

doi:10.3788/gzxb20134210.1163

大功率空间椭圆光束整形和传输研究

胡淼, 刘晨曦, 李齐良, 祁永敏, 周雪芳, 钱胜

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘要:板条激光器具有高输出功率和高光束质量的特性,但是其原始出射光束的远场光斑呈椭圆形,而且远场发散角略大,不适合超远距离传输.针对该问题,本文研究了平均输出功率为 50 W、单脉冲宽度为 6 ns、波长为 1 064 nm 的板条型激光器发射的光束经过光学变换后通过湍流大气的情况.对板条激光器原始出射光束的 x 方向(大发散角)选取参量优化的柱面望远镜系统进行扩束,使其与 y 方向(小发散角)的远场发散角接近,且 x 方向与 y 方向的束腰位置在同一位置防止离焦.运用普通球面扩束镜压缩整形光束的远场发散角,最终在外场实验中获得远场发散角小于 $100 \mu\text{rad}$, x 、 y 方向发散角比值小于 1.1 的激光光束,且接收面上的光斑呈圆形.

关键词:椭圆高斯光束;柱面望远镜;扩束

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)10-1163-6

High Power Space Elliptical Beam Reshaping and Transmission

HU Miao, LIU Chen-xi, LI Qi-liang, QI Yong-min, ZHOU Xue-fang, QIAN Sheng

(Communication Engineering College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Slab laser has characteristics of high output power and high beam quality. However, the far field facula of its primitive outgoing beam presents as an oval, and its far field divergence angle is slightly big which makes it inconvenient to transmit in very long distance. To solve this problem, a cylindrical telescope system with optimized parameter was used to expand the x -scale outgoing beam (wide divergence angle). The goal is to make the x -scale divergence angle approximate to the y -scale divergence angle which is a small angle, and constrain the beam waist position of x -scale and y -scale to the same place in case of out of focus. The general sphere beam expander was used to compress far field divergence angle of the reshaped beam. At last, the laser beam with a far field divergence angle less than $100 \mu\text{rad}$ and ratio of x -scale to y -scale less than 1.1 in out-field experiment was obtained.

Key words: Elliptical Gaussian beam; Cylindrical lens telescope; Beam expanding

0 引言

大功率高光束质量的全固态激光器一直是激光界研究的热点之一^[1].采用板条型结构是固体激光器获得高功率输出的有效技术措施,其特点是光在激活介质中以锯齿型光路传播,同时对激活介质施行面泵浦和面冷却,从而有效地克服激光介质热光畸变对输出功率和光束质量的影响,使器件获得优质的高功率输出^[2].近年来板条型结构激光器成为激光研究的活跃领域之一,出现了移动式激活介质、二极管光泵浦及采用新材等多种板条型固体激光

器,板条型固体激光器的平均功率输出已达千瓦.其中 LD 泵浦的板条型激光器的输出功率较高,光束质量相比传统的固体激光器也有了很大的改善,它在激光通信、航空测绘、卫星遥感及光学雷达等领域都有广泛的应用^[3].激光束在大气中传输时受到大气气体分子、气溶胶离子等折射、吸收、散射以及湍流等效应的综合作用^[4].大气湍流会引起大气折射指数随机起伏,在其中传输的激光光束会受影响,称为大气湍流效应.为使激光信号能量传输到远处接收端仍能保持一定的功率密度,需要对激光进行整形扩束,以保证激光束以较小的发散角传输.

第一作者:胡淼(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为固体激光器技术. Email:miao_hu@hotmail.com

收稿日期:2013-04-01;录用日期:2013-05-22

光束整形方法有很多,目前比较常用的有非球面透镜组^[5]、空心导管^[6]、衍射元件^[7]、液晶空间光调制器^[8]等.本文使用的非球面透镜组整形方法激光光束能量利用率高、整形效果较好,并且适用于大功率板条型激光器.

本文对平均输出功率为50 W、单脉冲宽度为6 ns、波长为1 064 nm的板条型激光器发射的光束经过光学变换后通过湍流大气的场景进行了理论和实验研究.针对板条状激光器出射光束远场光斑呈椭圆形的问题,通过用柱面望远镜系统进行整形,然后采用普通球面望远镜扩束装置压缩激光远场发散角,使得在2 km处的接收面上获得的光斑呈圆形,并且对改善后的光斑进行了相应的分析.

1 椭圆高斯光束的传输理论和仿真

1.1 椭圆高斯光束的传输理论

在空间激光传输应用中,要求激光投射至远处光束具有圆形的光斑图样和极小的远场发散角.直接从大功率板条型激光器输出的激光束,其中稳定腔方向为基模高斯光束,非稳定腔方向通过空间滤波器滤去旁瓣也近似为基模高斯光束^[11],其传输方程可以表示为

$$E_1(x, y, z) = \frac{E_0 \exp(ikz)}{\sqrt{1+i\tau_x(z)} \sqrt{1+i\tau_y(z)}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_{0x}^2(1+i\tau_x(z))} - \frac{y^2}{\omega_{0y}^2(1+i\tau_y(z))}\right] \quad (1)$$

$$\tau_i(z) = 2\left(\frac{z-f_i}{b_i}\right), b_i = \omega_{0i}^2 k, i = x, y \quad (2)$$

式(1)表示椭圆 TEM₀₀ 高斯光束的电场分布,其主要参量为共焦参量 f_i 和束腰半径 ω_{0i} . 其他横向维度上的各参量,如等相位面曲率半径 $R_i(z)$ 、等相位面光斑半径 $\omega_i(z)$ 和 q 参量 $q_i(z)$ 与一维基模高斯光束的表达相同. 由于椭圆高斯光束的 x, y 横向参量各不相同,因此 x, y 轴的远场发散角 θ_i 也不相

同. 对于本实验中所采用的板条型激光器的原始横向远场发散角约为 $\theta_x : \theta_y = 2.4 : 1$. 为了改善这一情况,需要采用柱面望远镜光学系统对激光束的 x 横向方向进行整形. x, y 横向方向高斯光束的远场发散角 θ_i 与束腰的光斑尺寸 ω_{0i} 相互之间紧密联系,即 $M_i^2 \theta_i = \lambda / \pi \omega_{0i}$, 其中 M_i^2 表征各对应横向方向上的激光束的光束质量, λ 为激光波长. 柱面望远镜整形由开普勒望远镜系统和伽利略望远镜系统^[12]两种方式,如图1.

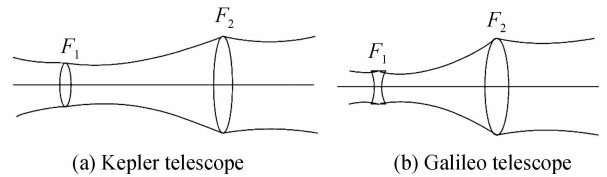


图1 倒置望远镜扩束系统

Fig. 1 Inverted telescope beam expanding system

由于激光会聚会导致空气击穿从而损失能量,因此本实验采用伽利略式正向柱面望远镜对 x 方向的光束进行扩束.

1.2 光束整形仿真

如图2所示,激光器出射光束依次经过自由空间 l_0 、柱透镜 F_1 、自由空间 l_1 、柱透镜 F_2 、自由空间

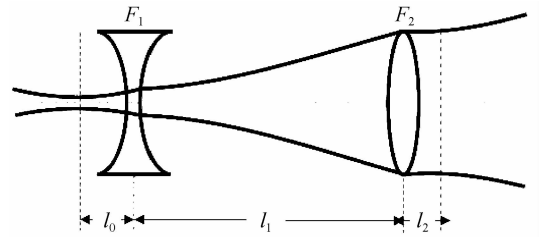


图2 通过柱面望远镜的高斯光束分析

Fig. 2 The analysis of Gaussian beam through the cylindrical telescope

l_2 . 激光器出射光束依次经过了 $T_{l_0}, T_{F_1}, T_{l_1}, T_{F_2}, T_{l_2}$ 的变换. 其中 $T_{l_0}, T_{l_1}, T_{l_2}$ 为空间光线变换矩阵, T_{F_1}, T_{F_2} 是透镜光线变换矩阵, 分别可以按照下式计算.

$$T_{l_0} = \begin{bmatrix} 1 & l_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{F_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_1 & 1 \end{bmatrix}, T_{l_1} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{F_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_2 & 1 \end{bmatrix}, T_{l_2} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

整体变化矩阵为 $T = T_{l_2} \times T_{F_2} \times T_{l_1} \times T_{F_1} \times T_{l_0}$ ^[13]. 对于正透镜,其焦距 $F_2 > 0$; 负透镜则焦距 $F_1 < 0$. 对于伽利略正向扩束镜,此处 $F_1 < 0, F_2 > 0$, 其中 l_1 为两柱面透镜之间的距离. 经整理计算可得

$$T = \begin{bmatrix} (1 - \frac{l_1}{F_1})(1 - \frac{l_2}{F_2}) - \frac{l_2}{F_1} & [(1 - \frac{l_1}{F_1})(1 - \frac{l_2}{F_2}) - \frac{l_2}{F_1}]l_0 + l_1(1 - \frac{l_2}{F_2}) + l_2 \\ -\frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_1} + \frac{l_1}{F_1 F_2} & [-\frac{1}{F_2} - \frac{1}{F_1}(1 - \frac{l_1}{F_2})]l_0 + (1 - \frac{l_1}{F_2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)易知 A, B, C, D 的表达式. 根据 ABCD 定律^[14], 有

$$q_1 = (Aq_0 + B) / (Cq_0 + D) \quad (4)$$

式(4)为经矩阵变换后的激光光束的 q 参量, 其

中 $q_0 = i\pi\omega_0^2/\lambda$ 为原空间的 q 参量, q_2 为经过柱面望远镜扩束后的光束 q 参量, $1/q_2 = 1/R_2 - i\lambda/\pi\omega_2^2$, $1/R_2 = \text{Re}\{1/q_2\}$, $1/\omega_2^2 = -\pi/\lambda * \text{Im}\{1/q_2\}$ ^[15]. 本次实验通过调整透镜焦距、激光器与透镜的间距以及两透镜的间距,使得经过柱面望远镜后的激光束光斑大约为圆形, x 、 y 方向有相近的发散角,然后将光束通过 1:3 的普通扩束镜进行扩束. 实验中采用柱面望远镜对 x 轴方向进行扩束,防止由于透镜孔径的衍射极限产生对扩束角的影响^[14],柱面凹、凸透镜的尺寸选取为 $20 \times 20 \text{ mm}^2$,远大于光斑尺寸. 其中柱面凹、凸透镜的焦距 F_1 、 F_2 的选取如表 1 所示,两柱透镜之间的距离 l_1 待定; $l_0 = 2 \text{ m}$, $l_2 = 0 \text{ m}$.

表 1 不同焦距的柱面凹凸透镜组合

Table 1 Cylindrical concave and convex lens in different focal distances

No.	F_1/mm	F_2/mm	l_1/mm
1	-50	100	0~100
2	-50	150	50~150
3	-75	150	25~125
4	-75	200	75~175
5	-75	250	125~225

图 3~图 7 分别为利用 Matlab 仿真工具画出的序号 1~5 组不同焦距的柱面凹凸透镜组合下,透镜间距 l_1 变化导致的 x 、 y 方向束腰位置对比图以及 x 方向光束发散角与 x 方向束腰位置曲线图.

椭圆高斯光束初始 x 方向远场发散角为 $\theta_x = 600 \mu\text{rad}$. 现在的要求是通过柱面望远镜系统,将 x 方向的 $600 \mu\text{rad}$ 的发散角缩小到 $250 \mu\text{rad}$ 左右, y 方向的 $250 \mu\text{rad}$ 的发散角保持不变,同时还要求 x 方向与 y 方向的束腰位置比较接近,使得扩束后的激光光束质量较高,便于进行下一步的整形与空间传输. 对仿真图的分析分为两个步骤. 步骤 1): 在 (b) 图中找到 x 方向光束远场发散角为 $250 \mu\text{rad}$ 时的光束在 x 方向的束腰位置,然后对照 (a) 图找到对应的 y 方向的光束束腰位置,如果 x 与 y 方向束腰位置相差不大,则符合要求. 步骤 2): 在 (a) 图中找到 x 与 y 方向束腰位置相同的点,得到两个方向束腰位置的值,然后对照 (b) 图可以求得光束在 x 方向的远场发散角,将之与 $250 \mu\text{rad}$ 进行比较,如果相差不大则符合要求.

由图 3 中第 1 组透镜组合 (-50 mm 与 100 mm) 仿真 (b) 图可知,望远镜系统放大倍数为 2 时, $x = 250 \mu\text{rad}$ 在曲线左侧,对应的 x 方向光束束腰位置为 -0.8974 m (即束腰在柱面凸透镜右侧); 由 (a) 图知,对应的 y 方向束腰位置为 2.063 m ,易知 x 方向束腰位置与 y 方向束腰位置不相等,相差

约为 2.96 m ,不合要求. 再由仿真 (a) 图可知,当 x 方向束腰位置为 2.046 m 时, y 方向束腰位置也为 2.046 m ; 对应 (b) 图知,当 x 方向束腰位置为 2.046 m 时, x 方向远场发散角为 $295 \mu\text{rad}$,距离目标 $250 \mu\text{rad}$ 为 $45 \mu\text{rad}$.

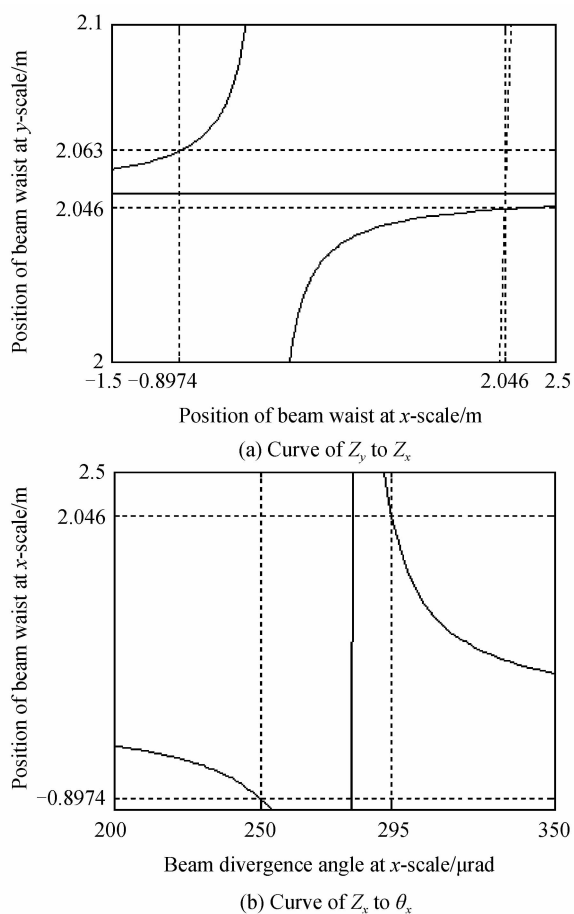
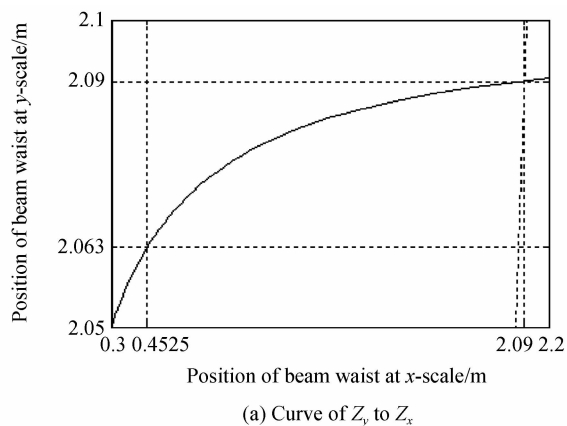


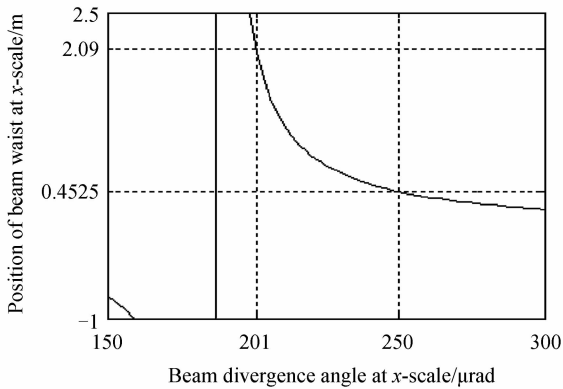
图 3 第 1 组透镜仿真图

Fig. 3 The curve of Z_y to Z_x and Z_x to θ_x in 1_{st} lens

由图 4 中第 2 组透镜组合 (-50 mm 与 150 mm) 仿真 (b) 图可知,放大倍数为 3 时, $x = 250 \mu\text{rad}$ 在曲线右侧,此时 x 方向束腰位置为 0.4525 m (即在柱面凸透镜的左方); 由 (a) 图可知,对应的 y 方向束腰位置为 2.063 m ,两者相差约 1.61 m ,不合要求. 又由 (a) 图可知当 x 方向束腰位



(a) Curve of Z_y to Z_x

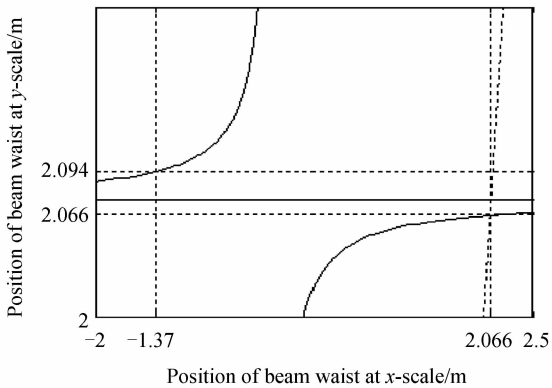


(b) Curve of Z_x to θ_x

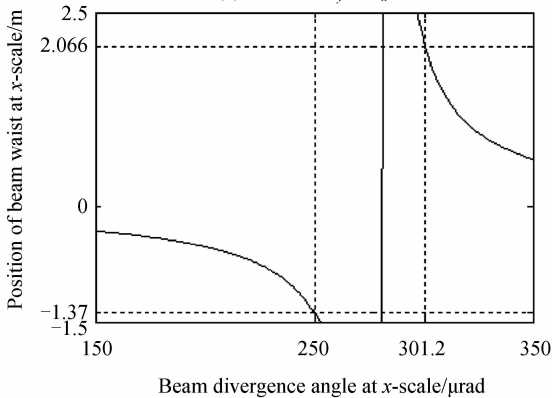
图4 第2组透镜仿真图

Fig. 4 The curve of Z_y to Z_x and Z_x to θ_x in 2nd lens
置为 2.09 m 时, y 方向束腰位置与其相等, 对照(b)图可知此时 x 方向光束发散角为 201 μrad , 与预期的 250 μrad 相差 49 μrad .

图5中第3组透镜组合(-75 mm与150 mm)仿真图与第1组图类似. 放大倍数为2, (b)图中直线 $x=250 \mu\text{rad}$ 在曲线左侧. 由(a)图可知, 当 x 方向束腰位置为 2.066 m 时, 对应的 y 方向束腰位置与其相等, 也为 2.066 m. 对照(b)图可知, 此时 x 方向光束远场发散角为 301.2 μrad , 与预期扩束成的 250 μrad 相差约为 51 μrad . 由(b)图可知, 当 x 方向远场发散角由 600 μrad 缩小至 250 μrad 时, 对应的



(a) Curve of Z_y to Z_x



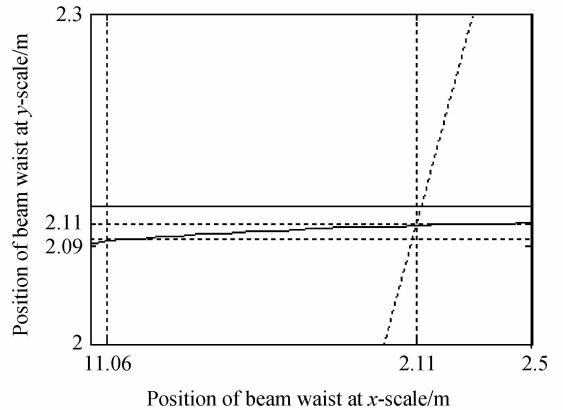
(b) Curve of Z_x to θ_x

图5 第3组透镜仿真图

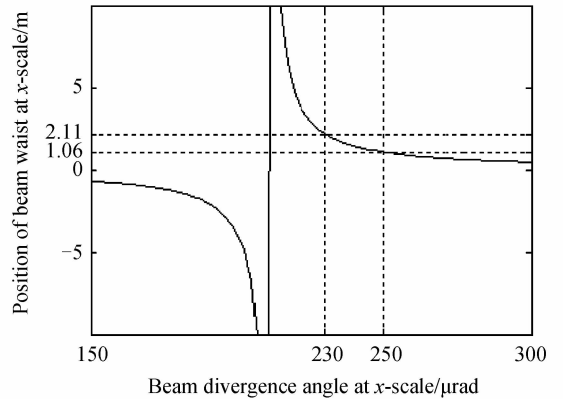
Fig. 5 The curve of Z_y to Z_x and Z_x to θ_x in 3rd lens

x 方向光束束腰位置为 -1.37 m; 对照(a)图可知, 此时 y 方向束腰位置为 2.094 m. x 方向与 y 方向束腰位置不等, 相差为 3.46 m, 不合要求.

由图6中第4组透镜组合(-75 mm与200 mm)仿真(b)图可知, 放大倍数为2.7时, $x=250 \mu\text{rad}$ 在曲线右侧, 对应的 x 方向束腰位置为 1.06 m, 由(a)图可知, $x=1.06 \text{ m}$ 时, 对应的 y 方向束腰位置为 2.09 m, 相差过大, 不符合要求. 再由(a)图可知, $x=2.11 \text{ m}$ 时, $y=2.11 \text{ m}$, 即此时 x 方向束腰位置与 y 方向束腰位置相同, 符合要求; 对应(b)图, x 方向束腰位置 2.11 m 时, 相应的 x 方向远场发散角为 230 μrad , 虽然与 250 μrad 不等, 但相差不大, 仅为 20 μrad , 符合要求. 此时透镜间距 l_1 为 1.1 m. 因此第4组透镜组合, 即柱面凹透镜焦距为 -75 mm、柱面凸透镜焦距为 200 mm 符合实验的要求.



(a) Curve of Z_y to Z_x



(b) Curve of Z_x to θ_x

图6 第4组透镜仿真图

Fig. 6 The curve of Z_y to Z_x and Z_x to θ_x in 4th lens

图7中第5组透镜组合(-75 mm与250 mm)的仿真图与第4组类似, 但是仿真结果不如第4组. 此时放大倍数为3.3, 因此(b)图中 $x=250 \mu\text{rad}$ 在曲线的右侧, 对应的 x 方向束腰位置为 0.5 m, 由(a)图可知, 对应的 y 方向束腰位置为 2.09 m, 相差过大. 又由(a)图知, 当 x 与 y 方向束腰位置相等时 (2.15 m 处), x 方向光束发散角为 189 μrad , 与 y

方向 $250 \mu\text{rad}$ 的远场发散角相差 $61 \mu\text{rad}$. 因此第 5 组不如第 4 组符合要求.

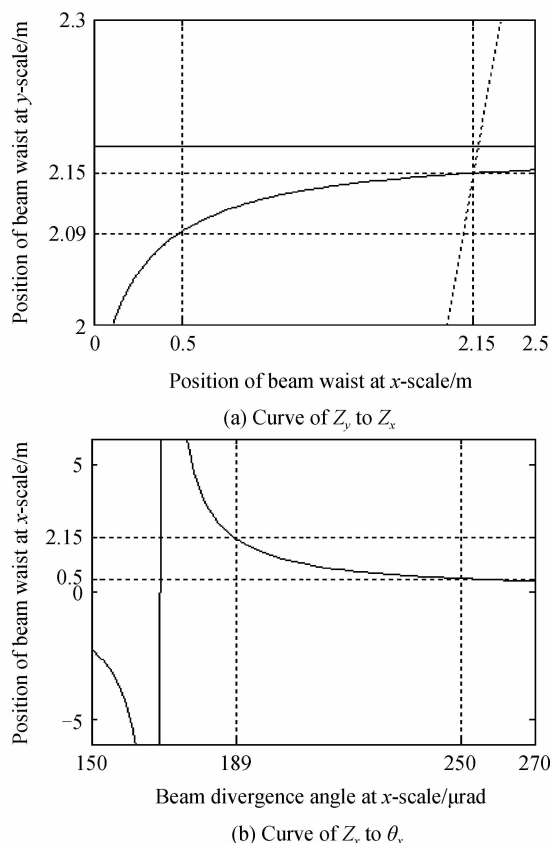


图 7 第 5 组透镜仿真图

Fig. 7 The curve of Z_y to Z_x and Z_x to θ_x in 5th lens

综上所述,通过 Matlab 软件仿真,选择表 1 中的第 4 组透镜组合,即 -75 mm 焦距的柱面凹透镜与 200 mm 焦距的柱面凸透镜组合,并且调整透镜间距为 1.1 m ,可以将 x 方向的 $600 \mu\text{rad}$ 初始发散角减小到 $230 \mu\text{rad}$,并且同时 x 方向束腰位置为 2.11 m , y 方向束腰位置也为 2.11 m ,此时获得了 x 方向远场发散角为 $230 \mu\text{rad}$, y 方向远场发散角为 $250 \mu\text{rad}$,并且 x 方向束腰位置与 y 方向束腰位置相同的激光光束.然后将整形后的光束通过普通 $1:3$ 扩束镜进行 x 方向与 y 方向的同时扩束,易知扩束后 x 方向远场发散角为 $76.7 \mu\text{rad}$, y 方向远场发散角为 $83.3 \mu\text{rad}$.

2 实验结果及讨论

图 8 为实验系统结构图.实验中板条型激光器出射的原始光束不是标准的圆形高斯光束而是椭圆高斯光束,即光束在 x 、 y 轴上都满足各自的高斯光束参量,接收屏上接收到的激光光斑是椭圆形的.实验分两个步骤进行.步骤 1):板条型激光器原始出射的椭圆高斯光束经过常规扩束镜准直后,通过随机大气信道投射在接收端的接收屏上.为了使 CCD 能够更好地探测到,增加了不同数值的衰减片,实验

结果如图 9.

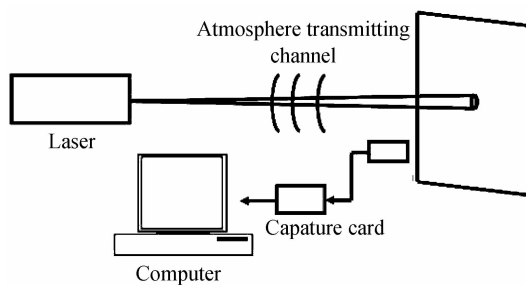


图 8 实验系统结构

Fig. 8 The experimental system structure block

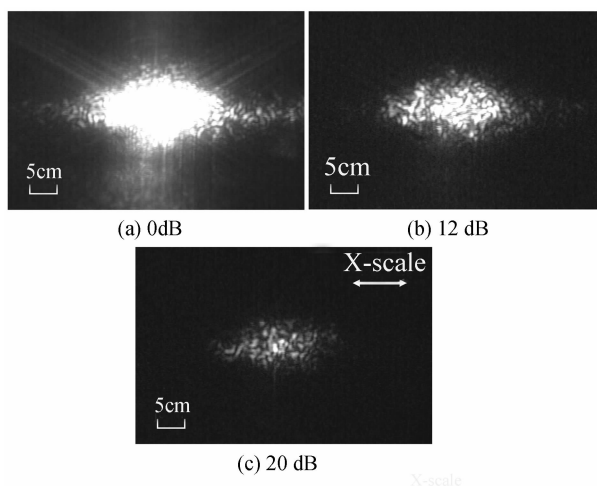


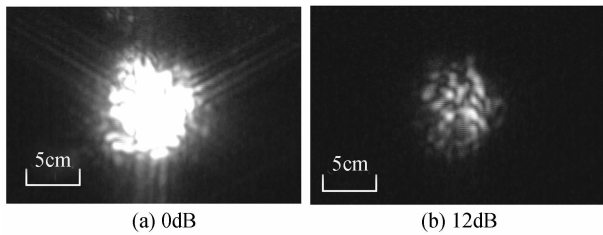
图 9 原始激光器在不同衰减下的远场光斑

Fig. 9 Far field facula of primitive laser

图 9 是原始激光器出射的椭圆高斯光束分别在 0 、 12 、 20 dB 衰减片下的 500 m 远场光斑图.由图可知,原始出射光束 x 方向光斑半径大于 y 方向的光斑半径,为椭圆形.随着衰减倍数的增加,CCD 接收面饱和情况逐渐缓解.对比衰减为 12 dB 与 20 dB 下的远场光斑图可知,随着衰减倍数的增加,大气湍流效应(激光在大气中传输时的光束扩展和漂移现象)也越加明显.此次实验数据的测量是在 500 m 的远场位置,测量得到 x 方向的远场发散角约为 $\theta_x = 600 \mu\text{rad}$, y 方向的远场发散角约为 $\theta_y = 250 \mu\text{rad}$.并且通过 M^2 仪测得 x 方向 $M_x^2 = 1.2$, y 方向 $M_y^2 = 1.1$.根据基模高斯光束性质 $2M^2\lambda/\pi = \theta_0\omega_0$,本文得到 x 方向束腰半径 $\omega_{0x} = 1\ 350 \mu\text{m}$, y 方向束腰半径 $\omega_{0y} = 3\ 000 \mu\text{m}$.

步骤 2):在激光器与接收屏之间的增加柱面望远镜系统对椭圆高斯光束的 x 方向进行扩束(y 方向保持不变),扩大光束 x 方向的束腰半径,从而缩小发散角,使 x 与 y 方向的远场发散角相同,从而激光光束能够远距离传输,并且在接收屏上得到的光斑呈圆形.选择焦距为 -75 mm 的柱面凹透镜与焦距为 200 mm 的柱面凸透镜作为柱面望远镜系统,并设置透镜间距为 1.1 m .然后将通过柱面望远镜系统的激光光束通过 $1:3$ 普通扩束镜进行扩束,

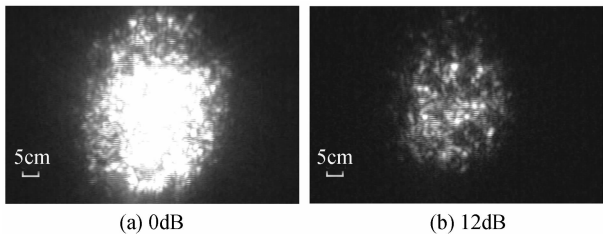
扩大 x 与 y 方向的束腰半径,从而缩小 x 与 y 方向的远场发散角.接收屏上所得的光斑如图 10~11.



(a) 0dB (b) 12dB

图 10 不同衰减下近场扩束光斑

Fig. 10 Near field beam expanding facula



(a) 0dB (b) 12dB

图 11 不同衰减下远场扩束光斑

Fig. 11 Far field beam expanding facula

图 10 与图 11 分别是经过 1:3 单波长扩束镜后的激光光束大气传输在近场(2 m)与远场(2 000 m)的光斑.实验测得经过柱面望远镜系统以及普通 1:3 扩束镜扩束后 x 方向的光束远场发散角 $\theta_{2x} = 92.8 \mu\text{rad}$, y 方向的光束远场发散角 $\theta_{2y} = 107.0 \mu\text{rad}$,此时 x 方向与 y 方向发散角比值小于 1.1,与理论值(x 方向远场发散角为 $76.7 \mu\text{rad}$, y 方向远场发散角为 $83.3 \mu\text{rad}$)较为接近.由两图可知,板条型激光器初始的椭圆高斯光束经过柱面望远镜系统与普通扩束镜后,在接收面上接收到的光斑大致呈圆形,并且其远场发散角压缩到很小,因此由近场至远场传输,接收面的激光光斑半径增加并不大.又由此两图可以看出,激光在大气中传输时,大气湍流效应引发的光束扩展和漂移现象比较明显^[16].具体分析在后续论文中展开.

3 结论

针对大功率板条型晶体激光器输出的激光束远场光斑呈椭圆形的问题,通过仿真与实验研究了采用柱面望远镜系统对椭圆光束 x 方向进行扩束,并用单波长扩束装置压缩激光 x 方向与 y 方向远场发散角的方法.最终实验结果为接收面接收到的大功率板条型晶体激光器出射光束的远场光斑呈圆形,并使得激光光束以极小发散角,并且保持一定的功率密度传输到远场接收端.

参考文献

[1] LI Jin-min, Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7):24-27.
李晋闽.高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J].

激光与光电子学进展,2008, **45**(7):24-27.
[2] GAO Qing-song, HU Hao, PEI Zheng-ping, et al. Design and experiment study of all-solid slab laser amplifier with laser power of 10kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(2): 1-4.
高清松,胡浩,裴正平,等.10kW级固体板条激光放大器设计与实验研究[J].中国激光,2012, **39**(2):1-4.
[3] CHENG Hong-ling. Theoretical and experimental exploration for radial slab solid-state laser [D]. Harbin Institute of Technology, 2009: 1-3.
成洪玲.辐射板条固体激光器实验与理论初探[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009:1-3.
[4] GONG Zhi-ben. Some research progress on high-energy laser propagation in atmosphere[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, **28**(8): 114-116.
龚知本.激光大气传输研究若干问题进展[J].量子电子学报,1999, **28**(8): 114-116.
[5] SHI Guang-yuan, YANG Xiao-ping, LIANG Yan-mei. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens[J/OL]. *Acta Photonica Sinica*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.O4.20130503.1515.010.html>.
史光远,杨晓苹,梁艳梅.基于非球面柱透镜的激光束整形[J/OL]光子学报, <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1235.O4.20130503.1515.010.html>.
[6] JIA Wen-wu, WANG Yue-feng, HUANG Feng. Beam shaping principle of hollow duct based on mirror method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9):1756-1759.
贾文武,汪岳峰,黄峰.基于镜像分析的空心导管光束整形原理研究[J].光子学报,2008, **37**(9): 1756-1759.
[7] PANG Hui, YING Chao-fu, FAN Liang-jiang, et al. Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6): 977-980.
庞辉,应朝福,范长江,等.用于光束整形的衍射光学元件的混合算法[J].光子学报,2010, **39**(6): 977-980.
[8] YU Xiao-chen, HU Jia-sheng, WANG Lian-bao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0514001-0514006.
于晓晨,胡家升,王连宝.基于液晶空间光调制器的激光束整形[J].光学学报,2012, **35**(5): 0514001-0514006.
[9] YU Xiao-chen, HU Jia-sheng, WANG Lian-bao. New methods for improving the quality of laser beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(1): 0116001-0116006.
于晓晨,胡家升,王连宝.提高光束整形质量的新方法[J].中国激光,2012, **39**(1): 0116001-0116002.
[10] 周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理[M].2版.北京:国防工业出版社,2000:69.
[11] ZHAO Shuang. Study on high power and high beam quality solid-state slab laser [D]. Ji'nan: Shangdong University, 2010: 7-15.
赵爽.高功率高光束质量全固态板条激光器的研究[D].济南:山东大学,2010:7-15.
[12] 石顺祥,马琳,王学恩.物理光学与应用光学[M].3版.西安:西安电子科技大学出版社,2010:380.
[13] 陈鹤鸣,赵新彦.激光原理及应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2009:89.
[14] CUI Guang-meng, OU Jia-ming. As for the proof that the complex-parameter of Gauss light beam satisfies with the laws of ABCD[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2004, **24**(6): 45-47.
崔光猛,欧家鸣,关于高斯光束复参量 q 满足 ABCD 定律的证明[J].云南师范大学学报,2004, **24**(6): 45-47.
[15] 竺庆春,陈时胜.矩阵光学导论[M].上海:上海科学技术文献出版社,1991:30.
[16] ZUO Hai-cheng. The research on laser spot distributing and orientation of detection system in satellite optical communications with the existence of atmospheric turbulence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 17-28.
左海成.大气湍流影响下卫星光通信探测光斑分布与定位算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010:17-28.