

# 用于激光核聚变装置的光路自动准直

陈庆浩 徐仁芳 彭增云 诸彩龙 庄亦飞

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 介绍了用于激光核聚变装置光路自动准直系统, 讨论了光束位置探测器, 激光器, 微机等技术问题。实验结果是自动光轴调整精度为光束直径的 $\pm 1\%$ 。

**关键词** 光束位置探测器, 激光器, 微机。

核聚变激光装置出射的光束一般是长距离传输, 并采用多路光束结构, 光路中有多种光学元件, 光轴的人工调整工作繁重, 且精度不高。为了解决这个问题, 高功率激光装置用光电探测光束位置, 并用微机控制驱动伺服反射镜, 进行光轴自动调整, 即光路自动准直<sup>[1, 2]</sup>。作者在光电探测器, 准直光源, 微机控制等方面、激光装置部分光路上作了些研究, 取得了结果, 并将在核聚变激光装置上全面使用光路自动准直, 以期进一步提高装置调整精度。

## 1 两个振荡器光轴的同轴调整

激光装置光路准直要求从主振荡器光束开始, 经过激光放大器系列到末级输出, 光束角移动小于 $5'$ 。光束在长距离传输中, 每一个连接部分, 都要对光束进行探测、调整。为了使每一个探测器都接受到足够的激光功率, 采用专用的准直激光振荡器, 在光路自动准直调整结束后, 要将激光主振荡器光束自动耦合到主光路中去, 且保证一定的精度。这就需要两个振荡器光轴自动调整的装置。其装置如图1所示。

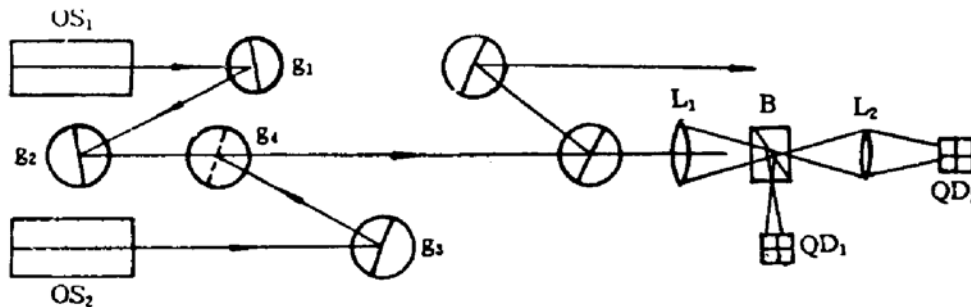


Fig. 1 The arrangement of co-alignment between the master oscillator and the alignment oscillator

os<sub>1</sub>: alignment oscillator, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>: lens, OS<sub>2</sub>: master oscillator, QD<sub>1</sub>, QD<sub>2</sub>: quadrant detector, g<sub>1</sub>, g<sub>2</sub>, g<sub>3</sub>, g<sub>4</sub>: mirror 1, mirror 2, mirror 3, removeable mirror 4

准直激光振荡器产生的激光束经  $g_1$ 、 $g_2$  伺服反射镜反射、准直物镜  $L_1$  分为远场和近场, 远场用四象限管探测器  $QD_1$  监测光束角移, 近场用四象限管探测器  $QD_2$  监测光束平移。 $g_1$ 、 $g_2$

一旦产生变化,  $QD_1$  和  $QD_2$  就有误差信号, 将由计算机控制  $g_1$ 、 $g_2$ , 使光束恢复原来位置。当使用主振荡器  $OS_2$  时, 将伺服反射镜  $g_4$  推入光路依照上述程序进行光轴自动调整, 使其光轴与  $OS_1$  相一致。一般说来, 两个振荡器光斑轮廓并不一致, 光斑的能量分布也不都很均匀, 且能量分布又是逐日不同。四象限管探测的是能量中心而要求的是轮廓中心, 轮廓中心和能量中心有一定偏差。尽量提高两振荡器的光束质量, 这个要求和激光核聚变总体要求是一致的。再就是把光束扩束 50 倍, 即直径 100 mm, 用光栏切取中间 20 mm 的光斑, 其均匀性大大提高, 通过以上两个措施, 光束轮廓中心和能量中心的偏差得到显著改善, 通过计算机数次反馈调整, 光束中心的精度是其直径的  $\pm 1\%$ , 光束角移精度  $< 10'$ 。

## 2 放大器链光束中心的调整

以物镜和四象限管组成近场探测器, 探测光束中心位置, 计算机反馈控制光束, 使光束中心精度在  $\pm 1\%$ 。只有各级放大器都保证该精度, 末级输出光束角精度才能提高。

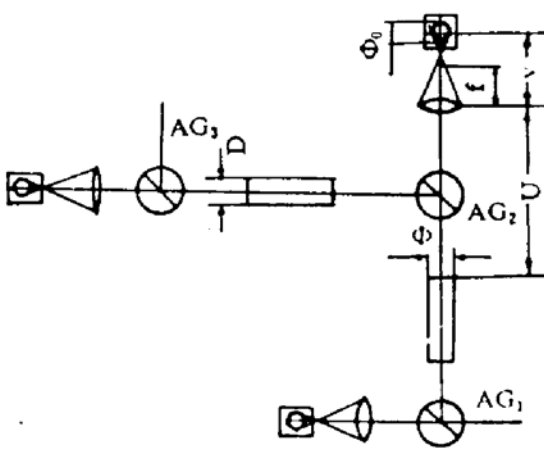


Fig. 2 The arrangement of amplifier chain alignment

放大器光束调整程序: 光路如图 2 所示。振荡器激光经伺服反射镜  $AG_1$  反射, 使光束通过放大器, 再由  $AG_2$  反射镜反射, 光束进入下一个放大器。在  $AG_2$  后面 (透过率 1%) 配置四象限管近场光束探测器, 探测  $AG_1 - AG_2$  光束位置, 根据四象限管上光束中心的偏离, 微机计算步进马达的步进数驱动  $AG_1$ , 光束位置进入误差范围内, 调整结束。以此类推, 调整  $AG_2$ , 使下一光束中心调整到光轴中心。调整过程中, 还需要  $AG_1$  和  $AG_2$  联调, 使光束角移和平移在误差范围内。

近场光学参数的确定。设放大器某一参数点, 例如以激光棒末端  $\phi$  为参考点, 相当人工调整时的观察点, 以此为物, 在焦距为  $f$  物镜后光斑  $\phi_0$  为像。则物距为  $u$ , 像距  $v$  和焦距  $f$  的关系为:  $1/u + 1/v = 1/f$ 。物的放大倍数为  $\beta = \phi/\phi_0 = u/v \approx u/f$ 。光束位置的变化相当于物的高度的变化, 用  $\Delta\phi$  表示。像也随着变化, 用  $\Delta\phi_0$  表示, 其关系为  $\Delta\phi/\phi = \Delta\phi_0/\phi_0$ ,  $\Delta\phi = \phi \times \Delta\phi_0/\phi_0$ 。

系统探测和调整精度是  $\pm 1\%$ , 因此光束中心的调整偏差是光束直径的  $\pm 1\%$ , 即  $\Delta\phi = \pm \phi \times 1\%$ 。在光束传输距离较远时, 光功率弱, 探测的光电信号信噪比较小, 系统探测和调整精度是  $\pm 2\%$ , 那末光束中心调整偏差是光束直径的  $\pm 2\%$ 。近场探测光束角移及其精度的确定。光束调整后, 必须要知道它的传输方向, 即光束角移。已知光束调整精度  $\Delta\phi$ , 是很容易求得光束角移  $\delta$  的。但光路中是否存在空间滤波器, 光束角移的求法是不一样的。

### 2.1 光路中无空间滤波器时光束角移

$$\delta = \Delta\phi/L, \quad \text{当 } \Delta\phi = \pm \phi \times 1\% \text{ 时} \quad \delta = \pm \phi \times 1\%/L.$$

式中  $L$  为反射镜之间距离, 即光路长度。

### 2.2 光路中有空间滤波器时光束角移 $\delta$

如图 3 所示, 设空间滤波器的出射角为  $\delta_1$ , 则它的入射角为  $(\phi_2/\phi_1)\delta_1$ ; 那末光束末端的偏移量  $\Delta\phi_2$  和角度  $\delta$  分别为:

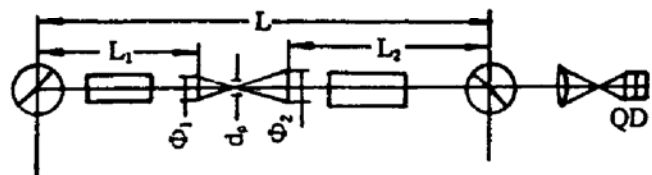


Fig. 3 The beam alignment with spatial filter

$$\Delta\phi_2 = [L_1(\phi_2/\phi_1)\delta_1](\phi_2/\phi_1) + L_2\delta_1;$$

$$\delta = \Delta\phi_2/[L_1(\phi_2/\phi_1)^2 + L_2].$$

$\Delta\phi_2$  是系统的探测精度, 即  $\Delta\phi_2 = \pm \phi_2 \times 1\%$ . 这里  $\phi_1, \phi_2$  分别是空间滤波器输入输出透镜孔径,  $L_1, L_2$  分别是反射镜到输入镜、输出镜的距离. 由于加入空间滤波器的小孔, 给光路准直带来了困难, 设计时要密切注意小孔挡光问题.

### 3 提高末级输出调整精度

为了使主放大器链末级输出引向靶场, 有两块伺服反射镜调整光束. 本文是通过两块反射镜调整, 使光束角移小于  $5'$ , 光束探测用近远场光学系统, 如图 4 所示.

#### 3.1 远场探测角移 $\delta$

光束通过物镜  $L_1$ , 它的焦斑为:  $y = 1.22(\lambda/d)mf$ , 经物镜  $L_2$  放大成像四象限管上, 光斑口径为  $d$ .

$$d = \beta y, \quad \Delta d = \beta \Delta y, \quad \Delta d/d = \Delta y/y$$

$$\Delta y = \delta f, \quad \Delta y = y(\Delta d/d)$$

$$\delta = (y/f)(\Delta d/d) = 1.22(\lambda/\Phi)m \times (\Delta d/d)$$

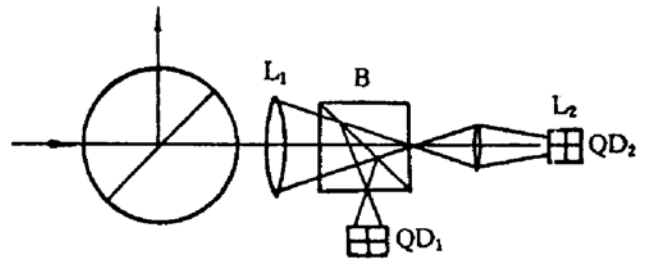


Fig. 4 The configuration of the near-far field beam detectors

近远场探测的误差信号通过计算机控制两平行

反射镜, 保证末级的精度, 光束角移和平移的调整如图 5 所示.

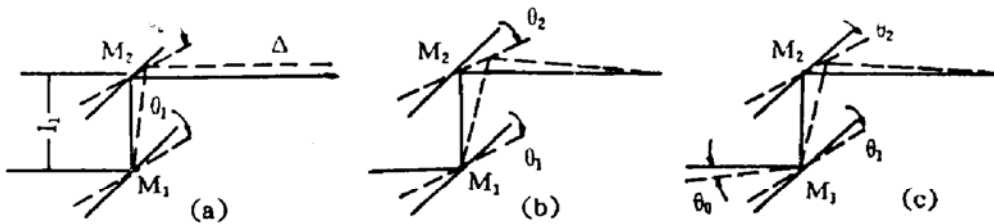


Fig. 5 The alignment of the beam angle-deviation and parallel-shift

(1) 图 5(a),  $M_1, M_2$  各转  $\theta_1, \theta_2$ , 且  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  输出光束平移量:  $\Delta = l_1(2\theta) = 2l_1\theta$ ;

(2) 图 5(b), 原平行  $M_1, M_2$  各转  $\theta_1, \theta_2$ , 那么输出光束有角移:  $\delta = 2(\theta_2 - \theta_1)$ ;

(3) 图 5(c),  $M_1, M_2$  各转  $\theta_1, \theta_2$ , 入射光也有角移  $\theta_0$ , 则输出光角移:  $\delta = 2[\theta_2 - (\theta_1 + \theta_0/2)]$ .

通过近远场探测平移  $\Delta$  和角移  $\delta$ , 使  $\delta < 5'$  平移是小于光束直径的  $\pm 1\%$ .

### 4 硅四象限管光电探测器

硅四象限管在波长  $1.06 \mu\text{m}$  处的灵敏度为  $0.2 \text{ A/W}$ , 对  $50 \Omega$  负载上升时间  $3 \text{ ns}$ , 四象限管对  $200 \text{ ns}$  的激光调 Q 脉冲能响应, 采用脉冲峰值探测, 提高灵敏度和信噪比, 也就是提高调整精度. 四象限管按和差方式工作, 元件光敏面在透镜焦面之后, 光斑是个圆, 按能量分布, 各个象限都占一部分, 如图 6 所示. 四象限管和差基本方程为

$$\Delta V_r = \pm [(V_A + V_B) - (V_C + V_D)] / (V_A + V_B + V_C + V_D)$$

$$\Delta V_s = \pm [(V_B + V_C) - (V_A + V_D)] / (V_A + V_B + V_C + V_D)$$

式中  $\Delta V_r, \Delta V_s$  分别代表高低和方位输出的误差电压, 正负号表示系统的正反向, 分母求和是

系统归一化处理。作出四象限管方位误差特性曲线，如图 7 所示。 $\Delta X$  为 mm， $\Delta V_x$  仔细测量了和差信号的灵敏度，光斑直径 2 mm，光斑移动 0.02 mm，误差信号有 1% 的变化，所以探测光束直径的 1% 的变化是可能的。

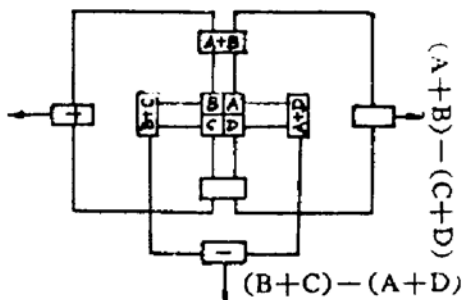


Fig. 6 The quadrant detector Sum-differential scheme

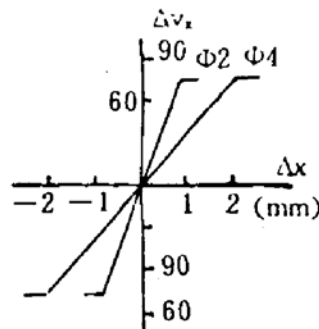


Fig. 7 Error characteristic curve of the quadrant detector

值得注意的是四象限管探测能量中心，光路有些元件的损坏，使光束强度形状变化，会引起较大的调整误差。这是使用四象限管的缺点。

### 5 准直光源

作为准直光源的激光振荡器的输出稳定性是至关重要的。准连续锁模激光器的装置的主振荡器，作者曾努力提高锁模振荡器输出的稳定性<sup>[3]</sup>，振荡器用三根殷钢架支撑，氦灯、晶体棒、调制器温度得到严格控制，振荡器输出幅度短期稳定性好于 2%，光束抖动也好于 3'。这样的振荡器作为准直光源是可以的。但对大型激光装置而言，它的功率还不够，需要另配制准直激光振荡器，即重复率调 Q 激光器。为了提高它的稳定性，采取以下措施，

- (1) 采用高稳定性调整架，铸铁支承架，稳定安装。
- (2) 减小流水对晶体棒的冲击，加缓冲装置。
- (3) 加强对冷却水的温度控制，可以控制在  $\pm 2\%$  °C 的变化范围。

这样的激光器输出平均功率 2 W，重复率 1 kHz 几十分钟内辐度稳定度好于 5%，光束的稳定性很好。通过光束位置的检测，其精度好于  $\pm 1\%$ 。

### 6 实验结果

光路自动准直实验光路图如图 8 所示，准直振荡器 AL-OS 的调 Q 激光脉冲通过伺服反射镜  $G_1$ 、 $G_2$  反射，激光在  $G_5$  透过 1% 能量被近场探测器  $QD_1$  远场探测器  $QD_2$  接受，它们产生的误差信号由计算机反馈控制  $G_1$ 、 $G_2$ ，使光束  $G_2 \sim G_5$  调整到原先的光轴上去。在光路  $G_2 \sim G_5$  中插入  $G_4$ ，锁模振荡器 LM-OS 的激光通过伺服反射镜  $G_3$ 、 $G_4$ ，激光在  $G_5$  透过 1% 能量也被  $QD_1$ 、 $QD_2$  接受，它们产生的误差信号由计算机反馈控制  $G_3$ 、 $G_4$ ，使光束  $G_4 \sim G_5$  调整到原来调好的光轴上去。经过这样的调整，两个振荡器

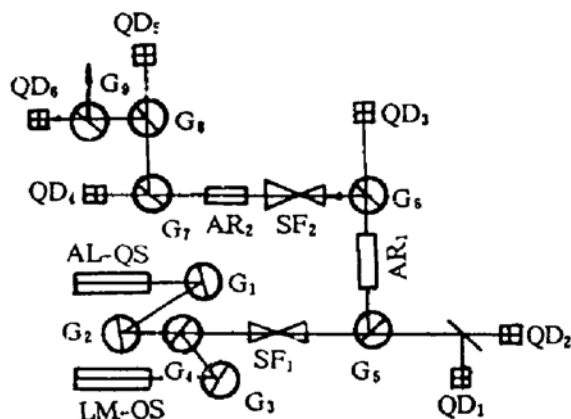


Fig. 8 The experimental automatic optical alignment scheme

AL-Os: Alignment Oscillator,  $L_1$ 、 $L_2$ : lens,  $G_1 \sim G_8$ : Mirror 1~Mirror 8, LM-Os: Locked mode oscillator,  $AR_1$ 、 $AR_2$ : Amplifier rod,  $QD_1 \sim QD_5$ : Quadrant detector,  $SF_1 \sim SF_2$ : Spatial filter

的光轴在  $G_4 \sim G_5$  上同轴了, 两个振荡器的光轴的角差小于  $10'$  (用可调焦平行光管测量)。

AL-OS 的激光经  $G_5$  反射, 在  $G_6$  透过 1% 能量被近场探测器  $QD_3$  接受, 使直径 20 mm 的  $G_5 \sim G_6$  光束中心位置误差只有光束直径的  $\pm 1\%$ 。激光再由  $G_6$  反射, 在  $G_7$  后面有近场  $QD_4$  接收, 计算机反馈控制伺服反射镜  $G_6$ , 使直径  $\Phi 40$  mm 的  $G_6 \sim G_7$  光束中心位置误差是光束直径的  $\pm 1\%$ 。光路中有空间滤波器  $SF_2$ , 它改变了平移量的大小和角移的方向, 但通过计算机判别是能调整好的。空间滤波器的小孔限制了四象限管控制视场, 实验显示, 只要四象限管有一个象限有激光信号, 计算机就能自动调整光束, 当光束全被小孔挡住, 则不能自动调整。两平行反射镜  $G_7, G_8$  调整光束,  $QD_5$  是近场探测,  $QD_6$  是远场控制, 最后光束角移应小于  $5'$  (可调焦平行光管只能测  $10'$ )。表 1 列出实验数据表明, 四象限管输出信号误差该是  $\pm 1\%$ 。实验是先把光路调偏, 但光束须在四象限管视场范围内, 微机逐个反馈控制伺服反射镜, 光束能自动准直到光路中去。

Table 1. Experiment data

QD <sub>n</sub>	QD each quadrant signal (%)				accuracy		QD <sub>n</sub>	QD each quadrant signal (%)				accuracy	
	(No. 1 group date)				X (AZ.)	Y (EL.)		(No. 2 group date)				X (AZ.)	Y (EL.)
	A	B	C	D	%	%		A	B	C	D	%	%
QD <sub>1</sub>	26	24	26	23	+1	+1	QD <sub>1</sub>	26	24	26	23	+1	+1
QD <sub>2</sub>	25	24	26	24	-1	+1	QD <sub>2</sub>	26	23	26	23	0	0
QD <sub>3</sub>	26	23	26	23	0	0	QD <sub>3</sub>	26	23	25	23	+1	-1
QD <sub>4</sub>	25	24	25	24	0	0	QD <sub>4</sub>	26	24	26	23	+1	+1
QD <sub>5</sub>	24	26	24	25	+1	-1	QD <sub>5</sub>	24	25	25	25	-1	-1
QD <sub>6</sub>	25	23	26	23	-1	-1	QD <sub>6</sub>	26	24	26	23	+1	-1

## 参 考 文 献

- [1] D. R. Speck, E. S. Bliss, J. A. Glaze *et al.*, The shiva Laser-fusion facility. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(9): 1599~1619
- [2] C. Yamanaka, Y. Kato, Y. Lzawa *et al.*, Nd-doped phosphate glass laser system for laser-fusion resarch. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(9): 1639~1649
- [3] 陈庆浩, 徐仁芳, 王剑雄等, 主动锁模电光调 Q Nd:YLF 振荡器. 中国科学院、中国工程物理研究院, 高功率激光物理联合研究室年刊, 1990, 64~69

## Automatic Optical Alignment for Laser-Fusion Facility

Chen Qinghao Xu Renfeng Peng Zengyun

Zhu Cailong Zhuang Yifei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 1 February 1994; revised 16 March 1994)

**Abstract** The papaer describes an automatic optical alignment system for laser-fusion facility. Technical problems concerning the beam centering sensor, laser and the computer etc are discussed. The experimental result on the accuracy of beam centering aligment is  $< \pm 1\%$  of the beam diameter.

**Key words** beam centering sensor, laser, micro-computer.