

文章编号: 0258-7025(2001)08-0677-04

高功率激光装置中的鬼点反射分析

李银柱¹ 李良钰^{1,2} 戴亚平¹ 刘 诚¹ 程笑天¹ 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光机所高功率激光物理国家实验室 上海 201800; ² 电子科技大学应用物理系 成都 610054)

摘要 介绍了高功率激光装置中的鬼点反射及其带来的破坏影响,分析并计算了神光-II装置中主放大器部分的鬼点反射,给出了避开鬼点反射损伤的方法。

关键词 鬼点反射,矩阵光学,光线追迹

中图分类号 TL 632⁺.1 文献标识码 A

Ghost Reflection Analysis for the High Power Laser System

LI Yin-zhu¹ LI Liang-yu^{1,2} DAI Ya-ping¹

LIU Cheng¹ CHENG Xiao-tian¹ ZHU Jian-qiang¹

(¹ State Key Lab of High Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

² Department of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract Ghost reflections are a major consideration in the optical design of SG-II system. Here the ghost reflections of the main laser amplifier department are analyzed and calculated. The methods to avoid the ghost damages are introduced.

Key words ghost reflection, matrix optics, ray tracing

高功率激光装置“神光-II”是为了满足激光惯性约束核聚变的需要而建造的一套大型激光装置,它包括许多光学子系统,每一个子系统又由很多光学元件组成,虽然大部分光学元件的表面都镀有增透膜,但是从这些表面的微小反射(即通常所称的“鬼点反射”)仍具有较高的能量和峰值功率,特别是这些鬼点反射光束经过一系列放大系统或聚焦系统后,将会有很大的峰值功率密度和峰值能量密度,会对各种光学元件和整个系统产生较大的破坏。鬼点反射是高功率激光装置的光学设计中需要重点考虑的问题,它将直接影响整个实验装置的规模、各光学器件间的空间间隔和各种透镜的形状,因而鬼点反射的分析和计算是一项重要的和较复杂的工作。

1 鬼点反射的分析

1.1 鬼点反射的破坏影响

“神光-II”激光装置的主要性能指标为:

输出能量	5.6 kJ (1 ns)	800 J (100 ps)	160 J (20 ps)
激光脉冲宽度	1 ns	100 ps	20 ps
输出能量不稳定性	≤ ±15%		
路 数	8 路		

从以上的性能指标中可以算出,从主激光系统中产生的 1% 的鬼点反射的能量经聚焦后将有很高的能量密度,足以产生致命的破坏作用。在各种能量密度条件下产生的破坏影响可归结为:

1) 当能量密度 > 50 mJ/cm² 时,可以从大多数物质表面释放出可被吸收的污染颗粒并沉积在光学元件表面,在强激光的作用下,将产生破坏区并逐渐扩大以导致光信号的急剧衰减;

2) 当能量密度 > 0.1 J/cm² 时,金属表面将被烧蚀或气化,这些气化的物质沉积在光学元件表面,在强激光的作用下,将产生破坏区并逐渐扩大以导致光信号的急剧衰减;

3) 当能量密度 > 20 J/cm² 时,光学薄膜将被破坏,并降低传输光束的强度和质量。此时,光学玻璃将开始气化,金属和聚合物将产生爆炸性的烧蚀;

4) 当能量密度 > 1000 J/cm² 时, 导致空气的击穿(产生等离子体), 能量将被等离子体吸收或散射, 极大地降低传输光束的强度和质量。

1.2 鬼点反射的分类

通常的鬼点反射可以分为两种, 即全口径反射产生的普通鬼点反射和部分口径反射产生的细光束鬼点反射(笔状鬼点)。

高能量密度的激光束在传输过程中, 会在各种光学元件表面产生微小的反射, 这些反射光束在传输过程中如果得到放大和聚焦, 能量密度将会变得很大, 足以产生极大的破坏。这就是普通鬼点反射, 如图 1 中所示的鬼点反射 O' 点。

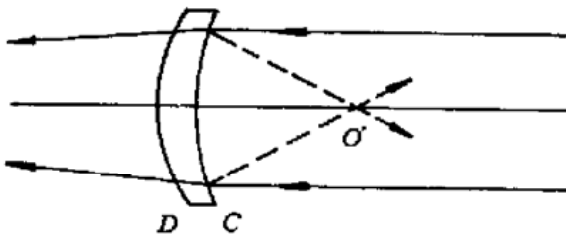


图 1 普通的鬼点反射(全口径)
Fig. 1 General ghost reflection

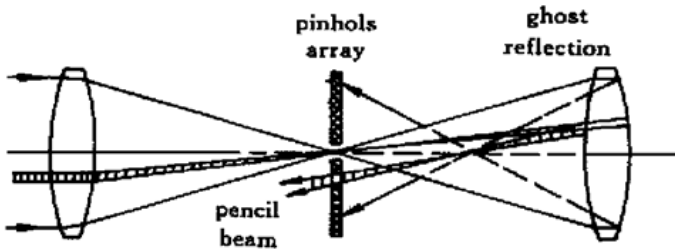


图 2 笔形鬼点反射
Fig. 2 Pencil ghost reflection

笔形鬼点反射是一种细光束鬼点反射, 也是一种特别诡异的鬼点反射, 如图 2 所示, 当一束普通的全口径鬼点反射通过一个小孔时, 鬼点反射的一部分(笔形鬼点反射)将通过小孔, 在通过放大器时能量得到不断加强, 将会对光学元件产生破坏。这是一种很难掌握和控制的鬼点反射。

2 鬼点的计算

这里主要指每一个鬼点的精确位置计算。定义 m 阶鬼点为经过 m 次反射产生的鬼点, 例如一阶鬼点经过一次反射产生, 三阶鬼点是经过三次光学表面反射形成的。

鬼点位置的计算实际上是计算光线在多个反射面之间反射后的成像问题, 因而有很多方法, 这里采

用矩阵光学的算法与光线追迹算法进行计算比对。

2.1 矩阵光学

我们首先定义一套符号系统, 光线从右 → 左行进定义为“+”, 反之为“-”。光线从右 → 左行进经过的距离为“+”, 反之为“-”。光线从右 → 左行进折射率定义为“+”, 反之为“-”。曲率半径的正和负的定义如图 3 所示。

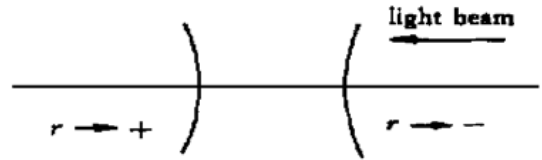


图 3 曲率半径的正和负的定义
Fig. 3 Definition of the radius sign

设入射光线为

$$M_0 = \begin{bmatrix} y \\ n \sin \theta \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} y \\ n \theta \end{bmatrix}$$

其中 y 为入射光线的矢高, θ 为入射角, 对出射光线

$$M = ZM_0 = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ n \theta \end{bmatrix}$$

Z 为光线的传输变换矩阵, 即

$$Z = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = a \times b \times c \times d \times \dots$$

a, b, c, d 为光线所经过的各光学元件的变换矩阵。

图 4 所示为高功率装置“神光 II”的主放大器的等效光路图, 从物点 O 出发, 用传输矩阵的方法来计算该系统由于各光学元件表面的微小反射产生的一些可能产生破坏作用的聚焦像点, 即鬼点 G 的位置。

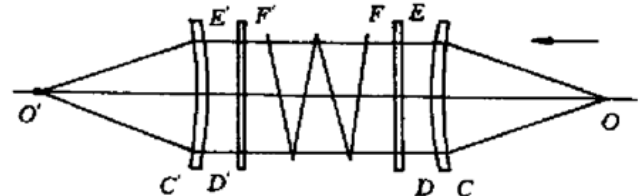


图 4 神光 II 主放大器的等效光路图
Fig. 4 Schematic of the main laser amplifier

2.1.1 一阶鬼点

光线从右向左传输时, 经窗口“E”面反射后, 形成一阶鬼点 G 。此过程的传输矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_{cc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(-n_0 + n) & 1 \end{bmatrix} \times$$

C-G 平移 r_c 折射

$$\begin{bmatrix} 1 & -l_{DC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n+n_0)}{r_D} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -l_{ED} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

D-C 平移 r_D 折射 E-D 平移

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{ED}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_0-n)}{r_D} & 1 \end{bmatrix} \times$$

E 面反射 D-E 平移 r_D 折射

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{CD}}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n-n_0)}{r_C} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{CO}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

C-D 平移 r_C 折射 O-C 平移

$$\begin{bmatrix} 0.7735 + 0.1800l_{CC} & 8.4617 + 0.6768l_{CC} \\ -0.1800 & -0.6768 \end{bmatrix}$$

其中 n_0 为光在真空中的折射率, $n = 1.5064$ 为 $1.053 \mu\text{m}$ 波长的激光在 K9 玻璃中的折射率。当在 l_{CC} 处有像点(鬼点)存在时, 必须满足矩阵元 $B = 0$, 即

$$8.4617 + 0.6768l_{CC} = 0$$

$$l_{CC} = -12.4988 \text{ m}$$

即鬼点位于 C 面右侧 12.4988 m 处。

2.1.2 二阶鬼点

光线从右向左传输时, 经 C' 面和 D' 面两次反射后, 形成二阶鬼点 G。此过程的传输矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{C'G}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(-n_0-n)}{r_{C'}} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$C'-G$ 平移 $r_{C'}$ 折射

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{l_{D'C'}}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2n}{r_{D'}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{C'D'}}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

D'-C' 平移 $r_{D'}$ 折射 C'-D' 平移

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2n}{r_{C'}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{C'D'}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n-n_0)}{r_{D'}} & 1 \end{bmatrix} \times$$

$r_{C'}$ 反射 D'-C' 平移 $r_{D'}$ 折射

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{D'D'}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n_0-n)}{r_D} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{CD}}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

D-D' 平移 r_D 折射 C-D 平移

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{(n-n_0)}{r_C} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_{CO}}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

r_C 折射 O-C 平移

$$\begin{bmatrix} 0.0465 - 0.1357l_{CC} & 9.6626 - 6.6970l_{CC} \\ -0.1357 & -6.6970 \end{bmatrix}$$

当有像点(鬼点)存在时, 必须满足矩阵元 $B = 0$, 即

$$9.6626 - 6.6970l_{CC} = 0$$

$$l_{CC} = 1.4422 \text{ m}$$

即鬼点位于 C' 面左侧 1.4422 m 处。

同理, 可以求出其他的一阶鬼点、二阶鬼点、三阶鬼点等等。

2.2 光线追迹

利用常用的光学设计软件“OSLO”, 基于光线追迹的原理方法, 重新计算了以上的鬼点反射, 得到的结果如下:

(1) 由窗口 E 反射形成的一阶鬼点为

$$l_{CC} = -12.4760 \text{ m}$$

(2) 经 C' 面和 D' 面两次反射后, 所形成的二阶鬼点为

$$l_{CC} = 1.4401 \text{ m}$$

由“OSLO”光学设计软件所计算出的(1)和(2)的结果可以看出, 光线追迹法与矩阵光学法计算出的鬼点的结果基本一致。

3 减小鬼点破坏的方法

(1) 尽可能地在光学元件表面镀透过率更高的增透膜, 减小光学元件的反射。

(2) 减小鬼点破坏的最有效的方法是略微倾斜放置可能产生破坏鬼点的光学元件, 使产生的破坏鬼点反射出主光路系统。如图 5 中所示的鬼点 O' 。

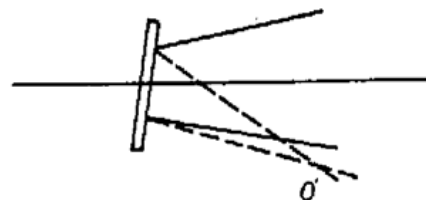


图 5 倾斜法消除鬼点反射

Fig. 5 Elimination of ghost reflection

(3) 合理地设计光学系统, 使光学元件避开鬼点反射的破坏区。

(4) 另外对光学系统中的机械支撑结构和调整结构的表面, 还要覆盖一层保护层来吸收鬼点反射的破坏影响, 以防止表面被烧蚀或气化, 这些气化的物质沉积在光学表面, 在强激光的作用下, 将产生破坏区并逐渐扩大以导致光信号的急剧衰减。

参 考 文 献

- 1 Wang Shaomin, Zhao Daomu. Principles of Matrix Optics. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994 (in Chinese)
- 2 R. E. English, C. W. Laumann, J. L. Miller *et al.*. Optical System Design of the National Ignition Facility. 1998 International Optical Design Conference, paper LFB1
- 3 R. E. English, J. L. Miller, J. Schweyen. Ghost reflection analysis for the main laser of the National Ignition Facility. 1998 International Optical Design Conference, paper LFB2

第十五届全国激光学术会议消息

中国光学学会、中国激光学会、中国物理学会、中国兵工学会、中国仪器仪表学会、华中科技大学激光技术国家重点实验室、武汉·中国光谷建设领导小组办公室、湖北省激光学会、湖北省电子学会将于2001年9月21~24日在武汉·中国光谷科技会展中心和华中科技大学学术交流中心联合举办第十五届全国激光学术会议。第十五届全国激光学术会议是新世纪的第一次盛会,将总结汇报二十世纪我国激光与光电子领域的最新成果,展望二十一世纪激光与光电子领域的发展方向,为我国激光与光电子领域新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进本领域的科技创新和成果转化。本次会议受到全国激光与光电子学术界的广泛重视和支持,来稿总数近400篇,会议规模约260人,并且安排了包括9名院士在内的15名著名专家到会作邀请报告。

本次会议将与国家科技部、中国工程院、国家外专局和湖北省人民政府、武汉市人民政府共同主办的武汉·中国光谷系列会议“中国高新技术产业与资

本市场国际论坛”、“第二届中国武汉国际机电产品博览会”、“武汉·中国光谷国际人才交流暨技术交易洽谈会”、“国家高新技术开发区所在城市市长座谈会”同期举行。欢迎国内同行踊跃参加!同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告,到会展示科技成果和发布信息。

参会者请于9月20日在华中科技大学(原华中理工大学)学术交流中心8号楼报到,报到当天将有交通车在武昌火车站(南站)和天河机场集中接待会议代表。

有关会议的详细情况(会议日程安排、会议注册费、会议食宿、会议论文目录及论文出版费等),请读者浏览华中科技大学激光技术国家重点实验室网站:<http://www.laserlab.hust.edu.cn>。大会秘书处联系人:许德胜,电话和传真:027-87543755, 87541779; E-mail: lsklab@hust.edu.cn。

第十五届全国激光学术会议节目委员会