

大尺寸平顶激光光束的监测补偿

赵天卓¹ 樊仲维^{1,2*} 余 锦¹ 麻云凤¹ 刘 洋¹ 张 雪¹ 闫 莹¹

(¹中国科学院光电研究院, 北京 100085
²北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要 介绍了为一个平顶激光光束放大器所搭建的监测和补偿系统。该放大器采用多级放大结构, 能够输出单脉冲能量 5 J, 光斑尺寸 50 mm×50 mm 的平顶激光光束。放大器内部的液晶光阀可以对输出光斑的能量分布进行有效的调制。监控系统与放大器中的空间滤波器相结合, 通过傅里叶像传递的原理, 将液晶光阀上的能量分布成像到监测 CCD 上。补偿系统通过将放大器输出光斑反馈到液晶光阀上, 有效的提高了输出激光光束的质量。实验结果表明, 整形后的光斑内部能量分布更加均匀, 放大器输出的平顶激光光束近场调制度为 1.64, 软化因子为 0.053。所设计的监测和补偿系统较好的实现了对光束质量的控制和改善。

关键词 测量; 监测补偿; 傅里叶像传递; 激光系统; 平顶激光光束

中图分类号 TN240 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412004

Monitoring and Compensation of Large-Size Flat-Top Laser Beam

Zhao Tianzhuo¹ Fan Zhongwei^{1,2} Yu Jin¹ Ma Yunfeng¹

Liu Yang¹ Zhang Xue¹ Yan Ying¹

(¹Opto-Electronics System Department, Academy of Opto-Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China
²Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing, 100085, China)

Abstract A monitoring and compensation system which is built for an amplifier that can generate flat-top laser beam is described. The amplifier uses a multi-level amplification structure. It can output 5 J energy of a single pulse, and the spot size of the flat-top laser beam is 50 mm×50 mm. The liquid-crystal valve in the amplifier can modulate energy distribution of the output spot effectively. The monitoring system is combined with the spatial filter in the amplifier, and by the theory of Fourier-image transfer, it can image energy distribution of the liquid-crystal valve on the monitoring CCD. The compensation system effectively improves the quality of the output laser beam by feeding back the output spot of the amplifier on the liquid-crystal valve. Experimental result shows that energy distribution of the shaped beam is more uniform, and the near-field modulation of the flat-top laser beam generated by the amplifier is 1.64, the softening factor is 0.053. The beam-quality control and improvement are well realized by the monitoring and compensation structure.

Key words measurement; monitoring and compensation; Fourier-image transfer; laser system; flat-top laser beam

OCIS codes 120.0120; 120.1880; 140.3580; 140.3538

1 引 言

由于平顶高斯光束在激光加工、激光照明和惯性约束聚变等领域有着很好的实用意义, 人们针对平顶激光光束的生成、传输和应用进行了大量的研究^[1~4]。如吕百达等^[5~7]进行了平顶高斯光束传

输、聚焦和衍射特性等方面的研究, 并得到了相应的理论计算公式。冯国英等^[8]综述了近场质量、远场质量和传输质量 3 类常见的激光光束质量评价方法, 指出了它们在平顶激光光束研究上的适用范围和局限性。刘泽金等^[9]引入了光束传输因子来评价

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-11-08

基金项目: 国家 863 计划(2009AA034701)资助课题。

作者简介: 赵天卓(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光测试方面的研究。E-mail: zhaotianzhuo@aoe.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fanzw@gklaser.com

高能激光光束质量。在应用方面,液晶光阀整形方案虽然激光透射率较低,但由于能够实现长距离的调制和动态补偿,因此近年获得了很大的关注。比如 Ma^[10]报道了基于两个液晶空间光调制器的整形方案,并且效率达到了 71.5%。在针对某放大系统的研究过程中,发现 M^2 因子、斯特雷尔比 (Strehl ratio) 和亮度这些常规光束质量参数并不能全面的表征大尺寸平顶高斯光束的质量,还需要进一步引入光强调制度、软化因子等参数进行考察。为了实现单脉冲能量从 1 nJ 到 5 J 的放大,并保证放大后光斑截面上能量分布的均匀一致,本文将液晶光阀动态补偿的平顶高斯光束整形技术与基于傅里叶像传递的平顶高斯光束多程放大技术相结合,实现了尺寸 50 mm×50 mm,双方向软化因子平均 0.053,近场调制度 1.64 的高质量平顶高斯光束的输出。

2 大尺寸平顶激光光束监测参数

为了进一步的表征大尺寸激光光束的质量,引入了光束软化因子、光斑调制度两个参量。待测激光光束的软化因子 S_{EA} 用下式表示:

$$S_{EA} = \frac{D_0 - D_F}{2D_0}, \quad (1)$$

式中 D_0 为零强度边长,按照 50 mm×50 mm 光斑 90% 面积内的各像素灰度均值 5% 所对应的最大距离计算; D_F 为全强度边长,按照 50 mm×50 mm 光斑 90% 面积内的各像素灰度均值 95% 所对应的最大距离计算。此外,由于监测用的 CCD 在感光时,存在由于暗电流、噪声和杂散光形成的背底,因此对

于获取的光斑截面图像需要首先减去背底噪声后再进行分析。背底噪声计算以全部 CCD 感光靶面灰度值为基础,并除去灰度值大于光斑 90% 面积内的各像素灰度均值 5% 的点,来求灰度均值得到。待测激光束的光斑调制度 M 用下式表示:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\text{gnd}}}{I_{\text{avg}} - I_{\text{gnd}}}, \quad (2)$$

式中 I_{\max} 为空间分布的峰值强度,为 50 mm×50 mm 光斑 90% 面积内的各像素灰度值的最大值; I_{avg} 为空间分布的平均强度,为 D_0 范围内各像素灰度的均值; I_{gnd} 为背底噪声,与前述的背底噪声的计算方法相同。为了考察光斑的空间分布情况,利用像素数大于 512 pixel×512 pixel 的 CCD 对光斑截面进行缩束监测,根据每个像素的灰度数值,统计中心光斑像素在行或列方向上叠加形成的曲线是否为平顶高斯线型。

3 监测补偿系统的技术方案

监测系统截取放大系统输出的光束,经过 F_1 , F_2 和 F_3 3 片透镜,将光斑直径缩小约 12 倍。同时 CCD 放置在放大系统的像传递面位置,来实现对系统的清晰成像,具体的放大结构及检测系统的光路如图 1 所示。系统的像传递从放大系统中的液晶光阀开始,经过空间滤波器 SF_1 、成像在液晶光阀后第一个双程放大级 Amplifier A 后的反射镜 M_1 上;然后反向经过 SF_1 和正向经过 SF_2 空间滤波器成像在第二个双程放大级 Amplifier B 后的反射镜 M_2 上;然后反向经过 SF_2 和正向经过 SF_3 空间滤波器

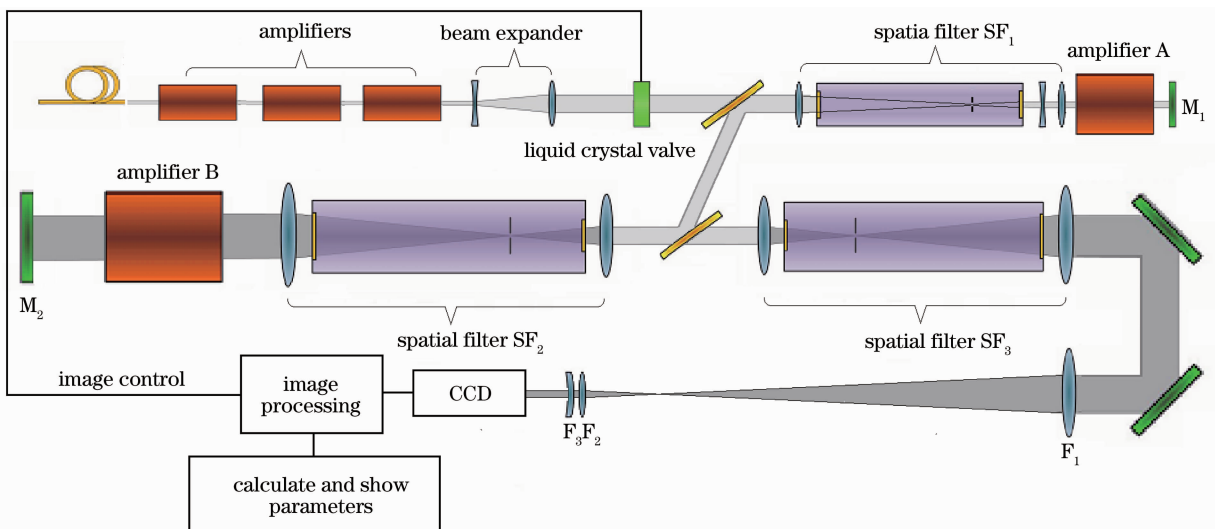


图 1 大尺寸平顶激光光束的实时监测补偿方案

Fig. 1 Solution of real-time monitoring and compensation for large-size flat-top laser beam

成像输出在放大系统出口外的 2.5 m 处。反射镜 M_1 和 M_2 可以适当的调节,来适应系统热透镜效应等现象带来的焦距变化,精确的确定相面位置。而监测系统的像传递结构以放大系统出口外 2.5 m 处的像为起点,经过 F_1 , F_2 和 F_3 组成的透镜组,成像在 CCD 的靶面上。在监测系统的装调过程中,根据傅里叶光学的原理,在放大系统出口外 2.5 m 处放置一个硬边光阑,CCD 将能够获得一个清晰的像,而如果放置在其他位置,或者 CCD 的位置不够精确,就能够看到硬边光阑形成的衍射条纹。

在监测放大系统的输出参数时,由 CCD 采集到的图像经过处理后,计算得到各个参数,同时根据输出光斑的特点,生成一个光斑图像的补像。把这个补像加载到放大系统中的液晶光阀上,通过改变光斑截面上液晶光阀各点的透射率,可以控制注入 Amplifier A 的各个点的能量值,这样就可以在一定程度上控制输出光斑的形状。虽然液晶光阀处的光斑截面能量分布经过两级放大后会发生变化,但是经过针对输出光斑截面能量分布的几次反馈修正后,可以使得系统的输出获得较好的效果。

4 监测补偿系统的分析和实验

为了精确监测输出激光光束截面上的能量分布,监测系统将放大系统内部液晶光阀上的图像补偿传递成像到了 CCD 上,并以此建立了清晰的实时补偿系统。监测系统的像传递结构包含焦距为 1822.80 mm 的透镜 F_1 (曲率半径 $R_1 = 1850$ mm, $R_2 = -1850$ mm,厚度 15 mm),和焦距为 299.7 的透镜 F_2 (曲率半径 $R_1 = 175.99$ mm, $R_2 = -1098.72$ mm,厚度 5 mm),以及焦距为 276.8 mm 的新月透镜 F_3 (曲率半径 $R_1 = 89.09$ mm, $R_2 = 239.47$ mm,厚度 5 mm)³

片透镜。透镜 F_1 和 F_2 的间距为 1970.8 mm,透镜 F_2 和 F_3 的间距为 15 mm,透镜 F_3 到 CCD 靶面的距离是 134.9 mm。这一光学结构经 Zemax 计算得到的点列图如图 2 所示。其中左侧的点列图对应中心视场,中间点列图对应 37.5 mm 物高点的视场,右侧的点列图对应 25 mm 物高点的视场。图 2 表明,即使是视场边缘的角落位置,像面上的星点像也完全会聚在衍射极限圆内,按照衍射极限圆半径 $11.89 \mu\text{m}$ 考虑,即使在透镜组的装校中存在一定的像质劣化,成像分辨率也足够保证清晰成像。

在按照上述技术方案和计算分析结果搭建好了系统以后,采用像面尺寸约 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,像素数 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,GYD-1024 型的 CCD 及 SONY LCX016AL-6 型的液晶光阀,对系统进行了实验测试,结果如图 3~6 所示。图 3 是在液晶光阀上加载均匀透射率图像时输出的光束截面能量分布情况,图 4 是液晶光阀上加载了反馈控制并关闭后续放大级的输出光斑,图 5 是在液晶光阀上加载反馈补偿的透射率分布图后,得到的输出光束截面能量分布情况。图 6 是在曝光后的像纸上记录得到的放大系统输出光斑的照片。图 3~5 上颜色的变化表示光斑截面上各点能量强度的变化,这种归一化是针对各自光斑截面上能量密度最低点和最高点进行均分形成的。由图 3 可知,不加载液晶光阀的调制时,系统的输出光斑存在一定的偏心。因此通过提高液晶光阀在对应位置的透射率,可以增强注入后续放大级的初始小信号的强度,来修正放大系统最终的输出光斑。通过对比可以发现,通过液晶光阀的反馈控制,图 5 中光斑截面上的能量分布由向一侧倾斜变成了较为均匀分布,相应的衍射现象也得到了抑制。

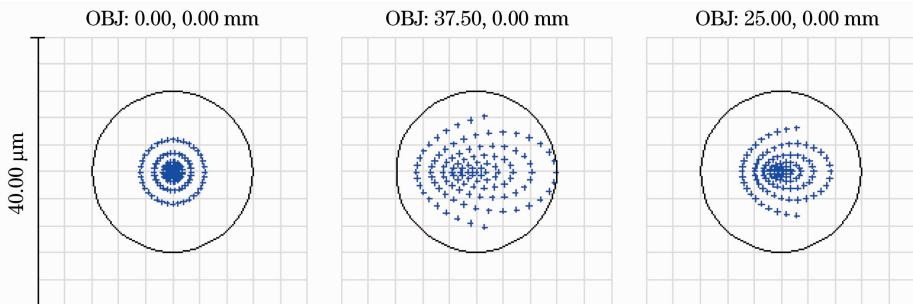


图 2 监测补偿系统像传递光斑图的计算结果

Fig. 2 Calculation result of the spot diagram for monitoring and compensation system

在进行光束软化因子、光斑调制度计算时,采用 GYD-1024 型 CCD 外同步捕捉激光光束,获得的软

化因子实验数据如表 1。其中 D_0 , D_F 的数值为按前述定义的光斑边长所对应的 CCD 像素数目,针对

6 个脉冲测试得到的软化因子均值为 0.053。根据前面所对软化因子的定义,光斑的边缘存在一个大约占光斑总宽度 10% 的过渡区,能量密度在这个范围内从零强度上升到了全强度。参考高阶高斯光束的平顶与底部宽度的比例,这里测试得到的平顶激光光束大约相当于 16 阶超高斯光束。

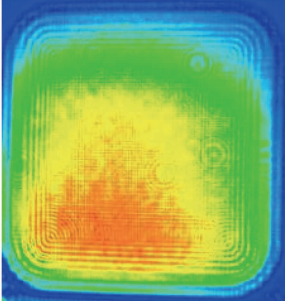


图 3 未加载液晶光阀反馈控制的放大系统输出光斑
Fig. 3 Output spot of the amplification system without the liquid-crystal-valve feedback control

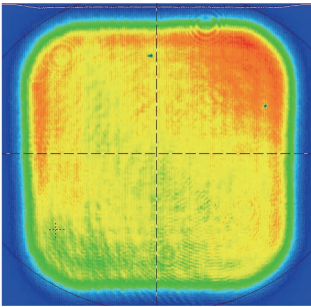


图 4 液晶光阀上加载了反馈控制并关闭后续放大级的输出光斑
Fig. 4 Output spot with the liquid-crystal-valve feedback control and closed the following amplification levels

光斑调制度的实验数据如表 2,其中 Contrast 为光斑的对比度,控制在一个始终的数值,保证光斑细节不会因为过度饱和或者过度灰暗而被掩盖。针对 6 个脉冲测试得到的近场调制度均值为 1.64。这表明光斑截面上最强点的能量密度达到了均值的 1.64 倍,在能量分布上比较接近理想的平顶高斯分布,波动产生的主要原因是液晶光阀后面的放大级增益不稳定。

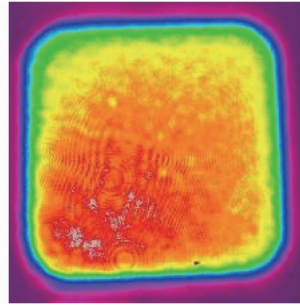


图 5 加载了液晶光阀反馈控制的放大系统输出光斑
Fig. 5 Output spot of the amplification system with the liquid-crystal-valve feedback control

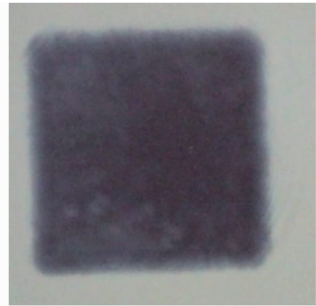


图 6 放大系统输出光斑照片
Fig. 6 Photograph of the output spot from the amplification system

表 1 软化因子测试结果

Table 1 Measurement result of softening factor

Number	X direction			Y direction		
	D_0	D_F	Softening factor	D_0	D_F	Softening factor
1	428	398	0.035	433	388	0.052
2	429	393	0.042	433	382	0.059
3	425	393	0.038	429	380	0.057
4	430	389	0.048	427	377	0.059
5	423	376	0.056	421	372	0.058
6	425	370	0.065	423	367	0.066

Everage softening factor:0.053

表 2 光斑调制度测试结果

Table 2 Measurement result of spot modulation

Number	Spot modulation	Contrast
1	1.63	0.21
2	1.71	0.21
3	1.57	0.15

续表 2

4	1.63	0.19
5	1.64	0.18
6	1.67	0.19

Everage spot modulation:1.64

5 结 论

上述测量结果表明,这种基于傅里叶像传递的监测补偿技术可以有效的改善平顶高斯光束的质量。虽然钹玻璃多级行波放大过程中存在着热效应等因素,但是对于液晶光阀调制产生的光斑能量分布,在经过两级双程放大后和空间滤波后,仍然可以有效的调制输出,这就可以保证监测的精确性,为改善输出光束质量提供依据。针对软化因子和光斑调制度的计算分析表明,通过对这两个参数的监测,可以更好的考查平顶高斯光束能量分布的状况。采用上述方案搭建的大尺寸平顶激光光束的监测补偿系统,在傅里叶像传递基础上实现了对激光光斑能量分布的精确探测,并由液晶光阀控制系统内部的光斑能量分布,实现了对放大系统输出特性的反馈补偿,这对优化平顶高斯光束的输出光束质量具有很好的实际意义。

参 考 文 献

- 1 Rao Lianzhou, Pu Jixiong. Focusing property of partially coherent flattened Gaussian beam by lens with spherical aberration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5): 705~708
饶连周, 蒲继雄. 部分相干平顶高斯光束通过球差透镜的聚焦特性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(5): 705~708
- 2 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. 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
- 3 Chen Peifeng, Qiu Junlin. The comparison of the propagation factor M^2 of various practical light beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(2): 139~143
陈培锋, 丘军林. 各种实际光束的 M^2 参数特性比较[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(2): 139~143
- 4 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing *et al.*. Beam quality of partially coherent combining of laser array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1066~1070
周 朴, 王小林, 马阎星 等. 激光阵列部分相干合成的光束质量 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1066~1070
- 5 Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 47~51
吕百达, 康小平. 对激光光束质量一些问题的认识[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 47~51
- 6 Lü Baida, Ji xiaoling, Luo Shirong *et al.*. Parametric characterization of laser beams and beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 14~17
吕百达, 季小玲, 罗时荣 等. 激光的参数描述和光束质量 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(1): 14~17
- 7 Luo Shirong, Lü Baida, Zhang Bin. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1213~1217
罗时荣, 吕百达, 张 彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1213~1217
- 8 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 9 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun *et al.*. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 773~778
刘泽金, 周 朴, 许晓军 等. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 773~778
- 10 Ma Haotong, Liu Zejin, Zhou Pu *et al.*. Generation of flat-top beam with phase-only liquid crystal spatial light modulators [J]. *Journal of Optics A*, 2010, **12**(4): 6231~6235