

太赫兹高斯光束整形环形光束

马 学, 李 琦, 鲁建业

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 由于很多实际应用中需要光斑环形分布, 因此太赫兹高斯光束整形环形光束的研究具有重要的理论和应用价值。文中利用 GS 算法设计相位板, 将太赫兹波段的高斯光束整形为环形光束。讨论了刻蚀台阶数量对该波段相位板整形结果的影响。对不同传输距离进行了仿真计算, 并在实验中将热释电相机 Pyrocam III 作为实验中的探测器对不同传输距离进行了实验。实验结果表明, 实验结果与仿真计算结果接近。

关键词: 太赫兹; 高斯光束整形; GS 算法; 环形光束

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0525002

Gaussian beam shaping terahertz Gaussian beam to ring beam

Ma Xue, Li Qi, Lu Jianye

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In many practical applications, it is required that the spot is ring distributed. Therefore, it is important to do the experimental research of converting the terahertz Gaussian beam to a ring beam. In the paper, a phase plate was designed using GS algorithm, converting the Gaussian beam with frequency of terahertz band to a ring beam. The shaping effect of multi-order encoding phase plates was discussed. According to different transmission distances, different simulations were done. Using the Pyrocam III as the recording device, beam shaping experiments were carried out on different distance. The experimental results show that the experimental results are close to the simulation results.

Key words: terahertz ; Gaussian beam shaping; GS algorithm; ring beam

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-10-20

作者简介: 马学(1992-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹光束整形方面的研究。Email: maxue0901@163.com

导师简介: 李琦(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事激光雷达及太赫兹成像方面的研究。Email: liqi2013@hit.edu.cn

0 引言

通常激光器出射的激光束空间强度分布呈高斯分布,而在许多实际应用中希望激光光强是环形分布^[1-2],例如,共焦扫描显微成像和光镊^[3-4]等领域。太赫兹较可见光具有能穿透有机物等优点,因此将太赫兹高斯光束整形环形光束具有很重要的理论和实际意义。

太赫兹光束整形根据其太赫兹源输出方式可以分为连续和脉冲两种,其中研究最早的是太赫兹脉冲整形技术。2006年, Lee 等提出将 FO-PPLN 晶体作为辐射源以产生任意波形的太赫兹脉冲^[5]。2009年,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究小组提出了利用 LiNbO₃ 晶体的双折射效应进行太赫兹脉冲整形的方法^[6]。据笔者所知,对于连续型太赫兹光束整形实验研究国内尚未见报道。

文中利用 GS 算法^[7-9]设计了将 2.52 THz 高斯光束整形环形光束相位板。研究相位板刻蚀台阶数目对整形效果的影响,基于已有的实验装置利用设计的二阶相位板进行了整形环实验验证。

1 GS 算法原理

基于相位调制的光束整形问题可以看作是一个给定入射光场和目标光场,求解相位板的问题。设定输入高斯光束的振幅分布函数为:

$$E(x,y)=e^{-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}} \quad (1)$$

整形环振幅分布函数为 $G(x,y)$ 。待求的相位调制函数为 $\Psi(x,y)$ 。GS 算法首先给 $\Psi(x,y)$ 设定一个初值,然后通过迭代为相位调制函数求解出一个较优解,使得计算所得目标光束与理论值误差尽可能小。每次迭代过程分三步,以第 q 次迭代为例,经 $q-1$ 次迭代后所得相位板其出射场分布为:

$$g_q(x,y)=E(x,y)\Psi_q(x,y) \quad (2)$$

目标位置处场分布为:

$$G_q(x,y)=F^{-1}\{F(g_q(x,y))H(k_x,k_y)\} \quad (3)$$

$$H(k_x,k_y)=\exp\left(\frac{jz_1(k_x^2+k_y^2)}{2k}\right) \quad (4)$$

式中: F 和 F^{-1} 分别为傅里叶变换和逆变换; H 为频域中传输函数; k_x 和 k_y 为频域中的坐标。然后提取出

$G_q(x,y)$ 的相位, 设定为 $\Phi_q(x,y)$ 。进行相应的逆运算:

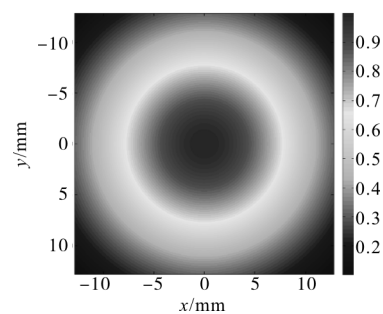
$$T_q(x,y)=F^{-1}\{F(G(x,y)\exp(i\Phi_q(x,y)))H_1(k_x,k_y)\} \quad (5)$$

式中: H_1 为逆运算过程中的传输函数; $T_q(x,y)$ 中相位即为经 q 次迭代计算出来的相位板中的相位分布。

2 设计及仿真结果

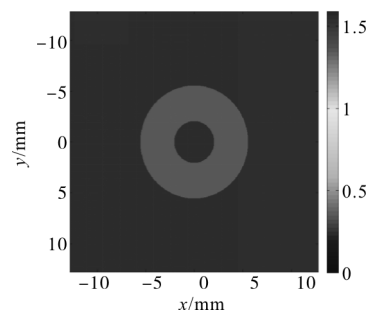
2.1 连续型相位板设计结果

设计中光源为基模高斯光束,束腰半径为 12mm,振幅最大值为 1,其光斑大小为 25.6 mm×25.6 mm,传输距离为 25 mm,目标环形光束环半径 3.8 mm,环厚度为 3.5 mm,其振幅值根据能量守恒确定。光源和目标形光束振幅分布如图 1 所示。



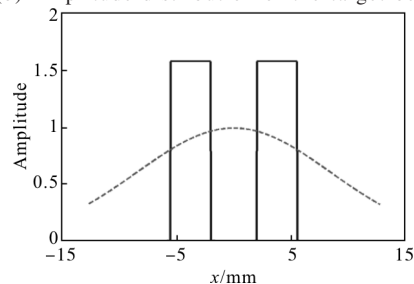
(a) 光源振幅分布

(a) Amplitude distribution of light source



(b) 目标环形光束振幅分布

(b) Amplitude distribution of the target beam



(c) 振幅分布对比

(c) Comparison of amplitude distribution

图 1 光源与目标光束振幅分布图

Fig.1 Amplitude distribution of light source and target beam

图 1(c)为光源和目标环形光束振幅分布图中水平向中线上的振幅分布对比图。设定 GS 算法迭代 15 000 次,计算出连续型相位板及设计距离处振幅分布如图 2 所示。

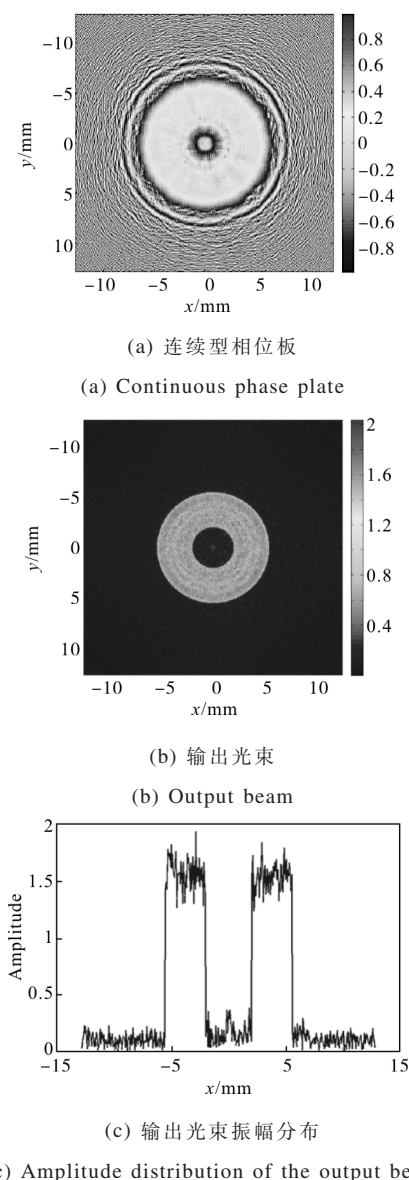


图 2 连续型相位板及输出振幅

Fig.2 Continuous phase plate and output amplitude

图 2(b)为相位板连续情况下设计距离处的振幅分布图。图 2(c)为其水平方向中线上振幅分布图,与图 1(c)对比发现在水平中线上所有点的振幅值都有所增加,图 2(c)中曲线有波动,但波动峰值与图 1(c)中对应位置处振幅值相差 0.3,差值较小。在此用相对平方误差 SE 来评价连续型相位板的整形效果:

$$SE = \frac{\sum (a_2 - a_1)^2}{\sum a_1^2} \quad (6)$$

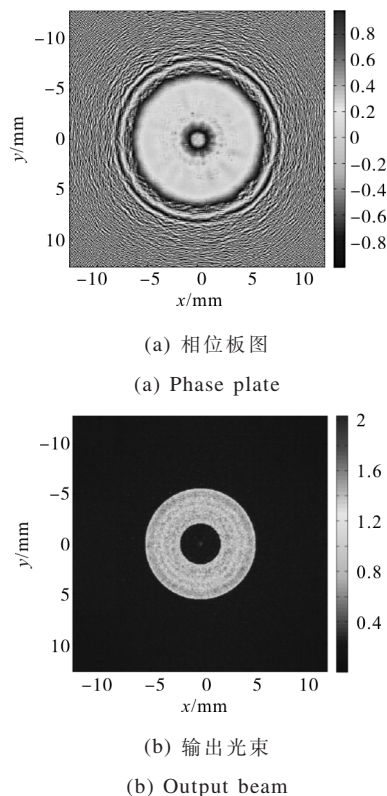
式中: a_2 为经连续型相位板整形之后输出环形光束中每一采样点的振幅值; a_1 为理论环形光束每一采样点的振幅值。经计算 SE 为 0.038,基本满足设计要求。

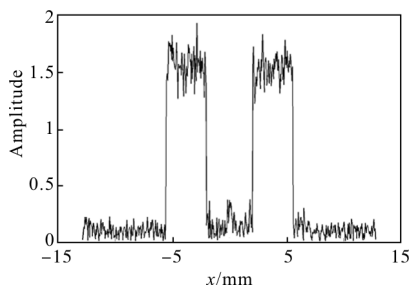
2.2 二元相位板仿真结果

通常情况下是采用激光直写或掩模套刻技术制作二元光学元件,即将纯相位光学元件刻蚀成 2 的 n 次幂个台阶数,台阶数越多越接近于连续, n 最小是 2。因此文中在 2.1 节设计的连续型相位板基础上,进行了量化处理。

由于在实验中探测器大小为 12.4 mm×12.4 mm,比仿真光斑小。在仿真中设定光斑和相位板大小为 25.6 mm×25.6 mm,将输出光斑截取为与热释电相机 Pyrocam III 等大小,以得到 12.4 mm×12.4 mm 的光斑。由于目前实验条件限制无法将相位板置于设计的传输距离上,因此,仿真了传输距离分别为 25 mm 和 45 mm 时的振幅分布。

256 个台阶相位板以及基于该相位板在设计距离处对应的输出光束如图 3 所示。





(c) 输出光束振幅分布

(c) Amplitude distribution of the output beam

图 3 256 个台阶相位板及设计距离处振幅分布图

Fig.3 256 step phase plate and amplitude distribution at the target position

相位板为 256 个台阶情况下 SE 为 0.0384。图 3 与图 2 即连续型相位板整形结果对比,发现整形效果几乎一致,为方便观察将输出光束截取为 12.4 mm×12.4 mm,则截取后振幅分布如图 4 所示。对相位板之后 45 mm 位置处振幅分布进行仿真计算,并将计算所得振幅分布图截取为与实验中探测器 Pyrocam III 等大小即 12.4 mm×12.4 mm。则两位置处振幅分布及截取后振幅分布如图 5 所示。

图 5(a)为相位板后 45 mm 位置处振幅分布图,其大小为 25.6 mm×25.6 mm,图 5(b)为以图(a)中心为中心截取的大小为 12.4 mm×12.4 mm 的振幅分布图,图中包含两个圆环,由仿真数据可知内圆环半径约为 3 mm 厚

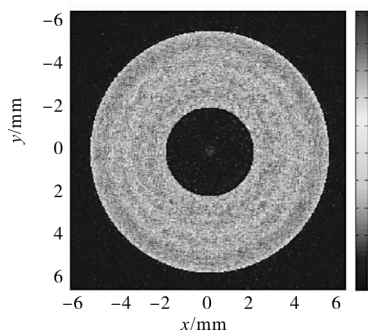


图 4 256 台阶 12.4 mm×12.4 mm 大小振幅分布图

Fig.4 256 step 12.4 mm×12.4 mm amplitude distribution

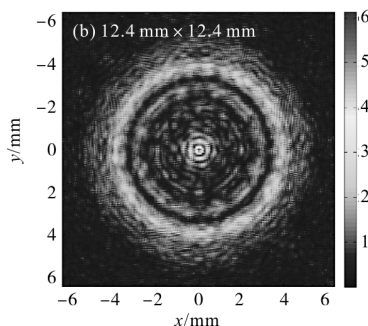
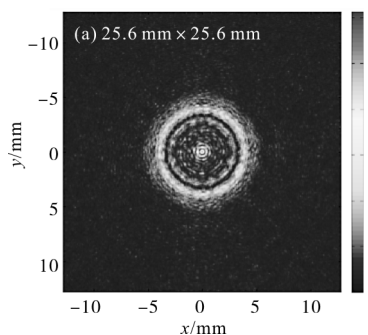
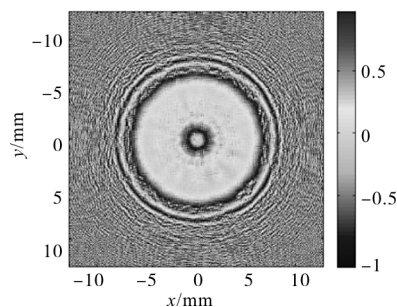


图 5 45 mm 位置处振幅分布图

Fig.5 Amplitude distribution at 45 mm

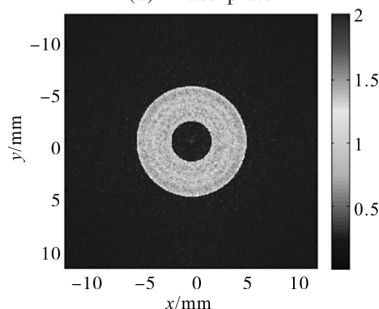
度较小,外圆半径约为 3.8 mm,厚度约为 0.6 mm。

64 个台阶相位板以及基于该相位板在设计距离处对应的输出光束如图 6 所示。



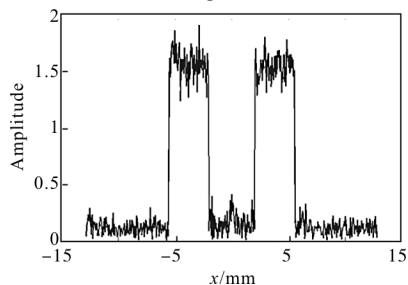
(a) 相位板图

(a) Phase plate



(b) 输出光束

(b) Output beam



(c) 输出光束振幅分布

(c) Amplitude distribution of the output beam

图 6 64 个台阶相位板及设计距离处振幅分布图

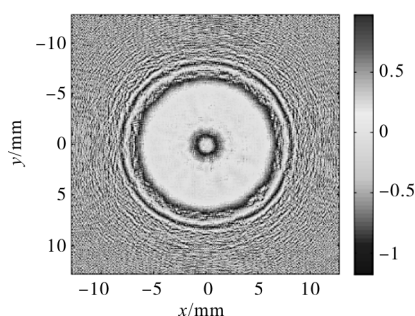
Fig.6 64 step phase plate and amplitude distribution at the target position

图 6(a)为 64 个台阶相位板图,图 6(b)为经该相位板整形后目标位置处光斑振幅分布图,图 6(c)为目标位置处中线上振幅分布图。经过计算经 64 个台阶相位板整形后整形光斑方差为 0.045 2。

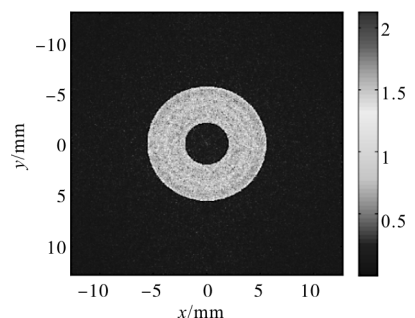
将相位板离散化为 32 个台阶,相位板图及经该相位板整形后 25 mm 位置处振幅分布如图 7 所示。图 7(b)为经 32 个台阶相位板整形后目标位置处光斑振幅分布图,经计算该整形结果方差为 0.066 7,与高台阶相位整形结果对比,可以发现亮环颜色明显变暗,均匀性变差,说明亮环区域振幅值降低且抖动增大。图 7(c)与高台阶情况对比,可发现曲线抖动

增大,且代表亮环的区域振幅值均值降低,从图中能够明显的分辨出环边界。

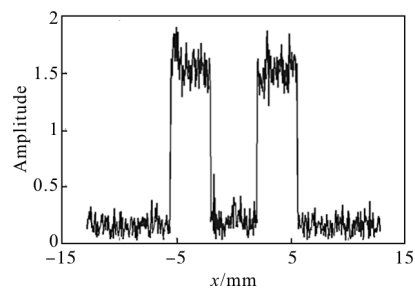
将相位板离散化为 16 个台阶,相位板图及经该相位板整形后 25 mm 位置处振幅分布如图 8 所示。图 8(b)为经 16 台阶相位板整形后目标位置处光斑振幅分布图,经计算该整形结果与理想环方差为 0.147 5,与高台阶相位板整形结果对比发现,亮环颜色变淡、亮环区域含有较多对比度很高的亮点,说明亮环振幅值降低,抖动增大。将图 8(c)与高台阶相位板整形情况对比也可发现亮环区域振幅值降低,抖动增大,且图中心位置振幅值较高台阶整形结果有所增大。



(a) 32 个台阶相位板
(a) 32 step phase plate



(b) 输出光束
(b) Output beam

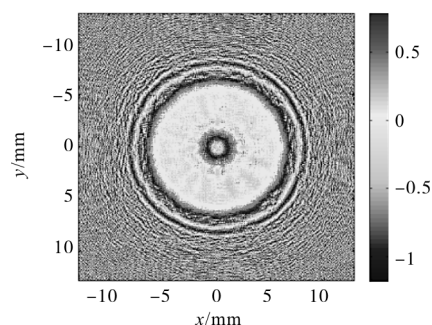


(c) 输出光束振幅分布

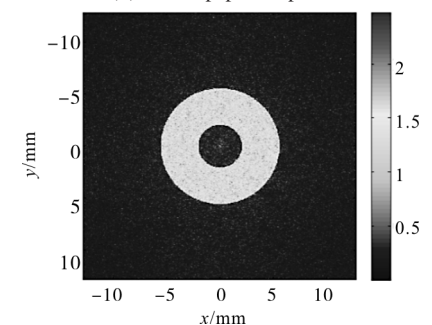
(c) Amplitude distribution of the output beam

图 7 32 台阶相位板及设计距离处振幅分布图

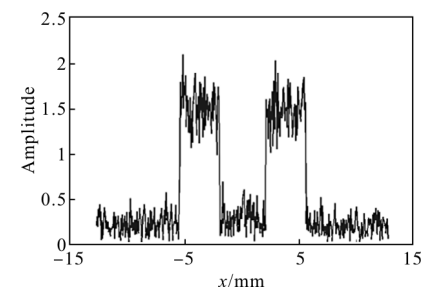
Fig.7 32 step phase plate and amplitude distribution at the target position



(a) 16 个台阶相位板
(a) 16 step phase plate



(b) 输出光束
(b) Output beam



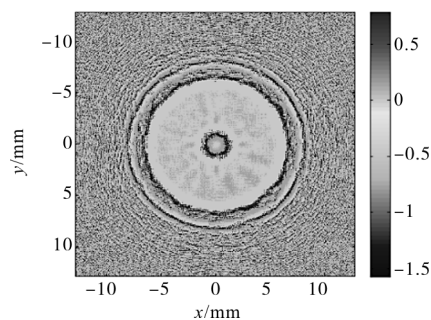
(c) 输出光束振幅分布

(c) Amplitude distribution of the output beam

图 8 16 台阶相位板及设计距离处振幅分布图

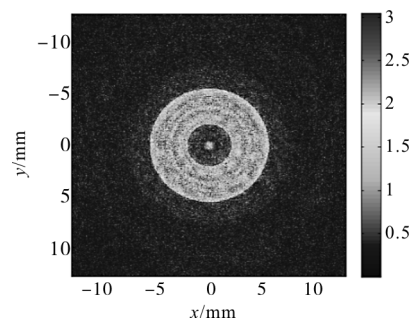
Fig.8 16 step phase plate and amplitude distribution at the target position

将相位板离散化为 8 个台阶，相位板图及经该相位板整形后 25 mm 位置处振幅分布如图 9 所示。



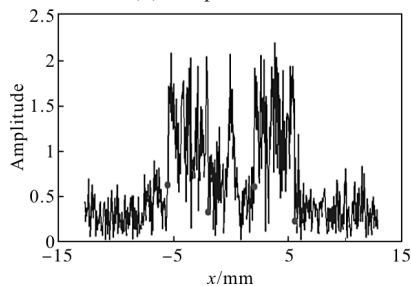
(a) 8 个台阶相位板

(a) 8 step phase plate



(b) 输出光束

(b) Output beam



(c) 输出光束振幅分布

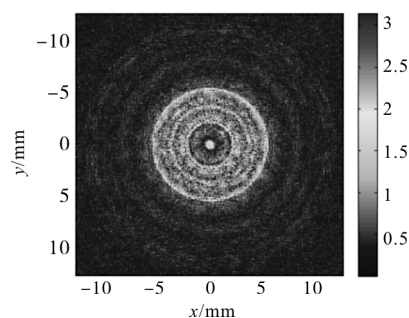
(c) Amplitude distribution of the output beam

图 9 8 台阶相位板及设计距离处振幅分布图

Fig.9 8 step phase plate and amplitude distribution at the target position

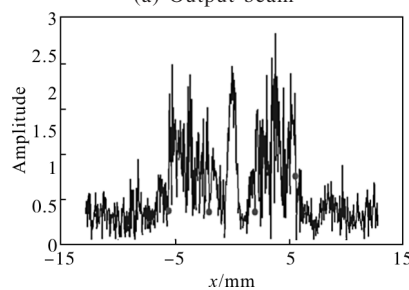
图 9(a)为 8 台阶相位板图，与高台阶相位板对比发现变化明显。图 9(b)为经 8 台阶相位板整形后目标位置处光斑振幅分布图，经计算该整形结果与理想环方差为 0.4925，从图中可以发现亮环颜色变化明显，均匀性变差且环中心位置出现了一个亮斑，但是从该图中仍能较明显地观察到与理想圆环等大的圆环。图 9(c)为图(b)中线上振幅分布图，通过观察可以发现图中曲线抖动较大，但是在理想环的边界位置，其两侧振幅值对比很大，能够明显地分辨出环。

将相位板离散化为 2 个台阶，相位板图及经该相位板整形后 25 mm 位置处振幅分布如图 10 所示。



(a) 输出光束

(a) Output beam



(b) 输出光束振幅分布

(b) Amplitude distribution of the output beam

图 10 2 台阶相位板设计距离处振幅分布图

Fig.10 2 step phase plate and amplitude distribution at the target position

图 10(a)为经 2 个台阶相位板整形后目标位置处光斑振幅分布图，经计算该整形结果与理想环方差为 0.6614，从图中仍能看到与理想环等大的环，但是在亮环内有一较亮的圆，该圆半径约为 3.7mm，中心亮斑较 8 台阶整形结果变的更亮。图 10(b)为图(a)中线上振幅分布图，图通过观察可知，为理想环边界位置处，其两侧振幅值对比高，说明理想环外侧边界较亮，从该曲线仍能观察到理想环边界的位置。将图 10(b)输出振幅分布截取为 12.4mm×12.4mm，振幅分布如图 11 所示。

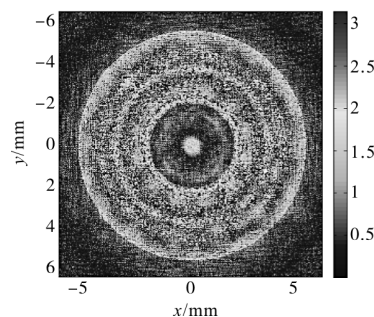
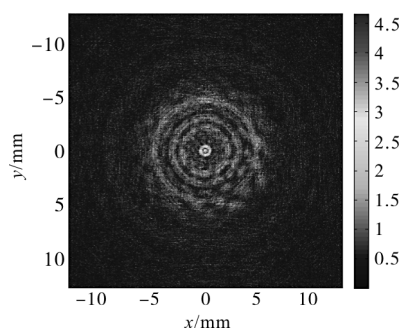


图 11 25 mm 位置处截取后振幅分布图

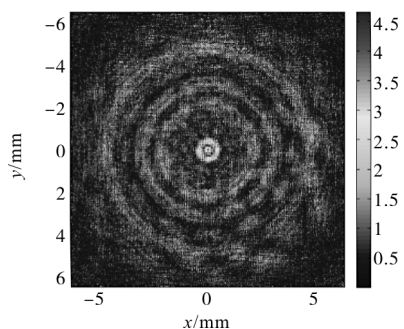
Fig.11 Amplitude distribution at 25 mm after interception

图 12 (a) 为经两台阶相位板整形后相位板后 45 mm 位置处振幅分布图,图 12(b)为图(a)的截取图,其大小为 12.4 mm×12.4 mm,通过观察可以发现振幅分布图由中心亮斑和外围 3 个圆组成,由仿真数据可知内圆半径约为 2.1 mm,中间圆半径约为 3.1 mm,外圆半径约为 4.6 mm,与图 5(b)对比发现两图形结构相似,图中较亮的圆半径有所变化,图形亮度变弱。



(a) 原始振幅分布图

(a) Original amplitude distribution



(b) 截取后振幅分布图

(b) Amplitude distribution after interception

图 12 45 mm 位置处振幅分布图

Fig.12 Amplitude distribution at 45 mm

因此,通过对比以上多台阶数相位板仿真计算结果可以看出,当台阶数大于等于 8 时能够较好地将 2.52 THz 高斯光束整形成环型光束。通过对比图 5 和图 12 即 256 个台阶相位板与 2 个台阶相位板在不同传输距离处的振幅分布图可以发现,对二阶相位板进行实验验证理论上可以推导出多台阶相位板可以用于 2.52 THz 高斯光束整形。

3 实验验证

实验光路如图 13 所示。

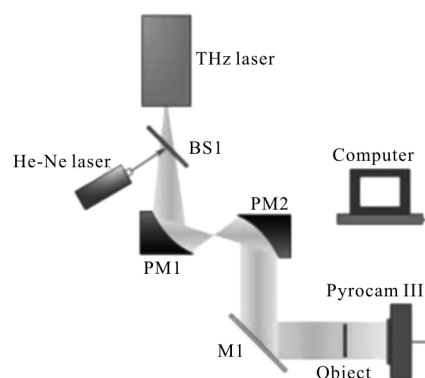
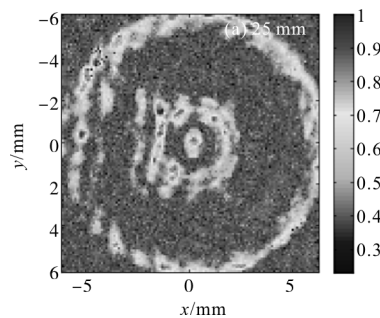


图 13 实验装置图

Fig.13 Experiment set-up

实验中使用 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器,工作频率为 2.52 THz(波长 118.83 μm),该波段的平均输出功率约为 50 mW,近似基模高斯光束。使用热释电相机 Pyrocam III 作为探测器记录全息图,具有 124×124 个像素,有效面积为 12.4 mm×12.4 mm。BS1 为分束器。使用 2 个离轴抛物面镜(PM)组成共焦准直镜组。准直后的近似平面波经全反镜(M1)反射后照射在相位板上,探测器位于相位板之后接收经相位板调制的光束。由于探测器测得的是光强,而仿真计算的为振幅分布,因此方便分析将探测器测得每一点处光强转换成振幅值。

将通过 GS 算法计算出的 2 个台阶相位板加载到实验中,探测相位板之后 25 mm 和 45 mm 两位置处的光强分布。然后将每一位置处的振幅分布进行 50 帧叠加,并转化为振幅值,实验结果如图 14 所示。图 14(a)为经相位板整形后,相位板后 25 mm 位置处光斑的振幅分布图,振幅分布图主要由中心亮斑,中间较亮圆和外围较亮圆构成,由实验数据可知,中间较亮圆直径约为 3.7 mm 该值比理想环空心直径偏小约 0.3 mm,图中两圆之间距离约为 4.5 mm,该值比理想环环厚偏大约 1 mm。图 14(b)为对实验



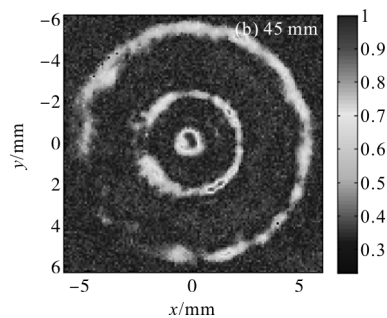


图 14 实验结果图

Fig.14 Experimental results

数据处理得出的五号相位板后 45 mm 位置处光斑的振幅分布图,该图由中心亮斑、中间较亮圆和外围较亮圆构成,实验数据表明,中间亮圆直径约为 4.5 mm,该值比图 12(b)中内圆直径偏大约 0.3 mm,外圆距离内圆约 2.5 mm,该值与图 12(b)中外圆距内圆距离几乎一致。由以上实验结果与仿真结果的对比分析表明,加工的相位板基本满足设计要求。

4 结 论

文中对 2.52 THz 激光应用 GS 算法设计了将高斯光束整形为环形光束的相位板,并分析了相位板刻蚀台阶数对整形效果的影响,仿真结果显示,8 台阶以上相位板能很好地达到整形效果。为节约成本对二阶相位板进行了不同传输距离的实验验证,得到了与仿真结果接近的实验结果。从而证明了原则上 8 台阶以上设计结果可用于 2.52 THz 光束整形。

由于太赫兹辐射波长较长,刻蚀深度增大,给相位板加工带来困难,导致加工误差很大,因此,2 台阶以上相位板对基底材料和加工工艺要求很高。为此,在今后的太赫兹纯相位整形元件设计上更要向

二值化倾斜,提高二阶相位板的整形效率,以利于降低加工成本。

参考文献:

- [1] Li Qi, Gao Huide, Dong Yunhua, et al. Investigation of diffractive optical element for shaping a Gaussian beam into a ring-shaped pattern[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(8): 511-514.
- [2] Qiu Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong, et al. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. *Progress in Physics*, 2004, 24(3): 336-380.
- [3] Brzobohaty O, Karasek V, Siler M, et al. Experimental demonstration of optical transport, storing and self-arrangement using a 'tractor beam'[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 123-127.
- [4] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [5] Hurlbut W C, Norton B J, Amer N, et al. Manipulation of terahertz waveforms in nonlinear optical crystals by shaped optical pulses [J]. *Opt Soc Am B*, 2006, 23(1): 90-93.
- [6] Li D, Ma G, Ge J, et al. Terahertz pulse shaping via birefringence in lithium niobate crystal [J]. *Appl Phys B*, 2009, 94(4): 623-628.
- [7] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [8] Yu Hao, Huang Linhai, Rao Changhui, et al. Application of G-S algorithm to the control of beam near-field intensity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1259-1264.
- [9] Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin, et al. Study on phase retrieval algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 217-221.