

四程放大自动准直系统数学模型研究*

高妍琦 朱宝强[†] 刘代中 彭增云 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(2008 年 4 月 27 日收到; 2008 年 5 月 12 日收到修改稿)

针对高功率激光装置四程放大系统的特点, 利用矩阵光学原理, 建立了四程放大准直系统的数学模型; 基于此模型, 设计了四程放大系统的准直调整方案; 得出了近、远场偏移量与调整量关系的解析解.

关键词: 激光技术, 光束准直, 四程放大

PACC: 4260B, 4215, 4280B

1. 引 言

激光聚变技术的发展对光束能量与光束质量提出了越来越高的要求, 这使得高功率激光系统的光学元件成倍增长, 光路结构更加复杂. 多程放大技术以其显著的优点, 成为当今高功率激光装置放大技术的主要发展方向. 多程放大系统中的光路自动准直技术是限制其发展的主要技术之一^[1-3]. 本文深入研究了四程放大准直系统, 针对四程放大系统的特点, 利用矩阵光学的原理, 建立了四程放大准直系统的数学模型; 基于此模型, 设计了四程放大系统的准直调整方案; 得出了近、远场偏移量与调整量的解析解.

2. 四程放大系统构成

四程放大系统主要用于高功率激光装置主放模块的光功率放大, 可以实现光学器件与放大介质的多次重复利用, 有效节省了放大设备的空间和成本, 是目前高功率激光放大设备的主要发展方向^[4]. 其主要过程如图 1 所示: 从预放大器(PAM)出来的水平偏振光经过注入反射镜 $In M_1$ 和 $In M_2$ 注入到传输空间滤波器的滤波小孔 $1^{\#}$, 经过传输空间滤波器透镜 $TSF L_1$ 变为平行光束, 依次经过放大介质, 反射镜 RM_1, RM_2 , 到达偏振反射镜(Polarizer), 经偏振反射镜反射后, 进入腔空间滤波器, 经腔空间滤波器聚

焦透镜 $CSF L_1$ 会聚后, 穿过空间滤波小孔 $1^{\#}$, 经过 $CSF L_2$ 后变为平行光, 经放大介质放大, 由腔反射镜 CM_2 反射, 依次通过放大介质、腔会聚透镜 $CSF L_2$ 、空间滤波小孔 $2^{\#}$ 、腔会聚透镜 $CSF L_1$, 此时, 激活电光晶体单元(PEPC), 使光变为竖垂偏振方向, 之后光束通过偏振反射镜, 依次经过腔空间反射镜 CM_1 , 偏振反射镜, 再次经过 PEPC 变为水平偏振方向, 关闭 PEPC, 之后依次经过 $CSF L_1, 3^{\#}, CSF L_2$, 放大介质, CM_2 , 放大介质, $CSF L_2, 4^{\#}, CSF L_1$, 此时 PEPC 已关闭, 光束偏振方向依旧是水平方向, 之后由偏振反射镜反射, 经 RM_2, RM_1 , 放大介质, $TSF L_1$, 传输空间滤波器小孔 $4^{\#}, TSF L_2$, 输出到终端光学系统. 准直过程中, 用插入在腔空间滤波器小孔 $2^{\#}, 3^{\#}$ 处的半波片来代替 PEPC, 转换光束的偏振方向, 来实现光束的导入与导出.

由于振动、热漂移、机械蠕变等因素影响, 光束随着时间的变化, 存在较大的漂移, 这就要求在每次打靶前, 必须对光路进行重新调整, 尤其是对焦斑相对于滤波小孔的位置进行调整. 准直系统主要任务包含以下几点:

1) 光束准确注入, 即调整注入反射镜 $In M_1$ 和 $In M_2$, 使光束焦斑准确注入到传输空间滤波器的滤波小孔 $1^{\#}$, 同时满足近场要求, RM_1 后设有近场基准. 滤波小孔直径为 2 mm, 要求注入精度优于小孔直径的 5% (0.1 mm).

2) 光束同时准确穿过腔空间滤波器的 4 个滤

* 国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2007SQ804)和中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

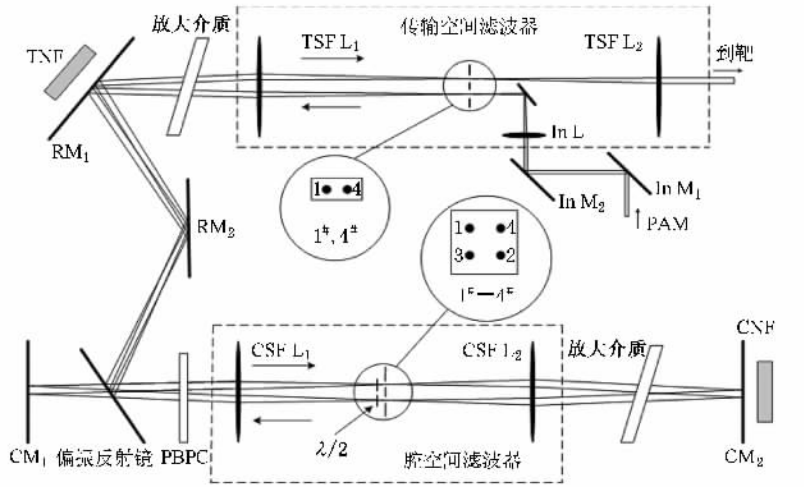


图 1 四程放大系统结构

波小孔,其通过同时调整 RM_1, RM_2, CM_1 和 CM_2 来实现,精度优于孔直径的 5%,同时满足近场要求(在 CM_2 后设有近场基准).

3) 光束准确穿过传输空间滤波器滤波小孔 $4^\#$,精度优于小孔直径的 5%,同时满足近场要求.

由此可见,系统的准直调整存在很大的关联性,难度非常之大,调整方法不当,往往很难同时满足以上任务或用时过长,如何准确、高效地实现准直调整,成为四程放大系统发展的主要难点之一.

3. 四程放大准直系统数学模型建立

为了解决四程放大系统的准直调整问题,本节详细研究了四程放大系统的特点,应用矩阵光学原理,建立了准直系统的数学模型,分为腔空间滤波器准直调整模型和传输空间滤波器准直调整模型.

3.1. 腔空间滤波器准直调整模型

为了便于分析首先讨论腔空间滤波器的准直模型.腔空间滤波器是四程放大的主要承担着,是准直调整的难点所在.为了简化分析,我们先对二维情况进行建模.对于二维情况,不同位置的光束信息可以用 $\begin{pmatrix} r_i \\ \theta_i \end{pmatrix}$,其中 r_i 表示光束上某点相对于光轴的位置, θ_i 表示光束相对于光轴的夹角.腔空间滤波器各部分参数如图 2 所示,两个透镜的焦距均为 f .光路计算均接近轴、薄透镜进行近似.光束经过 RM_1 和 RM_2 反射后,到达偏振反射镜,经其反射后,

反射点的光束信息为 $\begin{pmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix}$.第一程中 CSF L_1 后表面处 $\begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$ 、滤波小孔 $1^\#$ 处 $\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix}$,CSF L_2 后表面 $\begin{pmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix}$,反射镜反射后的表面处 $\begin{pmatrix} r_4 \\ \theta_4 \end{pmatrix}$ 的表达式分别如下:

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = M_3 \begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

$$\begin{pmatrix} r_4 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = M_4 \begin{pmatrix} r_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 2\Delta\theta_2 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

其中, $M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_2 = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_4 = \begin{pmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\Delta\theta_2$ 为 CSF L_2 相对于垂直方向转过的角度^[5].

经过一系列计算、化简后可得如下表达式:

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f\theta_0 \\ -\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_0 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} r_4 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_2 + f\theta_2 - \frac{l_3 r_2}{f} \\ 2\Delta\theta - \frac{r_2}{f} \end{pmatrix}. \tag{6}$$

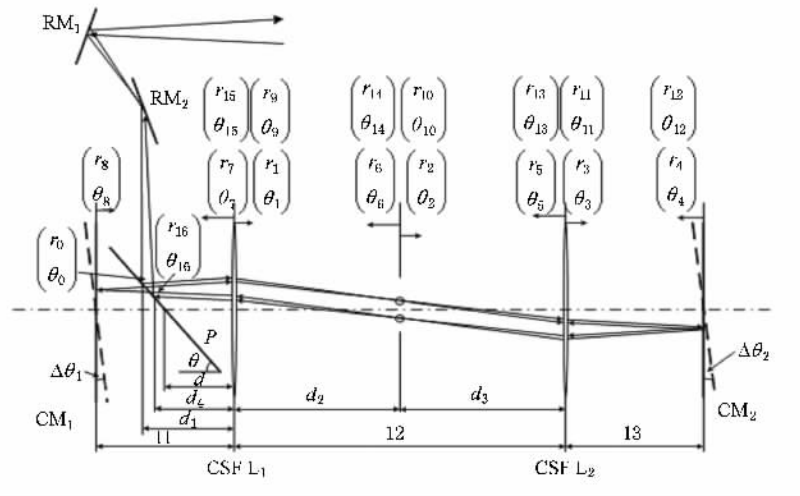


图2 腔空间滤波器模型

对于第 2 程光束而言经过 2# 孔和经 CSF L₁ 反射后的光束信息经计算、化简后分别为

$$\begin{pmatrix} r_6 \\ \theta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_2 + 2\Delta\theta_2 f \\ \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_2}{f}\right) - \theta_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} r_8 \\ \theta_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_6 + f\theta_6 - \frac{l_1 r_6}{f} \\ 2\Delta\theta_1 - \frac{r_6}{f} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

同理,对于第 3 程、第 4 程以及出射光束而言,也可以得出类似的表达式:

$$\begin{pmatrix} r_{10} \\ \theta_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_6 + 2\Delta\theta_1 f \\ \left(1 - \frac{l_1}{f}\right)\left(2\Delta\theta_1 - \frac{2r_6}{f}\right) - \theta_6 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} r_{12} \\ \theta_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{10} + f\theta_{10} - \frac{l_3 r_{10}}{f} \\ 2\Delta\theta_2 - \frac{r_{10}}{f} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} r_{14} \\ \theta_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_{10} + 2f\Delta\theta_2 \\ \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_{10}}{f}\right) - \theta_{10} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} r_{16} \\ \theta_{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{14} + f\theta_{14} - \frac{r_{14} d_4}{f} \\ -\frac{r_{14}}{f} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

由计算结果可以得出对于第 1 程光束而言,其焦斑位置

$$r_2 = f\theta_0. \quad (13)$$

当四程放大中透镜的焦距一定时, r_2 与入射角成正比. 通过调整注入光线的注入角, 就可以实现 1 程焦斑的精确穿孔. 当焦斑精确穿过 1 孔中心时, 注入光束的方向 θ_0 唯一, 但位置 r_0 不唯一. 1 程光束到达腔反射镜 CM₂ 时

$$r_4 = r_2 + f\theta_2 - \frac{l_3 r_2}{f}. \quad (14)$$

假设 1 程光束焦斑精确调整到 1 孔中心时, r_2 为确定值, f, l_3 均为常量, 则 r_4 与 θ_2 为线性关系, 可以通过调整 θ_2 来调整 r_4 的位置. 又因为

$$\begin{aligned} d_1 &= d + r_0 \text{ctg}\theta, \\ \theta_2 &= -\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_0. \end{aligned} \quad (15)$$

代入 r_4 表达式可得

$$\begin{aligned} r_4 &= r_2 - \frac{l_3 r_2}{f} + f\left(-\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_0\right) \\ &= r_2 - \frac{l_3 r_2}{f} + f\theta_0 - d\theta_0 - (\theta_0 \text{ctg}\theta + 1)r_0. \end{aligned} \quad (16)$$

上文已提到当第 1 程光束焦斑精确穿过 1 孔中心时, 注入光束的方向唯一, 即 θ_0 为某一确定常数, 可见 r_4 与注入光束注入位置 r_0 为线性关系.

如果在 CM₂ 处设置近场基准, 使 r_4 与基准重合, 输入光束就具有唯一性. 基准设在光轴上, 即 r_4 , 入射光光束信息通过解(13), (16)组成的方程组可得

$$\begin{pmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2fr_2 - l_3 r_2 - dr_2}{r_2 \text{ctg}\theta + f} \\ \frac{r_2}{f} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

可见,在近场基准设置在 CM_2 后的光轴上,即 $r_4=0$ 时,第 1 程光束的调整,完全依靠反射镜 RM_1 和 RM_2 来实现. 通过调整 RM_2 首先使 θ_0 满足要求,再同时调整 RM_1 和 RM_2 ,保证 θ_0 不变的前提下,满足 r_0 的要求,即可完成第 1 程光束的准直调整.

对于 2 程光束而言,焦斑位置为

$$r_6 = -r_2 + 2\Delta\theta_2 f. \quad (18)$$

可见,第 2 程光束焦斑的位置只与腔反射镜相对于垂直方向的转角 $\Delta\theta_2$ 有关,其余均为常量. 可以通过调整腔反射镜 CM_2 来实现 2 程光束焦斑的精确穿孔,对于 1 程没有影响.

2 程光束到达腔反射镜 CM_1 时的光束位置

$$r_8 = r_6 + f\theta_6 - \frac{l_1 r_6}{f}. \quad (19)$$

如果 2 程焦斑精确通过滤波器小孔, r_6 就为定值,因为 $\theta_6 = \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_2}{f}\right) - \theta_2$, $\theta_2 = -\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_0$, $\theta_0 = \frac{r_2}{f}$, 代入计算得

$$r_8 = r_6 - \frac{l_1 r_6}{f} - 2r_2 + \frac{2r_2 l_3}{f} + r_0 - r_2 + \frac{r_2 d_1}{f} + (2f - 2l_3)\Delta\theta_2. \quad (20)$$

由上文讨论可知, r_8 仅与腔镜 CM_2 调整角 $\Delta\theta_2$ 相关,且为线性关系,其他参数均为常数. 并且当 2 程精确穿孔,且近场与 CM_2 后的近场基准重合时,(20)式右端参数均为确定值,所以 r_8 为唯一确定值.

2 程光束经腔镜反射镜 CM_1 反射后进行第 3 程传播,其焦斑位置

$$r_{10} = -r_6 + 2\Delta\theta_1 f. \quad (21)$$

可见,第 3 程光束的焦斑位置仅与腔镜 CM_1 的调整角度 $\Delta\theta_1$ 有关,且为线性关系. 可以通过调整腔反射镜 CM_1 来调整焦斑位置,使之精确通过滤波器小孔中心.

第 3 程光束到达腔反射镜 CM_2 时,光束中心位置

$$r_{12} = r_{10} + f\theta_{10} - \frac{l_3 r_{10}}{f}. \quad (22)$$

把

$$\theta_{10} = \left(1 - \frac{l_1}{f}\right)\left(2\Delta\theta_1 - \frac{2r_6}{f}\right) - \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_2}{f}\right) + \left[-\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_1\right]$$

代入(22)式

$$r_{12} = r_{10} - \frac{l_3 r_{10}}{f} + f\left[\left(1 - \frac{l_1}{f}\right)\left(2\Delta\theta_1 - \frac{2r_6}{f}\right) - \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_2}{f}\right) - \frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\theta_1\right]. \quad (23)$$

又因为 $r_4 = r_2 - \frac{l_3 r_2}{f} + f\left[-\frac{r_0}{f} + \left(1 - \frac{d_2}{f}\right)\theta_0\right]$, 且精确穿孔时 $r_{10} = r_2$, 当取 $l_1 = l_3 = f$, 即把四程放大系统光路设计为 $4f$ 系统时,可以得到 $r_{12} = r_4$. 可见,左右两个腔镜的转角 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 不影响腔镜处光束的近场位置,即四程放大光路中,光束的近场位置只与光束注入时的光束信息有关(前文已详细讨论了影响近场的因素),与腔镜的转角无关,这一结论对于四程光路准直调整意义重大,它表示着,一旦第 1 程光路近、远场调整完成之后,第 2, 3, 4 程光束的近场信息是受到远场位置控制的,只要 2, 3, 4 程远场位置满足要求,近场无需调整,自动满足系统要求.

对于第 4 程光束而言,其焦斑处光束信息为

$$\begin{pmatrix} r_{14} \\ \theta_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_{10} + 2f\Delta\theta_2 \\ \left(1 - \frac{l_3}{f}\right)\left(2\Delta\theta_2 - \frac{2r_{10}}{f}\right) - \theta_{10} \end{pmatrix}. \quad (24)$$

因为 $r_{10} = r_2$, 所以 $r_{14} = -r_2 + 2f\Delta\theta_2 = r_6$, 如果 2 程已经调节准确,即 2 程光束精确通过滤波器小孔中心,此时四程光束也必然精确通过滤波器小孔中心. 以上推导均基于 4 个空间滤波器滤波小孔以光轴为中心,成轴对称分布.

输出光束信息经计算、化简为

$$\begin{pmatrix} r_{16} \\ \theta_{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{14} - \frac{r_{14}}{f}d_4 + r_0 - \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)f\theta_0 \\ -\frac{r_{14}}{f} \end{pmatrix}. \quad (25)$$

准直完成之后, r_{14}, r_0, θ_0 均为唯一确定的值,因此,输出光束的位置信息和方向信息均为唯一确定值. 这一结论使光束导出的调整得到了极大的简化.

3.2. 传输空间滤波器准直调整模型

传输空间滤波器准直调整模型主要包含传输空间注入光学系统和腔空间注入导出光学系统. 两者均可简化为对两块反射镜对的建模. 本文不再详细推导,只给出结论.

传输空间注入光学系统远场变化量 Δr 与反射镜调整的关系是

$$\Delta r = 2f_1(\Delta\theta_4 - \Delta\theta_3). \quad (26)$$

当远场调整完成后,即光束精确穿过传输空间滤波器小孔 1# 后,其近场变化量 Δd 与反射镜调整量的关系是

$$\Delta d = \frac{f_2}{f_1} \times L \times 2\Delta\theta_3. \quad (27)$$

此时需同时调整 $\text{In } M_2$ 转过相同的角度保证在调整 $\text{In } M_1$ 时,焦斑精确穿过传输空间滤波器小孔 1#。(26),(27)式中各参数如图 3 所示, f_1 为注入透镜 $\text{In } L$ 的焦距, f_2 为传输空间滤波器透镜 $\text{TSF } L_1$ 的焦距。

腔空间注入导出光学系统也具有相同的结论,不再说明。

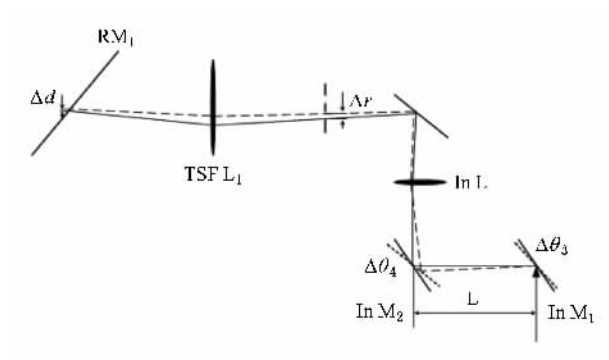


图 3 注入光学系统

4. 四程放大系统准直方案设计

根据以上推导结论,四程放大光路系统的准直调整方式可总结为以下几点:

首先,注入光束调整,调整注入反射镜 $\text{In } M_2$,实现光束精确通过传输空间滤波器小孔 1#,之后保

证 $\text{In } M_1$ 和 $\text{In } M_2$ 夹角不变的前提下,调整 $\text{In } M_1$,实现光束近场与 RM_1 后的近场基准重合。

接下来,采用同样的方法实现四程放大系统光束注入的调整:调整反射镜 RM_2 ,使 1 程光束焦斑中心通过空间滤波器小孔 1# 中心,之后调整近场位置,转动反射镜 RM_1 和 RM_2 ,始终保持两者夹角不变,即保证 1 程光束远场位置不变的前提下,使 1 程光束的近场位置与 RM_2 后的近场基准重合。

其次,调整第 2 程远场位置,调整腔空间滤波器的腔反射镜 CM_2 ,使光束准确通过滤波器小孔 2;之后,调整第 3 程远场位置,调整空间滤波器腔反射镜 CM_1 ,使第 3 程光束焦斑精确通过滤波器小孔 3 的中心。

最后,对第 4 程光束而言,其光束通过腔反射镜 CM_2 反射后,焦斑会自动通过滤波器小孔 4 的中心,最终输出,(25)式分析表明,输出光束的信息唯一确定,无需调整,既可精确到达传输空间滤波器的小孔 4。以上各步的偏移量与调整量的解析解如文中所述。

5. 结 论

模型分析表明,四程放大系统的准直调整在光路设计为 $4f$ 系统时得到了很大的简化,在第 1 程调整完毕之后,2,3 程无需近场调整,只需实现远场调整即可,4 程光束无需调整即可精确通过腔空间滤波器小孔 4,并且各程均可实现独立准直调整,相互影响较小;注入光学系统的远、近场调整也可以实现独立调整;4 程准直完成之后,输出光束具有唯一确定性,无需调整,即可精确穿过传输空间滤波器的滤波小孔 4。三维调整可以分解为两个二维调整分别采用本文所述的方法完成准直调整。

- [1] Zacharias R A, Beer N R, Bliss E S, Burkhart S C, Cohen S J, Sutton S B, Van Atta R L, Winters S E, Salmon J T, Stolz C J, Pigg D C, Arnold T J 2004 *SPIE* **5341** 168
- [2] Lü F N, Liu D Z, Xu R F 2005 *Optical Technique* **31** 335 (in Chinese) [吕凤年、刘代中、徐仁芳 2005 光学技术 **31** 335]
- [3] Liu D Z, Xu R F, Fan D Y 2004 *Journal of Optoelectronics Laser* **16** 1161 (in Chinese) [刘代中、徐仁芳、范滇元 2004 强激光与粒

子束 **16** 1161]

- [4] Zacharias R A, Beer N R, Bliss E S, Burkhart S C, Cohen S J, Sutton S B, Van Atta R L, Winters S E, Salmon J T, Stolz C J, Pigg D C, Arnold T J 2004 *Optical Engineering* **43** 2873
- [5] Wei G H 1995 *Matrix Optics* (Beijing: The House of Ordnance Industry) p33—50 (in Chinese) [魏光辉 1995 矩阵光学(北京:兵器工业出版社)第 33—50 页]

Study of mathematical model for auto-alignment in four-pass amplifier^{*}

Gao Yan-Qi Zhu Bao-Qiang[†] Liu Dai-Zhong Peng Zeng-Yun Lin Zhun-Qi

(*Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China*)

(Received 27 April 2008; revised manuscript received 12 May 2008)

Abstract

Beam automatic alignment system is used to implement beam adjustment. Basing on the principle of matrix optics, the mathematical model for auto-alignment in four-pass amplifier is built by analyzing the properties of this system. Using this model, the scheme of beam alignment is designed, and the analytical solutions of the amounts of near field adjustment and far field adjustment are obtained, respectively.

Keywords: laser technique, beam alignment, four-pass amplifier

PACC: 4260B, 4215, 4280B

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007SQ804), Japan-Korea-China Cooperative Project on "High Energy Density Science for Laser Fusion Energy".

[†] Corresponding author. E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn