

文章编号: 0253-2239(2010)07-2032-05

基于液晶空间光调制器的激光束近场整形

马浩统 周 朴 王小林 马阎星 汪晓波 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 激光器输出的光束光强通常为高斯分布,但在很多实际应用中,为了提高激光系统的整体利用效率,需要将高斯分布的光束整形为空间均匀分布的平顶光束。从能量守恒定律和等光程原理出发,分析了非球面镜整形系统,得到了面型相位分布,基于此原理利用纯相位型液晶空间光调制器实现了对近高斯分布光束的光强整形,获得了近“平顶”的光束近场分布,并利用哈特曼波前传感器测量了整形后的光束波前相位分布。

关键词 激光光学;光束整形;非球面透镜;液晶空间光调制器

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2032

Near-Field Beam Shaping based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Ma Haotong Zhou Pu Wang Xiaolin Ma Yanxing Wang Xiaobo Xu Xiaojun Liu Zejin

(College of Opt-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Typical intensity distribution of laser beam is Gaussian profile. To improve the energy efficiency of the laser systems, it is necessary to convert Gaussian profiles or quasi-Gaussian profiles into uniform profiles. Based on the energy conservation and constant optical path-length principle, the spatial beam shaping system with aspheric lenses is analyzed in detail and the phase distribution for the optics is derived. In addition, a quasi-flat-top intensity distribution is realized from the quasi-Gaussian beam by phase only liquid crystal spatial light modulator. The phase distribution of the shaped beam is measured by a wavefront sensor.

Key words laser optics; beam shaping; aspheric lens; liquid crystal spatial light modulator

1 引 言

激光焊接、激光微加工、激光雷达、激光核聚变等实际应用,要求激光的光强分布基本均匀一致^[1,2]。激光器输出光束通常为高斯分布,为了增加填充因子,提高系统整体利用效率,需要将高斯光强分布整形为平顶分布。

到目前为止已经发展了多种激光束空间整形技术,如衍射光学元件光束空间整形^[3~7];双折射透镜组光束空间整形^[8,9]和振幅型液晶空间光调制器光束整形^[10]等。这些技术在一定程度上实现了光束整形,但各有优缺点,如衍射光学元件通常只能针对特定光强分布的入射光束有效,双折射透镜组和振

幅型液晶空间光调制器光束空间整形的原理是通过调整系统透射率来实现光束的空间整形,被整形光束中心对应的透射率低决定了这种方法的能量利用率不高。

利用两面非球面透镜折射实现激光束空间整形的方法,是将高斯光束中心的强光区域分摊到边缘区域,并不是通过透射率来调节光强,这种方法的能量利用率很高—理论上是可以无能量损耗的,也可以采用一块厚透镜来完成相同的功能^[11]。非球面镜镜面加工制作困难,系统一经制成,将无法改变,并且只能针对特定输入光强和输出光强分布有效。近年来随着液晶显示和超大规模集成电路技术的迅

收稿日期: 2009-09-03; 收到修改稿日期: 2009-09-27

作者简介: 马浩统(1983—),男,博士研究生,主要从事自适应光学、光束整形等方面的研究。

E-mail: mahaotong@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

猛发展,高分辨率、低能耗的纯相位型液晶空间光调制器(LC-SLM)作为波前校正器件日益受到关注^[12]。由于其可以实时编程控制,已被广泛应用于自适应光学、信息光学、微光学等领域。

本文对非球面镜光束整形系统进行了理论研究,得出了非球面镜面型相位分布,利用美国BNS公司生产的512 pixel×512 pixel纯相位LC-SLM实现了对光纤激光器的光强整形,获得了近“平顶”光强分布光束,利用哈特曼波前传感器测量了整形后的光束波前相位分布。

2 系统原理

通过非球面透镜组实现激光空间整形的基本原理最早由Frieden^[13]和Kreuzer^[14]提出,之后由Rhodes^[15]和Hoffnagle^[16]等不断完善。基本的方案有伽利略(Galilean)整形系统和开普勒(Keplerian)整形系统两种,如图1和图2所示,第一面非球面镜整形入射光束在第二面非球面镜处形成所需的光强分布,第二面非球面镜负责重新准直光束,从而保证光束在一定的传输范围内保持平顶分布。当仅需在特定位置处产生光强均匀分布光束而不需后续传输时,可以无需第二面非球面镜。

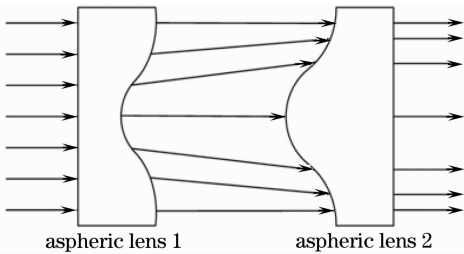


图1 Galilean非球面透镜整形系统结构原理示意图
Fig.1 Configuration of a Galilean beam shaping system

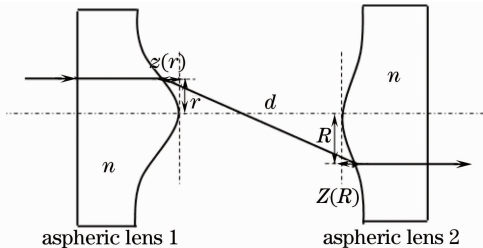


图2 Keplerian非球面透镜整形系统结构示意图,
图示一条典型光线路径
Fig.2 Configuration of a Keplerian beam shaping
system, showing the path of a typical ray

在理论分析中,基于Keplerian系统,求出其面型分布。理论上通过设计可以实现将入射光束转化为任意归一化的连续分布,这一分布函数可以是超高斯

函数,也可以是高阶费米-狄拉克(Fermi-Dirac)函数等,具体的函数形式并不重要。在文中选取Fermi-Dirac函数作为目标函数,Gaussian函数作为输入函数,其分别具有如下形式:

$$P_F(x) = \left\{ 1 + \exp \left[\beta \left(\frac{x}{R_0} - 1 \right) \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

$$P_G(x) = \exp \left(\frac{-2x^2}{\omega_0^2} \right), \quad (2)$$

式中 β 为Fermi-Dirac函数的阶数,决定了Fermi-Dirac函数曲线边缘平滑度, R_0 为Fermi-Dirac函数强度下降到峰值一半时的半径, ω_0 为入射高斯光束的束腰半径。

图2中的Keplerian非球面透镜整形系统,采用双凸透镜结构,与光轴平行的光线从第一面非球面透镜 $[r, z(r)]$ 处入射,经折射并传输一段距离后,从第二面非球面镜 $[R, Z(R)]$ 处出射,出射光线方向再次与光轴平行并且光强分布满足设计要求。忽略传输过程中的损耗,根据能量守恒定律,有如下关系:

$$\int_0^r P_G(x) x dx = \int_0^R P_F(x) x dx, \quad (3)$$

式中 r 为第一面非球面镜光束入射位置, R 为第二面非球面镜整形光束对应的出射位置。这个方程没有解析解,但是方程左右两边为单调递增的连续函数,存在唯一的数值解。这种数值解的关系表达式为

$$R = h(r). \quad (4)$$

采用Kreuzer等的处理方法^[14,16],根据斯涅尔定律和等光程原理可得出非球面镜的面型垂度分布为

$$z(r) = \int_0^r \left\{ (n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h(x) + x} \right]^2 \right\}^{-1/2} dx, \\ Z(R) = \int_0^R \left\{ (n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h^{-1}(x) + x} \right]^2 \right\}^{-1/2} dx \quad (5)$$

式中 $z(r)$ 和 $Z(R)$ 分别为第一面和第二面非球面镜的面型垂度,定义为非球面镜镜面与镜面顶点平面的距离,如图2所示, n 为所使用透镜材料的折射率。Galilean非球面透镜整形系统透镜的垂度表达式与上述Keplerian式的垂度表达式差别仅在于将(5)式中 $h(x) + x$ 和 $h^{-1}(x) + x$ 替换为 $h(x) - x$, $h^{-1}(x) - x$ ^[14,16]。

3 相位分布计算及实验研究

由以上的分析可知,确定了入射光强分布和输

出光强分布,可通过(3)和(4)式得到入射光束位置和转换后光束位置之间的对应关系,给定两面非球面透镜的距离,就可以通过(5)式计算得出非球面透镜的垂度与位置之间的关系,进而可以转化为相位分布。

3.1 相位分布计算

在以下的分析中,结合实验条件和实际需求,仅考虑光强整形。CCD 相机采集的入射光束光强分布如图 3 所示。

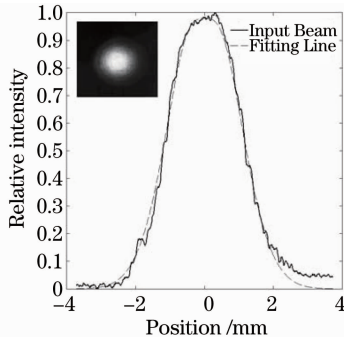


图 3 入射准高斯光强分布截面图及其灰度图
Fig. 3 Cross section of the quasi-Gaussian beam and its gray-scale image (inset)

入射光束的光强接近高斯分布, $1/e^2$ 光强处的半径约为 1.9 mm。输入光束的光强分布与高斯光束分布存在一定的误差,采用高斯光束组合对入射光束进行拟合。

$$P_1 = \sum_i e_i \exp\left(\frac{-2x^2}{w_i^2}\right), \quad (6)$$

式中 w_i 为高斯光束的束腰半径, e_i 为所对应的权重因子。根据(6)式,对入射光束进行拟合,拟合的结果如图 3 所示,较好地代表了入射光束的光强分布。

设计转换后的光强分布为 16 阶 Fermi-Dirac 函数,功率为峰值一半时半径为 1.6 mm,距离第一面非球面镜 200 mm 处光强为平顶分布,透镜材料为在 $1.064 \mu\text{m}$ 处折射率为 1.45 的熔石英玻璃,第一面透镜的有效通光口径为 7.68 mm(也为空间光调制器的有效作用口径)。基于 Galilean 和 Keplerian 整形系统具有相似的特性,仅对 Galilean 整形系统进行研究。根据非球面镜的设计原理,求得非球面镜的面型分布 $[r, z(r)]$ 离散数值解。由衍射光学可知 Galilean 整形系统第一面非球面镜的面型分布可通过(7)式转化为相位分布。

$$f_p(r) = \frac{2\pi[z_c - z(r) + nz(r)]}{\lambda}, \quad (7)$$

式中 z_c 为镜面边缘处垂度分布,即为 Galilean 整形系统 $z(r)$ 离散值中的最大值, n 为所使用透镜材料

的折射率, λ 为激光的工作波长。经计算 Galilean 整形系统第一面镜子的相位分布如图 4 所示。初始光强分布选取与入射光强比较接近的高斯光束叠加形式,基于衍射光学方法理论计算在设计位置处的光强分布^[17],如图 5 所示,所设计的整形系统可以有效地实现光强整形。

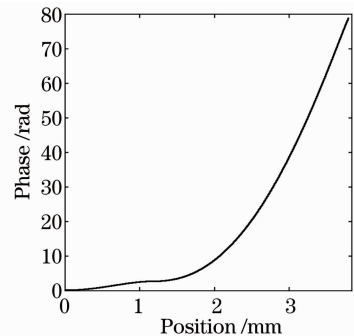


图 4 Galilean 整形系统第一面透镜相位分布图
Fig. 4 Phase distribution of the first aspheric lens of Galilean beam shaping optics

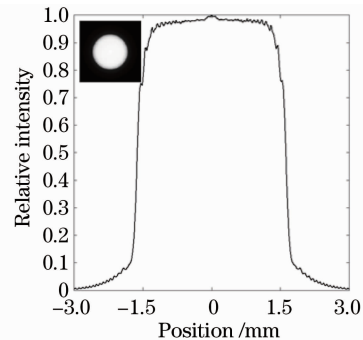


图 5 整形后径向光强分布及其灰度图
Fig. 5 Cross section of intensity distribution after the Gaussian-to-Fermi-Dirac optics and its gray-scale image (inset)

3.2 实验研究

基于以上的理论分析,可采用 1040 nm 光纤激光作为光源,实验光路布局如图 6 所示。由光纤激光器,扩束系统,二分之一波带片,纯相位型液晶空间光调制器,相机和哈特曼波前传感器等组成。相机为 AVT 公司生产的 Dolphin F-145B 型 CCD 相机, $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$,像素大小为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$,每个像素的位深为 12 bit。液晶空间光调制器为美国 BNS 公司生产的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 纯相位型液晶空间光调制器,口径为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$,单个像素大小 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。

光纤激光经过扩束(扩束后的光强分布如图 3 所示,并非理想高斯光束,且具有一定的光强起伏。)入射液晶空间光调制器,调制后的光束,传输一段距

离后经非偏振分束器进入相机,哈特曼波前传感器与相机对称放置,用来测量整形后光束的相位分布,波前传感器为 OKO 公司的 127 单元的哈特曼波前传感器。实验主要关注光强整形,所以并没有对整形后光束的相位分布进行补偿。

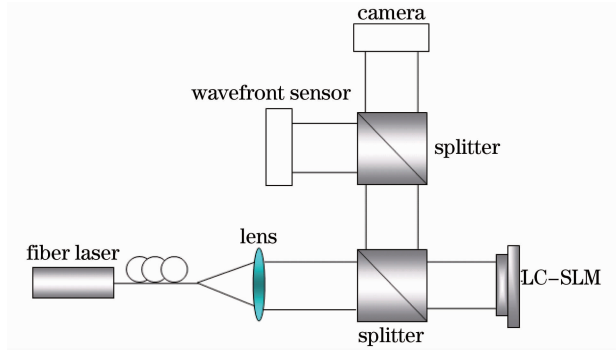


图 6 光束整形实验装置图

Fig. 6 Experimental setup for laser beam shaping

根据入射光束光强分布和需要实现的出射光束光强分布,设计非球面镜面型分布,并将其转化为相位分布,将相位分布输入液晶空间光调制器,将相机置于设定位置测量整形后的光强分布。测得光强分布如图 7 所示。

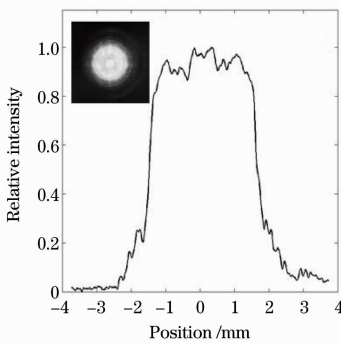


图 7 整形后的光束光强分布截面图及其灰度图

Fig. 7 Cross section of the shaped beam and its gray-scale image (inset)

整形后的光束通常以光强均匀度 S_E 和衍射效率 η 来衡量整形效果。其定义如下所示:

$$S_E = \frac{\left\{ \frac{2}{a^2} \int_0^a \left[g(x) - \frac{2}{a} \int_0^a g(x) x dx \right]^2 x dx \right\}^{1/2}}{\frac{2}{R^2} \int_0^R P_{\text{output}}(x) x dx}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{2\pi \int_0^a g(x) x dx}{W_1}, \quad (9)$$

式中 a 为所要考察的整形后光束(测得的或者计算出的)以光轴为中心的区域的半径, $g(x)$ 为测得的

或者计算出的整形后光束光强分布, W_1 为待整形光束的总能量。由(8)和(9)式,根据测得的实验数据,通过改变 a 的大小计算得出输入光束和输出光束的光强均匀度与衍射效率的关系如图 9 所示(衍射效率未记及分束镜等系统器件本身所带来的能量损失),理想情况下模拟出射光束光强不均匀度与衍射效率的关系如图 8 所示。均匀度通过均方根值(RMS)来反映。

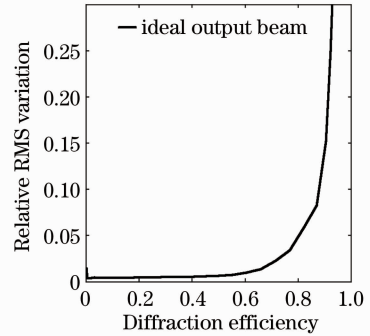


图 8 理想输出光束的均匀度和衍射效率关系图

Fig. 8 Dependence of the uniformity value of the ideal output intensity on diffraction efficiency

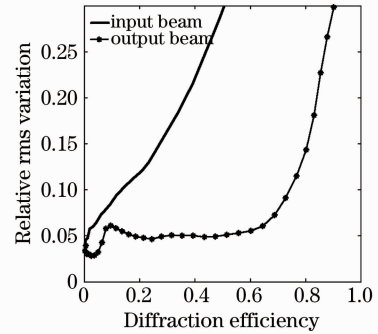


图 9 测得的入射光束和出射光束的均匀度与衍射效率的对比关系图

Fig. 9 Measured dependence of the uniformity value of the output intensity on efficiency compared with the input beam

由图 9 可知,整形后光束的 68% 的能量集中在均匀性误差小于 7% 的范围内。实验实现的光强分布与理想值存在一定的误差,主要原因为采用组合高斯光束对输入光束进行拟合,其与实际的光强分布存在一定的差别,导致所设计的相位分布与实际所需要的相位分布之间存在误差。

采用哈特曼波前传感器对整形后光束波前进行测量,其相位分布如图 10 所示。主要为离焦像差,峰谷值为 3.72λ ,均方根值为 0.782λ 。

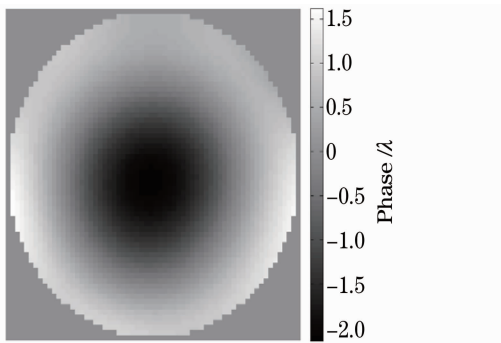


图 10 整形后光束相位分布图

Fig. 10 Phase distribution of shaped laser

4 结 论

从转换前的高斯光强分布和转换后的 Fermi-Driac 光强分布出发,利用能量守恒定律和等光程原理进行理论分析,数值计算整形系统中非球面透镜的面型函数,并将其转化为相位分布。利用纯相位型液晶空间光调制器实现了近高斯光强分布光束的光强整形,获得了近“平顶”的光束近场分布,整形后光束的 68% 的能量集中在均匀性误差小于 7% 的范围内。测量了整形后光束的波前相位分布。此种方法不需要复杂的相位恢复算法,能够满足高斯,近高斯等对称分布光束的整形要求。

参 考 文 献

- 1 Jinyang Liang, Rudolph N. Kohn, Jr. *et al.*. 1.5% root-mean-square flat-intensity laser beam formed using a binary-amplitude spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(10): 1955~1962
- 2 Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(8): 1165~1168
刘 强, 邬 融, 张晓波 等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1168
- 3 Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682~1686
林 勇, 胡家升, 吴克难 等. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1682~1686
- 4 Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing *et al.*. A novel method to improve the emission efficiency of satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(3): 581~586
俞建杰, 谭立英, 马 晶 等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 581~586

- 5 Zhang Xinping, Dong Liping, Zhang Baohua. Binary rectangular phase grating applied to spatial shaping of Gaussian beam [J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(2): 74~79
张新平, 董丽萍, 张保华. 二元矩形位相光栅用于高斯光束的空间整形 [J]. *激光技术*, 1995, **19**(2): 74~79
- 6 Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting gaussian beam into square uniform focused spot [J]. *Chinese J. Laser*, 2004, **31**(10): 1183~1187
张 艳, 张静娟, 司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- 7 M. A. Karim, A. M. Hanafi, F. Hussain *et al.*. Realization of a uniform circular source using a two-dimensional binary filter [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(10): 470~471
- 8 Ye Yidong, Lü Baida, Cai Bangwei. Temporal and spatial pulse shaping high power laser—spatial pulse shaping using a combination of birefringent lenses [J]. *Laser Technology*, 1996, **20**(6): 324~328
叶一东, 吕百达, 蔡邦维. 强激光的时间整形和空间整形—利用双折射透镜组实现激光束的空间整形 [J]. *激光技术*, 1996, **20**(6): 324~328
- 9 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704
杨向通, 范 薇. 利用双折射透镜组实现激光束的空间整形 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
- 10 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111
陈怀新, 隋 展, 陈祯培 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 11 C. Liu, S. Zhang. Study of singular radius and surface boundary constraints in refractive beam shaper design [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6675~6682
- 12 Cai Dongmei, Ling Ning, Jiang Wenhan. The performance of phase-only liquid crystal spatial light modulator used for generating zernike terms [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 897~903
蔡冬梅, 凌 宁, 姜文汉. 纯相位液晶空间光调制器拟合泽尼克像差性能分析 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 897~903
- 13 B. R. Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. *Appl. Optics*, 1965, **4**(11): 1400~1403
- 14 J. L. Kreuzer. Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired equiphase surface [P]. *US Patent* 3, 476,463. 1969
- 15 P. W. Rhodes, D. L. Shealy. Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation; their design and analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20): 3545~3553
- 16 John A. Hoffnagle, C. Michael Jefferson. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam [J]. *Appl. Optics*, 2000, **39**(30): 5488~5499
- 17 Goodman, Joseph W. Introduction to Fourier Optics [M]. McGraw-Hill, New York, 1968