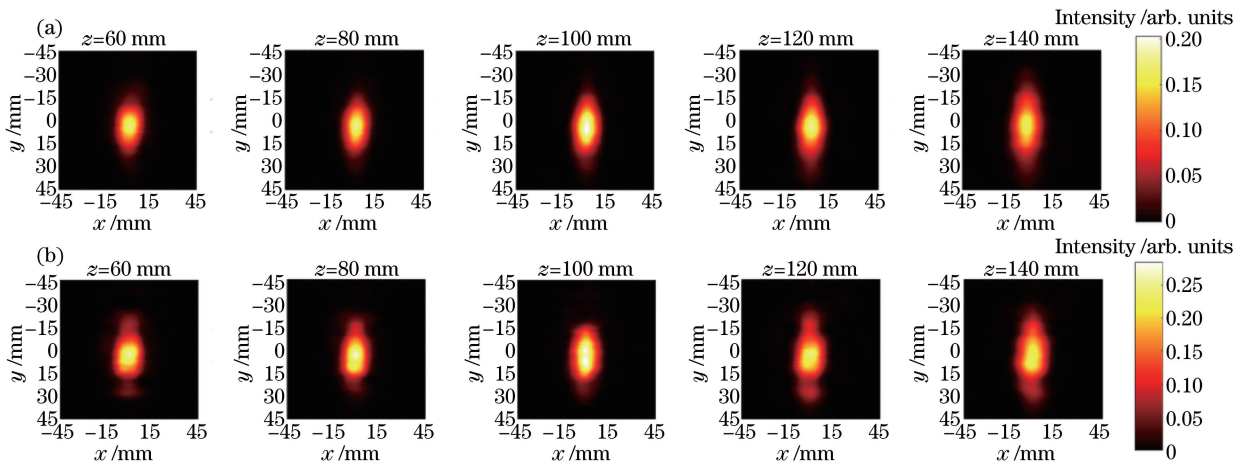


图 4 实验测得的在焦点附近 5 个不同位置处的光场强度分布。(a) 3D 打印柱透镜; (b) 商用柱透镜

Fig. 4 Light field intensity distributions at five different positions near focal point measured by experiment.

(a) 3D printed cylindrical lens; (b) commercial lens

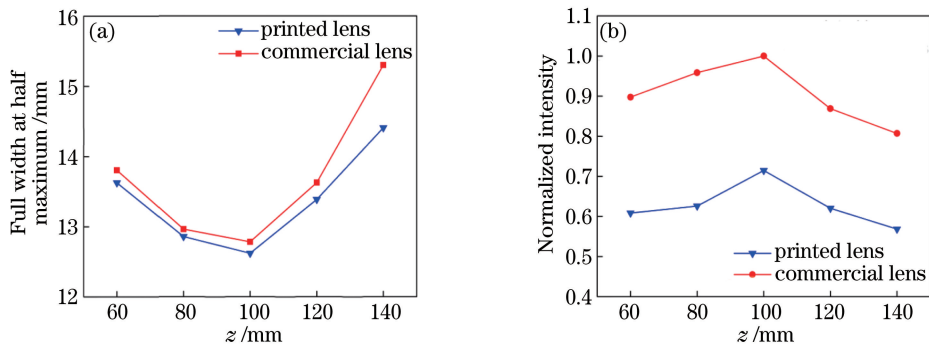


图 5 不同传播距离下两种柱透镜在 x 方向的(a)半峰全宽和(b)横截面光强最大值

Fig. 5 (a) Full widths at half maximum and (b) maximum cross-sectional light intensities of two kinds of cylindrical lenses along x direction under different propagation distances

以上实验结果说明,设计的3D打印柱透镜对100 GHz的太赫兹高斯光束具有与商用HDPE柱透镜相仿的良好聚焦效果,但是前者对100 GHz太赫兹波的透过率要低于后者的,这是由它们的材料特性决定的。实验结果与仿真结果基本符合,打印的柱透镜可以满足太赫兹系统中的应用要求。

4 结 论

设计了一种太赫兹柱透镜,基于3D打印技术制作出了实物样品,并且通过仿真和实验验证了其具有与现有商用柱透镜相近的性能。由于具有快速、低成本等优势,3D打印技术可以代替一些传统的太赫兹器件制造技术,广泛应用于太赫兹波段光学器件的高效制作,为太赫兹技术在各方面的应用提供支持。

参 考 文 献

- [1] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009: 1-3.
 - [2] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-4.
 - [3] Kemp M C, Taday P F, Cole B E, *et al.* Security applications of terahertz technology [C]. SPIE, 2003, 5070: 44-52.
 - [4] Yamamoto K, Yamaguchi M, Miyamaru F, *et al.* Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(3B): L414-L417.
 - [5] Kawano Y, Uchida T, Ishibashi K. Terahertz sensing with a carbon nanotube/two-dimensional electron gas hybrid transistor [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(8): 083123.
 - [6] Chan W L, Deibel J, Mittleman D M. Imaging with terahertz radiation [J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(8): 1325-1379.
 - [7] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, *et al.* Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. Electronics Letters, 2009, 45(18): 952-954.
 - [8] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(2): 143-171.
 - [9] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(10): 2438-2447.
 - [10] Son J H. Terahertz biomedical applications [C]. General Assembly and Scientific Symposium, 2014: 14693826.
 - [11] Goto M, Quema A, Takahashi H, *et al.* Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(2B): L317-L319.
 - [12] Nagel M, Marchewka A, Kurz H. Low-index discontinuity terahertz waveguides [J]. Optics Express, 2006, 14(21): 9944-9954.
 - [13] Chen D R, Chen H B. A novel low-loss terahertz waveguide: Polymer tube [J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3762-3767.
 - [14] Turchinovich D, Kammoun A, Knobloch P, *et al.* Flexible all-plastic mirrors for the THz range [J]. Applied Physics A, 2002, 74(2): 291-293.
 - [15] Lai W E, Zhu Y H, Zhang H W, *et al.* A novel reflector of AZO thin films applicable for terahertz devices [J]. Optical Materials, 2013, 35(6): 1218-1221.
 - [16] Jördens C, Chee K L, Alnaib I, *et al.* Dielectric fibres for low-loss transmission of millimetre waves and its application in couplers and splitters [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010, 31(2): 214-220.
 - [17] Zhang M E, Li X J, Liang S X, *et al.* Terahertz Brewster polarizing beam splitter on a polymer substrate [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 122301-122303.
 - [18] Masson J B, Gallot G. Terahertz achromatic quarter-wave plate [J]. Optics Letters, 2006, 31(2): 265-267.
 - [19] Gong Y D, Dong H. Terahertz waveplate made with transparency [C]. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012: 13192594.
 - [20] Wang L, Lin X W, Hu W, *et al.* Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. Light: Science and Applications, 2015, 4: 1-6.
 - [21] Neu J, Krolla B, Paul O, *et al.* Metamaterial-based gradient index lens with strong focusing in the THz frequency range [J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27748-27757.
 - [22] Scherger B, Jördens C, Koch M. Variable-focus terahertz lens [J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4528-4535.
 - [23] Yang M W, Ji H B, Tan Z Y, *et al.* Terahertz joint analyzer with imaging and spectrum detection [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0611004.
- 杨旻蔚, 季海兵, 谭智勇, 等. 成像与成谱联动的太赫兹分析检测仪 [J]. 光学学报. 2016, 36(6):

- 0611004.
- [24] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, *et al.* Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(4): 043505.
- [25] Lin X C, Liu H G. Continuous liquid interface production 3D printing technology and its application in fabrication of architecture models[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0816002.
林宣成, 刘华刚. 连续液面成型 3D 打印技术及建筑模型制作[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0816002.
- [26] Zhai J H, Wang Q B, Wei X H, *et al.* Repair of scraper conveyor sprocket based on metal 3D printing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402007.
翟建华, 王乾宝, 魏晓华, 等. 基于金属 3D 打印的刮板输送机链轮修复技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402007.
- [27] Pandey S, Gupta B, Nahata A. Terahertz plasmonic waveguides created via 3D printing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24422-24430.
- [28] Ng W R, Golish D R, Xin H, *et al.* Direct rapid-prototyping fabrication of computer-generated volume holograms in the millimeter-wave and terahertz regime [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3349-3355.
- [29] Kaur A, Myers J C, Ghazali M I M, *et al.* Affordable terahertz components using 3D printing [C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 2015: 15304193.
- [30] Squires A D, Constable E, Lewis R A. 3D printed terahertz diffraction gratings and lenses [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(1): 72-80.
- [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.
- [32] 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.
- [33] Courtial J, Padgett M J. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Optics Communications*, 1999, 159(1): 13-18.
- [34] Jiang Z, Zhang X C. Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(14): 1114-1116.
- [35] Lu Z L, Chen C H, Schuetz C A, *et al.* Subwavelength imaging by a flat cylindrical lens using optimized negative refraction[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(9): 091907.
- [36] Huang S W, Granados E, Huang W R, *et al.* High conversion efficiency, high energy terahertz pulses by optical rectification in cryogenically cooled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 796-798.
- [37] 张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1982: 55-57.