

高功率多程放大系统中鬼像的分析*

王 方 张清泉 朱启华 彭志涛 蒋东镔 刘红婕
李 强 张 昆 唐晓东

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

摘 要 为了有效地避免鬼像破坏, 针对采用离轴多程放大的高功率固体激光实验装置的光路特点, 利用“光路二叉树”原理和“矩阵光学”方法, 将全光路“单元化”为主放大、助推放大、反转器和输出 4 个部分进行光线追迹和鬼像分析, 给出了各个部分的主要鬼像分布. 并通过将鬼像分析的结果与前期实验中出现的现象进行对比, 证明了此种分析方法的可行性和可靠性. 从而为在今后实验装置的改造和类似系统的设计中有效的分析和规避鬼像提供了理论和实验依据.

关键词 高功率固体激光; 鬼像分析; 离轴多程放大; 光路二叉树; 矩阵光学

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

高功率固体激光装置的建造需要解决非常多的科学和技术问题^[1], 而在避免光学元件损坏方面主要要考虑控制光束质量^[2,3]、抑制自激振荡^[4]、抑制有害的非线性效应^[5~7]和规避鬼像^[8]等几个方面.

高功率固体激光装置的透射元件的表面虽然镀有减反膜, 但这些膜层并不是完美无缺的, 每一表面都反射一小部分入射光, 这些微弱的剩余反射光称为“鬼”光束, 鬼光束会聚成鬼像, 又称鬼点. 而即使每个表面的反射率小于 0.1%, 对单束能量达千焦量级的惯性约束聚变驱动器来说, 鬼像能量仍可达到焦耳量级, 极易对元器件造成损害^[9~11]. 因此对鬼像进行追迹、分析并加以规避是保证高功率固体激光装置的顺利建造和安全运行的重要手段之一.

庄大奎等^[12]利用几何推导的方法对主要采用 MOPA (Master Oscillator and Power Amplification) 放大的高功率固体激光装置神光 II 进行了鬼像计算和分析. 离轴多程放大系统相对 MOPA 系统, 光学系统更为复杂, 产生剩余反射的光学表面增多, 纯粹使用几何推导的方法将使得鬼像的追迹成为一项相当艰巨的工作. 对大型高功率激光器进行鬼像追迹时, 一般会留有很大的余量(空间余量一般在百毫米以上、强度余量则至少有一个数量级), 因此实验中对鬼像参量准确度的要求不高, 对光束质量、像差等问题都可以不加考虑. 因此可以采用“矩阵光学”理论, 用分析近轴光线的方法来分析鬼光束^[8], 这样既能在许可范围内“精确”计算鬼像的位置和能量, 又可大大提高计算速度. 为了防止遗漏鬼像, 引

入了“光路二叉树”的概念^[13], 在节点参量和数量以及所关心的鬼像阶数确定以后, 即可得到一确定的光路树, 遍历此树, 即可搜索出所有的鬼像. 邓诗涛等^[14]应用“光路二叉树”的原理设计编写了高功率激光系统鬼像分析软件, 并利用分析软件对采用离轴多程放大的高功率固体激光装置——神光 III 原型装置的初步设计光路进行了鬼像分析, 并得到了一定的结果.

本文应用“光路二叉树”的原理和“矩阵光学”的方法对同样采用离轴多程放大的某高功率固体激光实验装置进行了鬼像分析; 并将鬼像分析的结果与前期实验中出现的现象进行了对比; 并根据对比结果, 对利用这种方法对采用离轴多程放大的复杂高功率激光光学系统进行鬼像分析的可行性和可靠性进行了研究.

1 光路原理和装置特点

离轴多程放大实验平台由组合式片状放大器 (Amp1: 8 台; Amp2: 6 台)、腔内空间滤波器 SF1、传输空间滤波器 SF2 和腔反射镜 CM、电光隔离单元、自适应光学系统、光路自动准直系统、参量采集系统等组件组成, 图 1 是离轴多程放大实验平台光路结构示意图. 输入脉冲通过 SF1 小孔板 PA1 附近的注入反射镜导入, 两次经过 Amp1 放大后, 再从小孔板附近进入带有电光开关的光束反转器 BR, 返回后进行第三、第四次放大后, 经 SF1 适当扩束后进入 Amp2 进行助推放大, 最后经过传输空间滤波器 SF2 输出.

整个光路元件众多且光束走向非常复杂, 如果同时对整个系统光路进行鬼像分析, 就有可能导致计算过程非常缓慢、排除无害鬼像的工作量大量增加. 光路中空间滤波器小孔板的存在起到了隔离鬼

* 国家 863 高技术研究发展计划(2005AA845050)资助
Tel: 0816-2495413 Email: mengli_wang@263.net
收稿日期: 2005-07-26

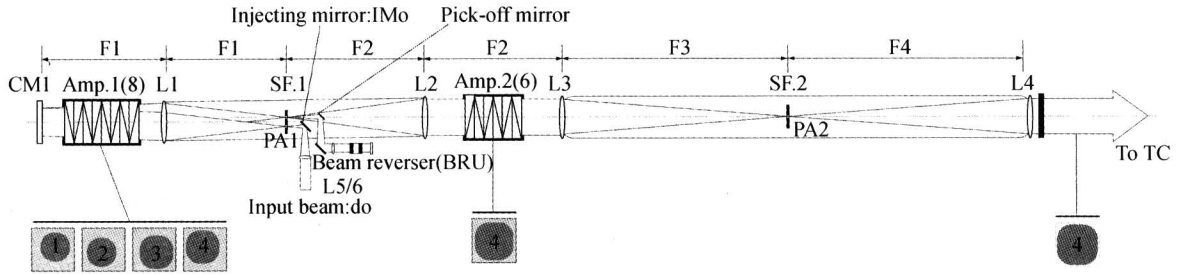


图 1 离轴多程放大系统光路示意图
Fig. 1 The schematic layout of multi-pass and off-axis amplification system

光束的作用,它可以使系统中的鬼像分析单元化^[15]. 根据这种思想,将整个离轴多程放大系统的光路分为主放大器部分、助推放大器部分、反转器部分和输出部分四个单元进行鬼像分析.

2 鬼像分析和实验验证

2.1 主放大部分

图 2 为主放大器部分,对其双程(由于三、四程光路与一、二程光路完全对称,因此双程可以有效代表四程)进行一至五阶鬼像的分析.

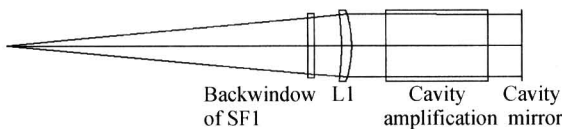


图 2 主放大器部分光路
Fig. 2 The schematic layout of the part of cavity amplification

分析结果表明,该部分有(不含被小孔板阻挡的)一阶鬼像 8 个,二阶鬼像 202 个,三阶鬼像 1910 个,四阶鬼像 17866 个,五阶鬼像 173617 个. 图 3 中标出了可能对光学元件造成危害的鬼像的位置. 从图中可知,在主放大器后窗口后 73 mm 附近是一个比较危险的区域,其中最为危险的是二、四程激光在 L₁ 前表面反射形成的一阶鬼像,该鬼像在聚焦前还曾被放大一次,危险性更高,这个位置同时还包括放大器两窗口表面反射后再被 L₁ 前表面反射形成的 8 个二阶鬼像及数量极多的高阶鬼像. 计算表明上述一阶鬼光束在放大器后窗口表面的截面积为 $2.6 \times 2.6 \text{ mm}^2$,在高通量实验中观察到该表面的膜层出现了两个面积约为 $3 \times 7 \text{ mm}^2$ 的破坏斑,如图 4,

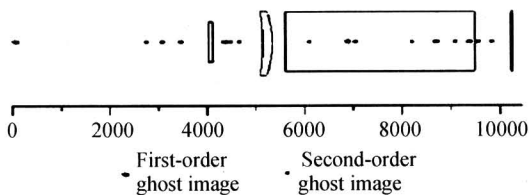


图 3 主放大器部分一、二阶鬼像分布
Fig. 3 The plot of the first and second order ghost image in the part of cavity amplification

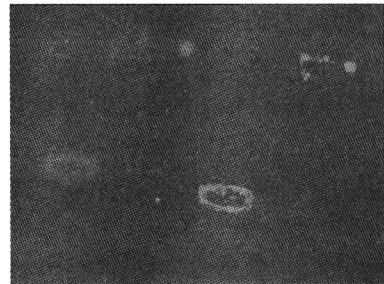


图 4 主放大器后窗口表面膜层损伤照片
Fig. 4 The picture of the damaged window of cavity amplification

这两个斑一浓一淡且有一定距离,说明它们分别是二四程激光的一阶鬼光束打出的,破坏斑不是正方形应为像差所致.

在主放大器内距前窗口 1288 mm 和 1314 mm 附近是两个比较危险的区域,其中二、四程激光在空间滤波器后窗口两表面反射形成的一阶鬼像危险性最大,这两个位置还同时各具有 8 个二阶鬼像及数量极多的高阶鬼像. 在高通量实验中观察到在该位置附近的钼玻璃出现了成丝破坏.

图 3 中坐标 0 点(小孔板)处有 4 个一阶鬼像,是放大器窗口引起的,不过由于刚好落在小孔板上,所以只要放大器窗口不严格垂直于光轴,小孔板就能将它们阻断. 这也进一步证明了小孔板的存在对鬼光束起到了一定的隔离作用.

2.2 助推放大部分

这部分为两个滤波器小孔板之间的区域,主要包括 L₂、L₃ 和助推放大器,如图 5, L₂、L₃ 都是平凸透镜.

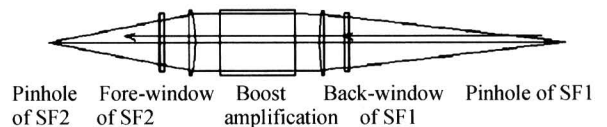


图 5 助推放大器部分光路
Fig. 5 The schematic layout of the part of boost amplification

对此段光路进行鬼像分析可知,这一部分有(不含被小孔板阻挡的)一阶鬼像 8 个,二阶鬼像 67 个,三阶鬼像 260 个,四阶鬼像 3472 个,五阶鬼像

14690 个.

从图 6 主要鬼点分布图可以看出:助推放大器后窗口前 1180 mm 附近是一个比较危险的区域,其中最为危险的是激光在 L_3 后表面反射形成的一阶鬼像,该鬼像在聚焦前还曾被放大,危险性进一步增高;助推放大器后窗口前 926 mm 和 SF1 后窗口前 225 mm 两个位置各有一个一阶鬼像,它们分别是传输空间滤波器前窗口和 L_2 后表面引起的,这两个区域也应引起高度重视;坐标 0 点(小孔板)处分别有 4 个一阶鬼像,它们是放大器窗口和 L_3 前表面引起的,不过由于刚好落在小孔板上,所以只要放大器窗口不是严格垂直于光轴小孔板就能完全将它们阻断. 图 7 为腔内空间滤波器(SF1)小孔板朝向助推放大器一侧的照片,可以清晰地看到上面有鬼像烧蚀的痕迹. 这些鬼像以及主放大器部分的此类鬼像应引起足够的重视,如果刚好落在某个小孔上,那么几乎全部的能量都会穿过小孔板到达另一组放大器,不但使增益降低,而且很可能引起元件损伤.

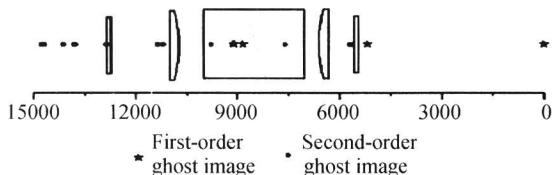
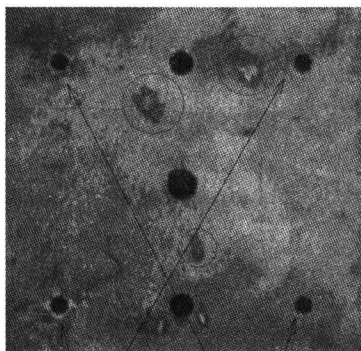


图 6 助推放大器部分一、二阶鬼像分布
Fig. 6 The plot of the first and second order ghost image in the part of boost amplification



Pinhole 1 Pinhole 2 Pinhole 3 Pinhole 4

图 7 SF1 小孔板朝向助推放大器一侧的照片
Fig. 7 The picture of the pinhole board of the SF1

2.3 反转器部分

光束反转器部分等效光路图如图 8. 这一部分内(不含被小孔板阻挡的)有一阶鬼像 6 个,二阶鬼像 20 个,三阶鬼像 73 个,四阶鬼像 316 个,五阶鬼像 1421 个. 图 9 标示出了该部分的一、二阶鬼像在

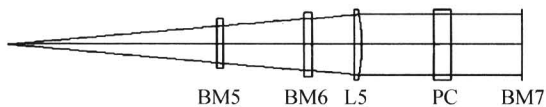


图 8 光束反转器部分等效光路
Fig. 8 The schematic layout of the part of beam reverser

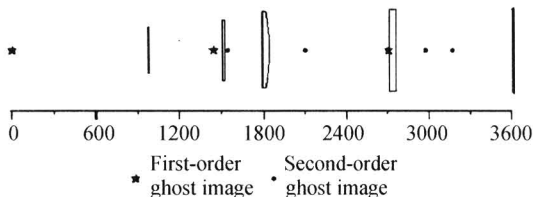


图 9 反转器部分一、二阶鬼像分布
Fig. 9 The plot of the first and second order ghost image in the part of beam reverser

等效光路中的位置.

小开关(PC)表面形成的 4 个一阶鬼像落在坐标 0 点(小孔板)处,通过调整可以用小孔板将其阻挡,图 10 为二程光在小开关表面形成的一阶鬼像的照片.

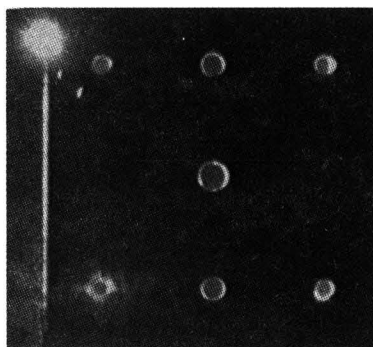


图 10 小开关的 1 阶鬼像打在小孔板上的照片
Fig. 10 The picture of the first order ghost image on pinhole board that caused by PC

如图 9,小开关前 5 mm 处有个一阶鬼像,它是三程光在 L_5 前表面反射后形成的,实验中发现小开关前窗口有破坏点,应该就是这个鬼像造成的.

2.4 输出部分

最后一部分是输出部分. 如图 11,这部分元件少但能量高,关注输出部分的鬼像分布可以为后续光路的设计提供参考.

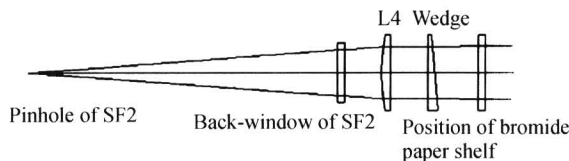


图 11 主放输出部分光路
Fig. 11 The schematic layout of the part of beam output

经分析可知,该系统内部共有一阶鬼像 4 个,二阶鬼像 12 个,三阶鬼像 42 个,四阶鬼像 138 个,五阶鬼像 560 个,图 12 是这部分光路内的一二阶鬼像分布情况. 从图 12 可以看出,由于透镜凸面向前放置,使得所有的一阶鬼像都集中在了小孔板上,这样很容易就可以避开所有的一阶鬼像. 不过,在透镜 L_4 后 1678 mm 和 1695 mm 处有两组二阶鬼像,它们分别是 SF2 后窗口前后表面反射一阶鬼光束形成的,这些鬼光束来自劈板的表面反射. 在场图架

前约 200 mm 处放置场图板,在打出的场图上可以明显地看到一个 4 mm×7 mm 的边缘清晰的强区,如图 13,这个强区应该是鬼光束打出的.

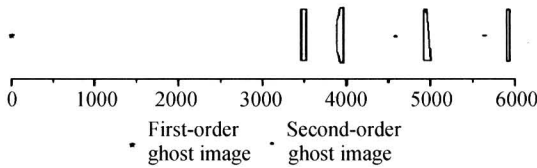


图 12 主放输出光路中一、二阶鬼像分布

Fig. 12 The plot of the first and second order ghost image in the part of beam output

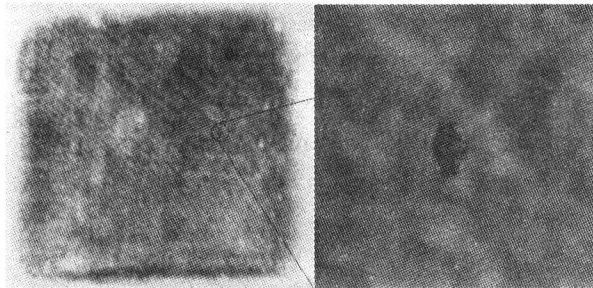


图 13 助推放大器后输出场图及其局部放大照片

Fig. 13 The picture of the output beam

3 结论

利用“光路二叉树”的原理和“矩阵光学”的方法,将高功率固体离轴多程放大激光实验装置单元化为 4 个部分进行鬼像分析,并将鬼像分析的结果与前期实验中发现的现象进行了比对.发现实验中所出现的破坏现象的位置,与计算过程中发现的鬼像位置相当吻合,证明了利用这种思路和方法来进行高功率多程放大激光装置的鬼像分析是切实可行的.并为在今后实验装置的改造和类似系统的设计中有效地分析和规避鬼像提供了理论依据.有了理论的指导,就可以通过合理的透镜设计、系统光路排布设计和将透镜倾斜一定的角度来实现规避鬼像的目标.

参考文献

- 彭瀚生,张小民,范滇元,等.高功率固体激光装置的发展与工程科学问题.中国工程科学,2001,3(3):1~8
Peng H S, Zhang X M, Fan D Y, et al. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 1~8
- 沈为民,吴泉英,薛鸣球,等.神光 III 强激光光束远场诊断系统光学设计.光子学报,2004,33(8):965~969
Shen W M, Wu Q Y, Xue M Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 965~969
- 冯迪,严瑛白,谭峭峰,等.用于光束整形的多功能衍射相位板的设计.光子学报,2003,32(8):997~1000
Feng D, Yan Y B, Tan Q F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 997~1000
- 王方,朱启华,蒋东滨,等.多程放大系统中自激振荡的分析和抑制.激光杂志,2005,26(3):19~20
Wang F, Zhu Q H, Jiang D B, et al. *Laser Journal*, 2005, 26(3): 19~20
- 景峰,张小民,朱启华,等.钕玻璃介质中强激光束传输特性的初步研究.强激光与粒子束,2000,12(5):551~555
Jin F, Zhang X M, Zhu Q H, et al. *High Power Laser and Partical Beams*, 2000, 12(5): 551~555
- 苗润才,沈常宇,叶青,等.环形斑光束在非线性克尔介质中的自聚焦效应.光子学报,2003,32(2):204~208
Miao R C, Shen C Y, Ye Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2): 204~208
- 苗润才,沈常宇,叶青,等.环形斑激光束在非线性克尔介质中环半径的偏移现象.光子学报,2002,31(7):882~886
Miao R C, Shen C Y, Ye Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(7): 882~886
- 冯国英,陈建国,曹冲,等.寻找激光系统中离轴鬼点和鬼线的矩阵方法.中国激光,2003,30(11):989~992
Feng G Y, Chen J G, Cao C, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(11): 989~992
- Hendrix J L, Schweyen J, Rowe J, et al. Ghost analysis visualization techniques for complex systems examples from the NIF final optics assembly. *SPIE*, 1998, 3492: 306
- 谭吉春,景峰,朱启华,等.多通放大器腔内的杂散光.强激光与粒子束,2000,12(2):159~163
Tan J C, Jing F, Zhu Q H, et al. *High Power Laser and Partical Beams*, 2000, 12(2): 159~163
- 王方,朱启华,张清泉,等.高功率激光装置中透镜一阶鬼点形成规律分析.激光技术,2005,29(3):334~336
Wang F, Zhu Q H, Zhang Q Q, et al. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 334~336
- 庄大奎,林尊琪,管小鹏,等.神光 II 高功率激光系统中鬼像计算与分析.光学学报,2002,22(5):582~585
Zhuang D K, Lin Z Q, Guan X P, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 582~585
- 李晓彤,岑兆丰,何志平,等.大功率激光光学系统杂散光分析的数据结构.激光与红外,2002,32(5):295~297
Li X T, Cen Z F, He Z P, et al. *Laser and Infrared*, 2002, 32(5): 295~297
- 邓诗涛,李晓彤,岑兆丰,等.神光 In II 原型装置中鬼像的近轴计算与分析.光电工程,2004,31(9):10~13
Deng S T, Li X T, Cen Z F, et al. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 10~13
- 冯国英,陈建国,马再如,等.高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找.光学学报,2003,23(5):632~635
Feng G Y, Chen J G, Ma Z R, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 632~635

The Analysis of Ghost Image in High Power and Multi-pass Amplified Systems

Wang Fang, Zhang Qingquan, Zhu Qihua, Peng Zhitao, Jiang Dongbin, Liu Hongjie,

Li Qiang, Zhang Kun, Tang Xiaodong

Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900

Received date: 2005-07-26

Abstract By analyzing the optical characteristic of the off-axis and multi-pass amplified high power solid-state laser facility, using the theory of binary tree tracing and matrix optics, and dividing the system into four parts that include cavity amplification part, boost amplification part, beam reverser and beam output part, the ghost image are analyzed and traced. Main of ghost image that are devastating are given in all parts. By comparing the analysis of ghost image with the phenomena in experiments, the analyzing means is proved feasible and dependable. The work provide basis for avoidance of ghost image damage in the latter experiments and the similar facilities.

Keywords High power solid-state laser; Analysis of ghost image; Off-axis and multi-pass amplification; Optical binary tree; Matrix optics



Wang Fang was born in 1979. He graduated in 2002 from Zhejiang University with a B. S. degree. Now he is working in the National Key Laboratory of Laser Fusion. His research interests include high power solid-state laser and optical design.