

文章编号: 1672-3392(2024)04-0028-07

## 太赫兹片状平顶波束产生研究

彭进宇<sup>1</sup> 徐振业<sup>2</sup> 郝从静<sup>3</sup> 王可嘉<sup>1</sup> 杨振刚<sup>1</sup> 刘劲松<sup>1</sup> 沈思诗<sup>1</sup>

(1 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074; 2 航空工业济南特种结构研究所, 山东 济南 250023;  
3 中国航空工业集团公司北京长城航空测控技术研究所, 北京 100111)

**摘要** 为了将太赫兹发射源发射出的高斯波束整形为片状平顶波束, 提出一种利用双相位板-太赫兹光片级联结构系统对波束进行整形的设计方法。理论设计上, 首先运用 Input-Output 算法设计出能将高斯波束整形为平顶波束的双相位板, 再将平顶波束通过太赫兹光片二次整形, 以获取片状平顶波束。在理论设计的同时进行了数值仿真并搭建实验系统, 结果均表明该系统可以将 0.33 THz 太赫兹源发射出的高斯波束转化为空间中呈薄片状分布的平顶波束。本次实验所产生的片状平顶波束相对方均根达到 71.41%, 充分说明了设计的有效性。

**关键词** 太赫兹; 高斯波束; 波束整形; 平顶波束; 片状波束

**中图分类号** O441.4 **文献标识码** A

### 1 引言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 是对频率在 0.1~10 THz 之间电磁辐射的总称, 这一波段处在红外与微波之间, 对该波段的研究属于电子学和光子学的交叉范畴<sup>[1]</sup>。太赫兹波相关技术现阶段在无损检测、安检、成像、通信、考古等领域已有越来越多的应用<sup>[2-7]</sup>。其中成像领域是太赫兹应用广泛的一个领域<sup>[8-10]</sup>, 这得益于太赫兹波光子能量低、穿透能力强、光谱分辨力高的特点。太赫兹波能穿透大部分非极性非金属物体, 诸如: 衣物、纸张、塑料、木材、陶瓷等, 这使得太赫兹波能像 X 射线一样获取物体的内部信息; 同时太赫兹波的单光子能量低, 不会对检测物体产生电离辐射, 因此有很高的安全性, 可用于人体安检、生物组织检测等<sup>[11]</sup>; 此外, 太赫兹波的波长远低于微波的波长, 因此太赫兹波被应用于成像时, 理论上其空间分辨率要高于微波。现阶段, 由于

太赫兹波源发射出的波束均为高斯波束, 若采用大尺寸的高斯波束对物体进行照明成像, 会因为照明的不均匀性严重影响成像质量, 所以大部分太赫兹成像系统都是利用聚焦后的波束对样品实施照明, 并逐点采样, 很显然这种成像的模式效率极其低下, 影响了系统的使用。

为在保证成像质量的同时提高成像速度, 波束需要在其横向分布的一定区域内保持均匀且单位面积的能量充足, 在可见光波段, 光学器件“光片”能实现这一功能, 其能将光束横向分布聚焦到一条线上形成片状的分布, 在激光材料加工、荧光显微成像等领域应用广泛<sup>[12]</sup>。但在太赫兹波段针对此类器件的研究较少, 2019 年, 张涵祎等人运用 3D 打印技术设计了一种工作于太赫兹波段下的光片<sup>[13]</sup>, 该器件成功地将太赫兹源发射出的横向为二维高斯分布的波束整形为横向分布呈片状分布的波束, 但其入射波束为高斯波束, 在整形后片状波束空间分布仍呈现一维的高斯分布, 波束中心强两端弱, 应用于成像

收稿日期 2024-01-03 收修改稿日期 2024-03-15

作者简介 彭进宇(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波束整形方面的研究工作。

通信作者 王可嘉(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事太赫兹科学与技术方面的研究工作。

中还是会出现与传统高斯波束类似的问题。因此还需运用平顶波束整形技术先将波源发射出的高斯波束整形为平顶波束,在太赫兹波段已经有一部分学者对平顶波束整形的技术做出研究。2010年 Kleindienst 等人首次在太赫兹波段提出平顶波束整形方案,他们用 Gerchberg Saxton(G-S)迭代算法生成了单个相位板数据模型,成功产生了在波束传播方向上发散的平顶波束<sup>[14]</sup>;2018年 Ye X 等人采用双相位板结构在 0.3 THz 频段产生了可稳定传输的平顶波束<sup>[15]</sup>;2021年邹开刚等人对 G-S 迭代算法进行改进,提出 Input-Output(I-O)算法,设计了双相位板系统,产生了半径达百毫米尺寸的平顶波束<sup>[16]</sup>。虽然将平顶波束直接用在系统中对物体进行全尺寸照明理论上可有效提高成像速度,但全尺寸照明会导致照明波束单位面积上的能量不足,成像结果的信噪比不高而影响成像质量,因此更理想的照明波束是横向分布集中在一条线上的平顶波束,其横向分布均匀且照明波束的单位面积能量充足,这是一种全新的结构化波束,本文称之为“太赫兹片状平顶波束”。

在对太赫兹光片研究的启发下,本文提出一种能产生太赫兹片状平顶波束这种全新的结构化波束的整形方案,该方案计划先将高斯波束整形为平顶波束,然后运用太赫兹光片将波束二次整形形成片状的平顶波束。研究方法上先通过理论设计能产生平顶波束的器件,然后通过仿真检验理论设计器件的波束产生情况,最后搭建实验系统进一步验证理论的实效性。为提升太赫兹成像系统成像效率提供了有效的参考。

## 2 理论设计

本文获取片状平顶波束的系统设计如图 1 所示,由两个相位板与一个太赫兹光片级联而成,先由双相位板将高斯波束整形为平顶波束,再通过太赫兹光片二次整形将平顶波束在横向分布上压缩,形成薄片状的平顶波束。

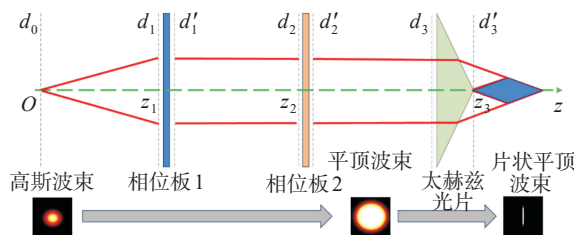


图 1 太赫兹片状平顶波束整形系统图

Fig. 1 Diagram of terahertz sheet-like flat-top beam shaping system

在将高斯波束整形为平顶波束产生的部分,本文采用双相位板结构来产生平顶波束,高斯波束束腰的坐标位置为  $z = 0$ , 强度分布为

$$I_0(r) = \frac{2}{\pi\omega_0^2} e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} \quad (1)$$

式中,  $\omega_0$  为束腰半径;  $r$  为径向坐标, 表征与光轴的垂直距离。相位板 1 在图中对应为蓝色, 所在位置的坐标为  $z_1$ , 相位板 1 的前表面为  $d_1$ , 后表面为  $d_1'$ ; 同理相位板 2 在图中对应为橙色, 坐标为  $z_2$ , 前表面为  $d_2$ , 后表面为  $d_2'$ , 在  $d_2'$  后的出射波束即为所需的目标平顶波束, 平顶波束横向强度表达式为

$$I_{d_2'}(r) = \frac{1}{\pi R_F^2 \left[ 1 + \left( \frac{r}{R_F} \right)^q \right]^{1 + \frac{2}{q}}} \quad (2)$$

式中,  $R_F$  为所预设平顶波束的半径,  $r$  为与光轴的垂直距离,  $q$  是一个正的常数,  $q$  越大波束的边缘突变越明显, 越接近理想的平顶波束分布。

在本研究中预设的平顶波束半径  $R_F = 40 \text{ mm}$ ,  $q$  取值大于 15 时平顶的分布已无明显区别, 为节省计算量, 令  $q = 15$ , 为使波束可稳定传播, 预设  $d_2'$  处波束的相位为常数 0, 由此出射波束的所在面  $d_2'$  的强度与相位信息均确定。  $d_1$  面的强度和相位信息可由太赫兹发射源发射出的波束计算得到。根据薄透镜近似理论, 将相位板视为只改变波场相位分布的纯相位器件, 不影响强度, 相位板前后表面的强度可认为相等, 因此  $d_1'$  和  $d_2$  处的强度也是已知的, 为得到相位板的厚度分布函数, 还需求得  $d_1'$  和  $d_2$  处波束的相位信息。这里我们用 I-O 算法对  $d_1'$  和  $d_2$  处的相位信息进行相位恢复, 在已知两个面波束强度分布

的情况下, I-O 算法可恢复出两个面对应的相位分布, 将迭代的次数  $n$  作为终止条件<sup>[15]</sup>。在利用 I-O 算法求解出  $d_1'$  和  $d_2$  处的相位信息后, 两块相位板的前后表面相位差均已获得, 即可获得相位板的厚度函数, 双相位板的厚度分布可相应地获得。至此高斯波束整形为平顶波束系统的全部信息在理论上均可求得。

由上述方法取得平顶波束后, 为获取片状平顶波束, 还需用太赫兹光片将其横向二维分布进行线聚焦, 太赫兹光片结构图如图 2 所示, 是一个以等腰三角形为底边的柱体, 其主截面为等腰  $\triangle ABE$ , 底角为  $\gamma$ , 将  $\triangle ABE$  沿着垂直该面的法线方向进行线性拉伸便可得到该光片的三维结构。为方便描述, 我们称  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  所在的面为光片的前表面,  $E$ 、 $F$  所在的垂直波束传播方向的面为后表面, 波束由前表面入射, 分别经两侧的斜面 ( $AEFD$  与  $BCFE$ ) 的折射交叠于该器件后表面后方。波束在该区域空间分布主要集中在所在的平面  $EFHG$  所在的平面附近, 形成类似“薄片”状的波束空间分布。而在波束进一步传播后, 平面两侧的波束便会开始向两个相反的方向扩散, 波束不再呈现片状分布。定性而言,  $\gamma$  越小波束开始扩散的距离越长, 但单位面积的波束强度越小, 综合考虑下本文设计的光片镜底角  $\gamma = 10^\circ$ 。

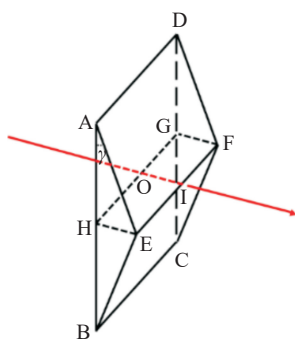


图 2 太赫兹光片结构图

Fig. 2 Structural diagram of terahertz light-sheet

基于以上理论部分, 给出如表 1 所示的系统设计参数, 束腰半径与相位板 1 的位置由实际测量得到, 相位板 2 与相位板 1 距离设置为 100 mm。

结合表 1 的系统设计参数, 通过 MATLAB 编写迭代程序, 可得到双相位板的主截面厚度分

布函数, 将厚度函数分布导入 solid works 中进行建模, 可得到双相位板的模型数据。太赫兹光片的结构相对简单, 可直接通过 solid works 输入相关参数进行建模。

表 1 系统设计参数

Table 1 System design parameters

参数	设定值
发射源频率/GHz	330
束腰半径/mm	2.50
相位板 1 位置/mm	231
相位板 2 位置/mm	331
平顶波束半径/mm	40
参数 $q$	15
迭代次数/次	2 000
光片底边尺寸 $AB \times AD$ /mm	150 $\times$ 100
光片镜底角 $\gamma$	10°

### 3 仿真分析

在理论设计部分已经取得了双相位板和太赫兹光片的模型, 为验证理论设计的正确性, 还需通过仿真进行验证。仿真设计图如图 3 所示, 波源及各元器件相关参数按表 1 的系统设计参数设计。



图 3 级联系统仿真示意图

Fig. 3 Simulation diagram of cascade system

太赫兹光片前表面的波束横向分布的仿真结果如图 4 所示, 呈现了明显的平顶分布特征, 这证明了平顶波束整形理论设计的正确性。

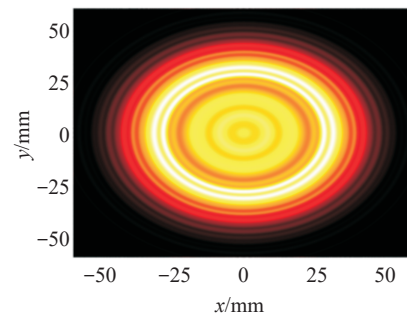


图 4 平顶波束的仿真结果图

Fig. 4 Simulation results of flat-top beam

为定量评价整形效果,本文计算了平顶波束的重要评价参数——相对方均根  $U_{RMS}$

相对方均根  $U_{RMS}$  的表达式为

$$U_{RMS} = 1 - \frac{\sigma}{\bar{I}} \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为强度标准差,  $\bar{I}$  为相对平均强度, 两者表达式由式(4)给出:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sqrt{2 \int_0^{R_F} [I(r) - \bar{I}]^2 r dr}}{R_F} \\ \bar{I} = \frac{2}{R_F^2} \int_0^{R_F} I(r) r dr \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $R_F$  为平顶波束的半径,  $I(r)$  为波束的归一化后的强度分布。相对方均根体现的是波束强度分布的均匀程度, 该值越大波束的横向分布越平坦。

通过计算可得出太赫兹光片前表面平顶波束的波束半径  $R_F$  和相对方均根  $U_{RMS}$

对于太赫兹光片镜的整形效果仿真, 我们主要关注于其对波束的线聚焦能力, 因此对其主截面进行仿真计算。图 5 为仿真结果图, 从  $yz$  的二维分布图可看出, 在  $z$  值不大时,  $y=0$  附近图像高亮, 能量分布集中, 说明波束产生了聚焦行为, 对  $z=50$  mm 处、 $z=100$  mm 处、 $z=150$  mm 处波束在  $y$  轴方向的分布进行了展示, 可以看出在 50 mm 处波束在  $y$  轴上的分布有明显的中央主峰, 波束被聚焦得很好; 在 100 mm 处中央主峰仍可见, 但两侧的次级峰高度上开始像主峰靠近, 在 150 mm 处两侧的次级峰已经完全超越了中央主峰, 说明波束此刻波束已经开始向  $y$  轴方向的两侧扩散。

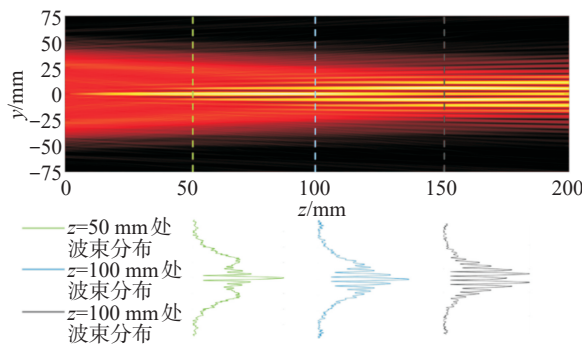


图 5 主截面仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the main section

综上, 本小节通过仿真验证了所设计的双相位板系统可将高斯波束整形为质量较高的平顶波束, 并进一步验证了太赫兹光片对平顶波束具有一定的聚焦能力。

## 4 实验验证

在仿真分析验证该系统的可靠性后, 还需实际搭建实验系统进行进一步验证, 在理论设计中已取得相关器件的模型文件, 利用计算机数字控制自动化机床(CNC)制造对应的实体物件, 用于加工制作两个相位板和太赫兹光片的材料为 HDPE, 该材料在 330 GHz 波段的折射率为 1.52。将三块制造好的元器件按照理论设计搭建如图 6 所示的平顶波束整形实验系统, 系统从左至右的器件分别为 0.33 THz 太赫兹波发射源、斩波器、相位板 1、相位板 2、太赫兹光片、单点检波器。其中单点检波器被安装在可三维移动的步进电机上以便对信号进行全空间采集。为方便描述, 令波束传播的方向为  $z$  轴, 垂直传播方向上水平为  $x$  轴, 竖直为  $y$  轴, 以太赫兹源发射口的波束中心为原点建立坐标系, 波源发射出的高斯波束束腰的位置在  $z = -31$  mm 处, 因此按照设计相位板 1 位于  $z = 200$  mm 处, 相位板 2 位于  $z = 300$  mm 处, 太赫兹光片位于  $z = 400$  mm 处。

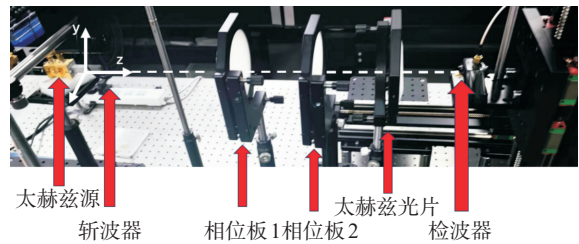


图 6 完整的实验系统

Fig. 6 Completed experimental system

对于该系统我们主要关注三处波束的分布情况, 即相位板 1 前表面的系统入射波束、太赫兹光片前表面的平顶波束分布, 太赫兹光片二次整形后的波束分布。通过检测这三处波束的分布情况如图 7 所示, 上方为对应位置波束  $xy$  面的强度分布情况, 下方为对应位置  $y=0$  处的波束

强度分布,图 7(a)为太赫兹源发射出的未经过整形的波束横向分布,图 7(b)为经过双相位板整形后在太赫兹光片前表面处的平顶波束横向

分布,图 7(c)为经过太赫兹光片二次整形后的波束横向分布。

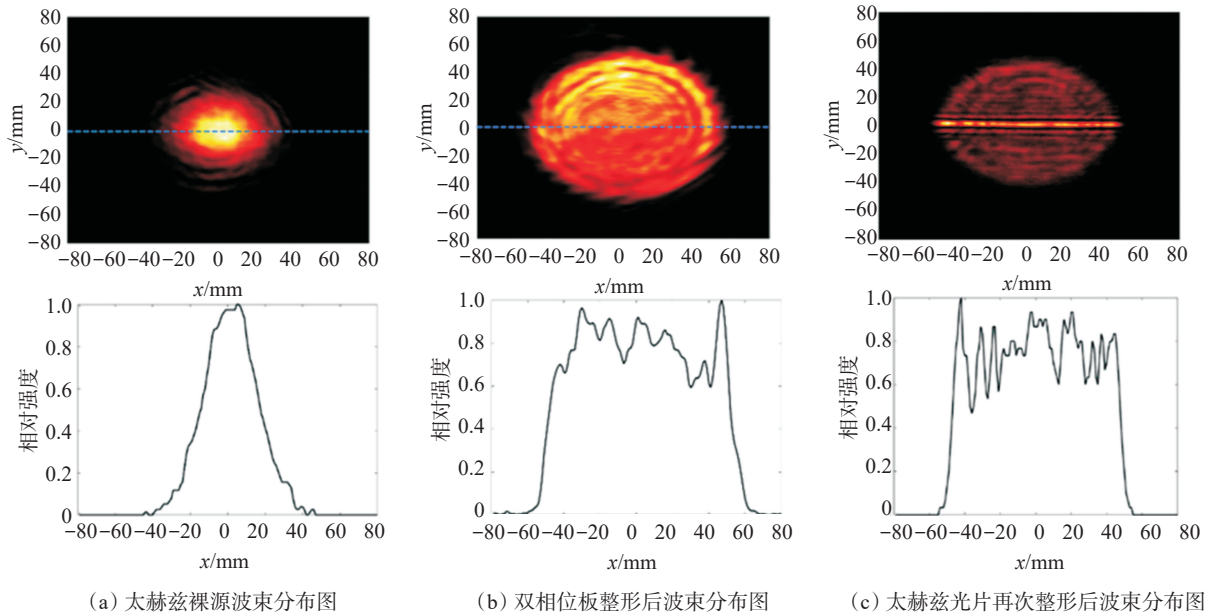


图 7 波束整形效果图

Fig. 7 Diagram of beam shaping

在得到太赫兹光片前后的波束横向分布后,计算太赫兹光片前后平顶波束有效区域的相对方均根,如表 2 所示。从表 2 可看出经过太赫兹光片整形的平顶波束相对方均根变化不大,这表明太赫兹光片在保持了波束均匀度的同时完成了对二维平顶波束的线聚焦,得到了理想的片状平顶波束。

表 2 太赫兹光片整形前后平顶波束参数对比表  
Table 2 Comparison table of parameter for flat-top beams before and after terahertz light-sheet shaping

平顶波束位置	相对方均根 $U_{RMS}$
太赫兹光片前表面	77.77%
太赫兹光片后表面	71.41%

综上所述,该系统成功地将太赫兹源发射出的高斯波束整形成为了质量较高的片状平顶波束,波束在保持了横向分布在一个维度上均匀的同时,平均强度比一般的平顶波束更高,能量更集中。

## 5 结 论

本文设计了一种片状平顶波束产生系统,其结构由两个相位板和一个太赫兹光片级联而成,成功地将太赫兹源发出的高斯波束整形为在空间中呈薄片分布的片状平顶波束,该波束在横向空间中呈现一维线性分布,且强度分布均匀。相比于横向空间二维分布的平顶波束,该波束的能量更集中。不过本实验所设计的双相位板-太赫兹光片级联系统相对较为复杂,需要三个核心结构器件对波束多次整形以取得片状平顶波束,未来可寻找更优的方法以减少系统的复杂度。

太赫兹成像相关的研究在近 20 年才开始兴起,并不像其他波段的波束研究相对成熟,有着巨大的可开发潜力,现有的太赫兹波发射出的高斯分布波束并不能满足现有的成像需求,本文所研究的太赫兹片状平顶波束能在保证单位面积照明能量充足的情况下实现成像效率的提升,对太赫兹成像技术的发展起到一定的促进作用。

## 参考文献

- [1] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术与应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.  
XU Jing-zhou, ZHANG Xi-cheng. Terahertz science and technology and application [M]. Beijing: Peking University Press, 2007.
- [2] T Wang, L Cui, C You, *et al.* System construction and signal processing of a focused 140 G terahertz frequency modulated continuous wave imaging system with tomography capability [C]. International Photonics and Optoelectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA), OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2019), JW4A.58.
- [3] Kodo Kawase, Yuichi Ogawa, Yuuki Watanabe, *et al.* Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. Opt. Express, 2003, 11: 2549-2554.
- [4] 戎路, 刘义铭, 宁冉, 等. 太赫兹计算层析成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(2): 207-224.  
RONG Lu, LIU Yi-ming, NING Ran, *et al.* Research progress of terahertz computational tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(2): 207-224.
- [5] 李尧, 高岩, 张浙, 等. 太赫兹固态通信系统技术发展现状与挑战[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(1): 41-57.  
LI Yao, GAO Yan, ZHANG Xi, *et al.* Overview of terahertz solid-state communication system technology development status and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(1): 41-57.
- [6] Dandolo CLK, Guillet JP, Ma X, *et al.* Terahertz frequency modulated continuous wave imaging advanced data processing for art painting analysis[J]. Opt. Express., 2018, 26(5): 5358-5367.
- [7] 王与焯, 李海滨, 葛梅兰, 等. 太赫兹成像技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(18): 46-61.  
WANG Yu-ye, LI Hai-bin, GE Mei-lan, *et al.* Terahertz imaging technology and its application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(18): 46-61.
- [8] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, *et al.* Compact continuous-wave sub terahertz system for inspection applications[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.
- [9] Chernomyrdin N V, Skorobogatiy M, Gavdush A A, *et al.* Quantitative super-resolution solid immersion microscopy via refractive index profile reconstruction[J]. Optica, 2021, 8(11): 1471-1480.
- [10] 李鼎, 张岩. 太赫兹生物效应的原理和应用[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(3): 134-150.  
LI Ding, ZHANG Yan. Principles and applications of terahertz biological effects [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(3): 134-150.
- [11] 杨君, 亓丽梅, 武利勤, 等. 太赫兹超材料生物传感器的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6): 1669-1677.  
YANG Jun, QI Li-mei, WU Li-qin, *et al.* Research progress of terahertz metamaterial biosensors[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6): 1669-1677.
- [12] 周笑, 左超, 刘永焘. 深组织光片荧光显微成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(2): 182-197.  
ZHOU Xiao, ZUO-Chao, LIU Yong-tao. Advances in deep-tissue light-sheet fluorescence microscopic imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(2): 182-197.
- [13] 张涵祎. 太赫兹片状结构化波束的产生及其在成像中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.  
ZHANG Han-yi. Generation of terahertz light sheet and its application in imaging systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [14] Kleindienst R, Moeller L, Sinzinger S. Highly efficient refractive Gaussian-to-top-hat beam shaper for compact terahertz imager[J]. Applied optics, 2010, 49(10): 1757-1763.
- [15] YE X, XIANG F D, YOU C W, *et al.* Generation of a terahertz collimated top-hat beam by using two thin diffractive phase plates[J]. OSA Continuum, 2018, 1(4): 1341-1348.

- [16] 邹开刚, 刘伟, 肖龙, 等. 大尺寸太赫兹平顶波束的产生研究[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 622-629.  
ZOU Kai-gang, LIU Wei, XIAO Long, *et al.* Generation of large-size terahertz flat-topped beam [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(4): 622-629.

## Research on the Generation of Terahertz Sheet-Like Flat-Top Beam

PENG Jin-yu<sup>1</sup> XU Zhen-ye<sup>2</sup> HAO Cong-jing<sup>3</sup> WANG Ke-jia<sup>1</sup>  
YANG Zhen-gang<sup>1</sup> LIU Jin-song<sup>1</sup> SHEN Si-shi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> National Laboratory of Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

<sup>2</sup> Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites of AVIC, Jinan 250023, China;

<sup>3</sup> Beijing Great Wall Aviation Measurement and Control Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100111, China )

**Abstract** For the purpose of shaping terahertz Gaussian beam transmitted by the terahertz transmitter into a terahertz sheet-like flat-top beam, this article proposes a method of designing which combines a dual-phase plates with a terahertz light-sheet to shape beam. In theoretical design, we first use the input-output algorithm to design a dual-phase plates that can shape Gaussian beams into flat-top beam, and then shape the flat-top beam to a sheet-like flat-top beam through terahertz light-sheet. Numerical simulation was conducted and an experimental system was built at the same time of theoretical design. The results all indicate that the system can convert the Gaussian beam transmitted by 0.33 THz terahertz transmitter into a flat-top beam with a sheet-like distribution in space. The relative root mean square reaches 71.41% for the sheet-like flat-top beam obtained in this experiment which fully demonstrates the effectiveness of the design.

**Key words** terahertz; Gaussian beam; beam shaping; flat-top beam; sheet-like beam