

文章编号: 1001-3806(2005)05-0528-05

基于光路失调原理消除笔形光束的危害

梁 晶, 谭吉春

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 分析高功率激光器中笔形光束的成因及其潜在危害的规律, 提出一种减少 (或消除) 空间滤波器中笔形光束的技术措施——倾斜透镜法。用增广矩阵法计算非共轴光路笔形光束会聚点位置并分析其变化。以高功率激光系统的空间滤波器为例, 报道追寻失调滤波器中鬼点和消除笔形光束的设计、计算结果。结果表明, 采用两透镜非同轴构型, 选取适当的滤波器设计参数, 并适当倾斜透镜 L_2 , 能有效地避免笔形光束对高能激光系统造成的危害。

关键词: 高功率激光器; 激光损伤; 鬼点; 笔形光束; 空间滤波器; 增广矩阵

中图分类号: O435.1 O437.5 文献标识码: A

Eliminating the damage of pencil beam by the misaligned optical lens system

LIANG Jing TAN Ji-chun

(College of Photoelectric Science Engineering National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The potential damage of optical elements induced by the pencil beam in high power laser system is analyzed based on augmented matrix optics. The numerical results of positioning the ghost points in spatial filter of high power laser system are presented. It is shown that tilting one of lenses in the spatial filter can reduce (or eliminate) the potential damage of pencil beam. The result shows that using the misaligned optical lens system and tilting the lens can avoid the damage caused by pencil beams in high power laser system.

Key words high power laser; laser induced damage; ghost point; pencil beam; spatial filter; augmented matrices

引 言

尽管高功率激光系统中的光学元件表面已镀增透膜, 但仍存在剩余反射。激光束经光学元件表面反射, 会聚成鬼点 (或经多次透射、反射后形成高阶鬼点)。某些鬼点可能导致腔内光学元件损伤。

在空间滤波器中, 根据形成鬼点的光束截面的大小, 可分为“全口径光束”和“笔形光束”两类。已发表的关于鬼点的文献中, 多数侧重于研究“全口径光束”^[1-3]。在作者力所能及的检索范围内, 迄今为止, 只有文献 [4] 中详细报道了美国国家点火装置 (NIF) 中“笔形光束”的研究结果。

本文中用增广光学矩阵理论描述激光系统中非同轴光学元件产生的鬼光束, 分析失调空间滤波器中笔形光束的成因, 对“透镜倾斜法”避免鬼点危害的实用效果作出定量评定。

1 笔形光束及其潜在危害性

作者简介: 梁 晶 (1979-), 男, 助理工程师, 从事光电技术科研工作。

E-mail: liangjing@ton.com

收稿日期: 2004-06-08 收到修改稿日期: 2004-07-13

1.1 空间滤波器中的笔形光束

如图 1 所示, 空间滤波器中透镜 L_1 和 L_2 的 4 个

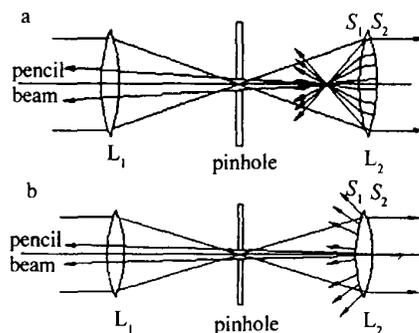


Fig 1 Pencil beam formation from the two surface reflections of a lens

表面均存在剩余反射。其中, 透镜 L_1 左、右两反射面产生的鬼光束属于“全口径光束”类型。而透镜 L_2 左、右两表面 (S_1, S_2) 向左反射的鬼光束虽然受针孔板的阻挡, 仍有少部分能通过针孔传输到针孔板左侧, 文献 [4] 中把这种通过针孔后 (其截面变细) 的鬼光束称为“笔形光束 (pencil beam)”。

1.2 笔形光束的危害

空间滤波器中, 主光束经 L_2 透镜的 S_1 表面反射, 产生发散光束 (见图 1b), 经 S_2 表面反射 (并向左经 S_1 透射), 会聚形成鬼点 (见图 1a)。图 1 中位于光轴的各阶鬼点均能不同程度地通过滤波针孔, 形成笔形光

束。我国高功率片状激光器输出功率水平高达百焦耳量级,一阶鬼点光斑半径在 $10^{-2}\text{mm} \sim 10^{-3}\text{mm}$ 量级左右,空间滤波器针孔直径约为 $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$ 。即使笔形光束的初始能量可能很小,经多程放大后,如果该光束再次会聚,鬼点能量密度仍有可能超过材料破坏阈值。

根据图 1 光路,设由透镜 L_2 产生的鬼像通过滤波小孔后的能量透过率 T ,其表达式如下:

$$T = \begin{cases} \frac{(P-f)^2}{P^2} \times m^2, P < \frac{m}{m-1}f \text{ 或 } P > \frac{m}{m+1}f \\ 1, \text{ 其余} \end{cases} \quad (1)$$

式中,坐标原点定在滤波小孔处, f 表示透镜 L_2 的焦距, P 表示透镜所产生鬼像到原点的距离,比值 $m = d/D$, d 表示滤波小孔半径, D 为透镜 L_2 的口径。

滤波小孔左侧笔形光束的能量透过率 T 示于图 2。可以看出:(1)透镜 L_2 产生的鬼像离滤波小孔越

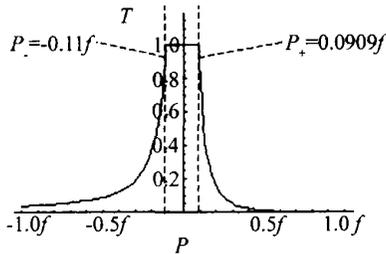


Fig 2 The efficiency of energy caused by pencil beam passing through the pinhole at different converging point P ($m = d/D = 0.1$)

近,能量透过率 T 越大。曲线有两个转折点 P_+ 和 P_- ,虚线两侧曲线并不对称,即鬼点离小孔较近时,透过率 T 的变化率较大;(2)当会聚点位置处于图 2 中 $P_+ = 0.0909f$ 和 $P_- = -0.11f$ 之间时,透过率为 100%,曲线呈平顶状(即图中两虚线之间属于危险区域。这时,滤波小孔已经不能起到阻挡作用)。若这些光束再向左经过增益介质放大,该鬼光束的能量将增加到足以损坏激光系统的程度。笔形光束的危害不容忽视。

1.3 避免笔形光束危害的方法

可供选用的方法有:(1)提高腔内光学元件增透膜的透过率;(2)合理选择透镜构型参数,减少鬼点数量(或使鬼点位置错开昂贵光学元件);(3)使透镜 L_2 倾斜放置^[4]。

文中重点讨论第 2 种、第 3 种方法的原理和使用效果。如图 3 所示,使透镜 L_2 主面法线 z 转至 z' 方

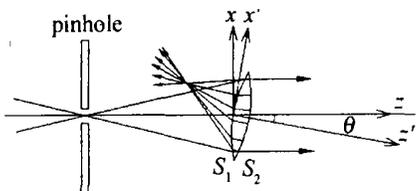


Fig 3 Eliminating the damage of pencil beam by tilting the lens

向, L_2 产生的反射光束将落入针孔板遮光区,从而消除了笔形光束的源头。

2 空间滤波器失调光路中笔形光束追踪

下面将用增广矩阵法分析、追踪倾斜透镜所产生的鬼光束的会聚位置^[5]。探索在失调光路中消除笔形光束的技术措施。

2.1 用增广矩阵法分析空间滤波器中的笔形光束

沿用图 1 中空间滤波器的具体参数,并使双凸透镜 L_2 倾斜(与主光轴的夹角 ϵ' ,如图 4 所示),来计算该倾斜透镜所产生的笔形光束。

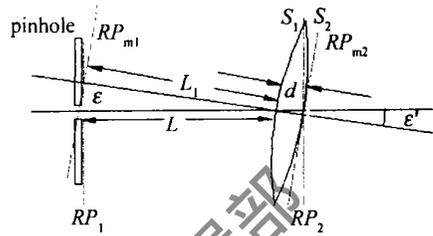


Fig 4 Calculating the pencil beam by augmented matrices method

图 4 中,透镜折射率为 n ,表面 S_1 和 S_2 的曲率半径分别为 R 和 $-R$ ($R > 0$),两球面顶点间的距离为 d ,滤波小孔距离透镜 S_1 表面的距离为 L 。 RP_1, RP_2 为透镜 L_2 倾斜前的参考面, RP_{m1}, RP_{m2} 为透镜 L_2 倾斜后的参考面。

用增广矩阵的方法分 3 个步骤追踪图 1a 和图 4 中的笔形光束,具体如下。

(1)计算图 4 中入射光线传播路径 $RP_{m1} \rightarrow RP_{m2}$ 的变换矩阵。用矩阵光学的方法先得到非失调光路中光束传播路径的 2×2 矩阵:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

如图 4 所示,当透镜倾斜角为 ϵ' 时(失调量 $\epsilon' < 0$), 2×2 矩阵中的光程 L_1 为: $L_1 = L \times \cos \epsilon'$;为了得到失调光学系统的 4×4 增广矩阵,需要根据图 4 中光学系统的失调参数,对所得到的(2)式进行增广。得到 $RP_{m1} \rightarrow RP_{m2}$ 的变换矩阵(增广矩阵):

$$M_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & \alpha_1 \epsilon_1 & \beta_1 \epsilon_1' \\ C_1 & D_1 & \gamma_1 \epsilon_1 & \delta_1 \epsilon_1' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据文献[6]中增广矩阵的定义,(3)式中:
 $\begin{cases} \alpha_1 = 1 - A_1, \gamma_1 = -C_1 \\ \beta_1 = l - B_1, \delta_1 = 1 - D_1 \end{cases}; \epsilon_1 = -L_1 \times \sin \epsilon'; \epsilon_1' = \epsilon'; l = L_1 + d$

(2)计算透镜 S_2 面的反射变换矩阵 M_{∞} 。计算反射增广矩阵 M_2 的方法,与(1)类似:

$$M_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 & \alpha_2 \varepsilon_2 & \beta_2 \varepsilon_2' \\ C_2 & D_2 & \gamma_2 \varepsilon_2 & \delta_2 \varepsilon_2' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{式中, } \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2n}{R} & 1 \end{bmatrix}; \varepsilon_2 = d \times \sin \varepsilon_2'; \varepsilon_2' = \varepsilon_2';$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = 1 - A_2 & \gamma_2 = -C_2 \\ \beta_2 = l - B_2 & \delta_2 = -1 - D_2 \end{cases} \quad (5)$$

(3) 计算反射后的光线从透镜 S_2 面至会聚点 (鬼像位置) 的变换矩阵 M_3 。

假设光线从透镜 S_1 表面射出后再传输空间距离 L_0 后会聚到一点, 则该非失调光路的 $ABCD$ 矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1-n}{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

参照 (1), 同理可以得:

$$M_3 = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 & \alpha_3 \varepsilon_3 & \beta_3 \varepsilon_3' \\ C_3 & D_3 & \gamma_3 \varepsilon_3 & \delta_3 \varepsilon_3' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \varepsilon_3 = d \times \sin \varepsilon_3'; \varepsilon_3' = \varepsilon_3'; l = L_0 + d$$

$$\begin{cases} \alpha_3 = 1 - A_3 & \gamma_3 = -C_3 \\ \beta_3 = l - B_3 & \delta_3 = 1 - D_3 \end{cases}$$

从滤波小孔向右入射的光线, 经过透镜 L_2 折、反射后, 会聚于鬼像点。综合以上 3 步骤得到, 该传输过程的失调增广矩阵 M 为:

$$M = M_3 \times M_2 \times M_1 = \begin{bmatrix} A' & B' & \alpha & \beta \\ C' & D' & \gamma & \delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

前述 (6) 式中, L_0 是未知量。因此, 还不能立即得出 M 的具体表达式。但因入射光束为聚焦光束, 对于每条光线 $\begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$, 都有固定值 r_1 , 光线被光学矩阵变换后, 若再次会聚成一点, 则 $r_2 = A' r_1 + B' \theta_1 + \alpha' + \beta'$ 为一常数。由于 θ_1 可以取任意值, 因此 $B' = 0$ 从而可以解出 L_0 的值。于是 M 的每一个分量便有了具体的数值。

$$\text{最后, 根据 } \begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 就可以算出鬼像的具体位置}$$

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \text{ 进而计算出笔形光束的路径。}$$

2.2 计算实例

国产某空间滤波器中, 双凸透镜折射率 $n = 1.5$ 球面的曲率半径分别为 5m 和 -5m , 两球面顶点的间距 $d = 0.03\text{m}$, 口径为 0.4m 。滤波小孔距离透镜前表面的距离为 4.995m 。将这些数据代入 (2) 式 ~ (8) 式, 得出的结果列于表 1。

Table 1 The location of pencil beam's focus

θ	1st order ghosts location(S_2)		location(S_1)	
	z/m	x/m	z/m	x/m
-1°	-1.652	0.0578	1.6652	-0.0581
-2°	-1.65	0.1156	1.6627	-0.1161
-3°	-1.646	0.173	1.658	-0.173
-4°	-1.642	0.23	1.652	-0.23
-5°	-1.636	0.287	1.645	-0.288

把透镜偏转前、后的坐标原点都定在透镜 S_1 表面与空间滤波器对称轴的交点上。表 1 中, 透镜 L_2 在倾斜角 θ 为 $-1^\circ \sim -5^\circ$ 时, 从透镜右表面 (S_2) 和左表面 (S_1) 向左反射的鬼点位置分别为 x (纵坐标)、 z (横坐标)。

在滤波器中, 透镜倾斜多少角度, 可以正好使鬼点产生的左向笔型光束不会穿过滤波小孔? 可以参照图 5 回答此问题。

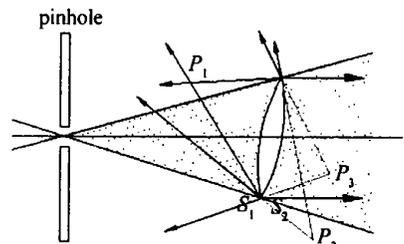


Fig 5 The reversed propagating beam caused by the ghost point at different position

当鬼像的会聚点处于图中阴影位置以外的部分时 (见图 5 中 P_1, P_2 点), 反射回去的光束就不会穿过滤波小孔, 因此不会对激光系统造成危害。但是, 如果鬼像的会聚点处于阴影区域中 (见图 5 中 P_3 点), 无论此会聚点是实像或虚像, 都会有少量光线穿过滤波小孔, 形成的笔形光束有可能对光学元件产生破坏。

由表 1 中的数据再经过简单的推算, 可以得出: 当倾斜角度大于 -3° 时, 由 S_2 面反射的一阶鬼点已经偏离出入射光束以外, 这样的鬼点将不会穿过滤波小孔, 从而不会产生笔形光束。对于普通透镜, 只要一个很小角度的偏转就可以完全避免笔形光束造成的危害。

同理, 从透镜前表面 (S_1) 反射回来的光线也会产生笔形光束, 但由于该反射光是发散光 (S_1 表面反射产生虚鬼像), 所以不存在实的鬼像。对此, 可以计算出虚像的位置, 从而找出当透镜的偏转角度是多少时,

反射光线不会穿过滤波小孔。计算结果如表 1 (S_1 列) 所示, 可以看出: 当透镜的偏转接近 -5° 的时候, 该发散光不会形成笔形光束。

3 讨论

合理选择透镜曲率和空间滤波器构型参数, 可避免产生笔形光束 (或减小其危害程度)。

3.1 透镜曲率参数对笔形光束的影响

分别采用凸平透镜和平凸透镜组成空间滤波器 (见图 6), 本节中利用前面对双凸透镜的类似方法, 对这两种构型中的笔形光束作分析, 并对凸平、平凸和双凸 3 种透镜构成的空间滤波器进行比较。

凸平、平凸两种透镜的曲率半径都为 2.5m (-2.5m), 透镜前表面 (S_1) 与后表面 (S_2) 之间的距离为 0.03m , S_1 面距离滤波小孔的距离都为 4.995m 。分别计算图 6a 图 6b 两种结构的滤波器中, 透镜 L_2 在

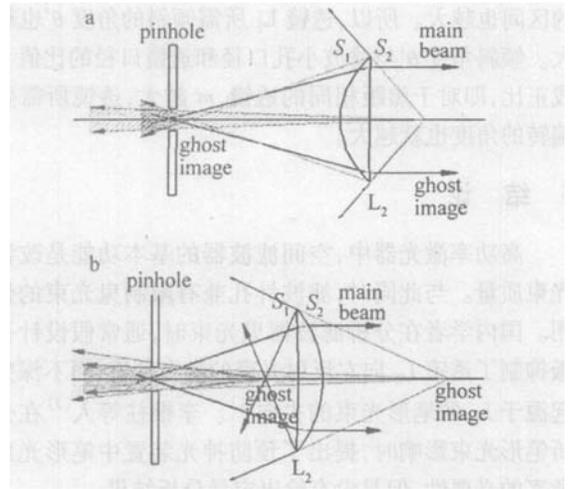


Fig 6 The cause of pencil beam in spatial filter constituted by equiconvex and planoconvex

不同倾角产生的鬼像位置, 结果如表 2 所示。

以图 6b 构型的空间滤波器为例, 把表 2 的数据代

Table 2 The location of pencil beam's focus

θ	picture a				picture b			
	location(S_2)		location(S_1)		location(S_2)		location(S_1)	
	z/m	x/m	z/m	x/m	z/m	x/m	z/m	x/m
-1°	-5.004	0.175	0.999	-0.0349	-0.97	0.0344	4.99	-0.174
-2°	-4.999	0.349	0.998	-0.0696	-0.97	0.0688	4.98	-0.347
-3°	-4.992	0.523	0.995	-0.104	-0.97	0.103	4.967	-0.52
-4°	-4.981	0.697	0.992	-0.139	-0.97	0.137	4.946	-0.69
-5°	-4.968	0.87	0.988	-0.173	-0.968	0.171	4.918	-0.862

入, 绘出平凸透镜在倾斜 $0^\circ \sim -5^\circ$ 时产生的鬼像位置如图 7 所示。由图 7 可以看出: 产生于透镜 L_2 左侧的

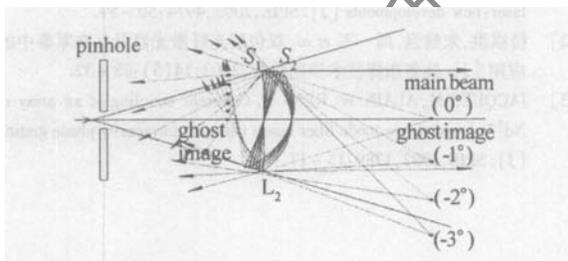


Fig 7 The ghost images generated by planoconvex at the lens tilting angle from $0^\circ \sim -5^\circ$

鬼点 (由下往上依次为透镜在倾斜 $0^\circ \sim -5^\circ$ 时产生的鬼像) 在透镜倾斜大于 -4° 的时候接近主光束边缘, 当透镜倾斜角度为 -5° 时, 鬼点偏离出主光束, 其产生的光束将被滤波板遮挡, 不会产生笔形光束。类似地, 可以看到, 产生于透镜 L_2 右侧的鬼点在透镜倾斜接近 -3° 时, 就已经偏离出危险区域。

综合表 1、表 2 可以看出: 为使图 6a 所示结构中的鬼像位于危险区以外, 空间滤波器右透镜的倾角必须大于 -5° , 而在图 6b 中, 则只需倾角略大于 -4° 就可以了。因此, 以预防鬼点产生笔形光束危害为判据,

空间滤波器中 L_2 透镜的选择顺序为: 平凸透镜好于双凸透镜, 双凸透镜则好于凸平透镜。

3.2 透镜通光口径 D 和滤波针孔口径 d 对笔形光束的影响

由图 5 可以看出, 为避免产生笔形光束, 透镜 L_2 的倾斜角需大于 (等于) 临界角 θ' 。设滤波小孔的口径与透镜口径的比值 $m = d/D$, 参照图 2 绘出透过率 T 与坐标 P 和比值 m 的函数关系, 如图 8 所示。

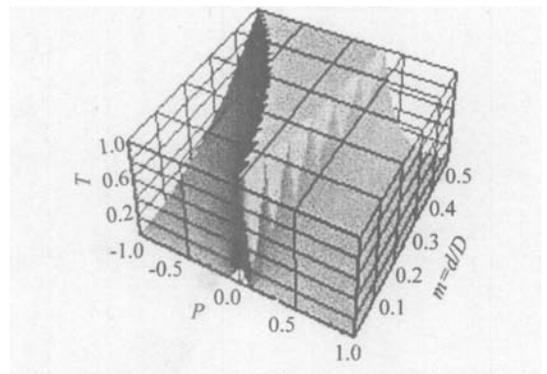


Fig 8 The efficiency of energy caused by pencil beam passing through the pinhole at different converging point P and different value m

由图 8 可以看出: m 越大, 能量透过率 $T = 100\%$ 的区间也越大。所以, 透镜 L_2 所需倾斜的角度 θ' 也越

大。倾斜角度 θ' 与滤波小孔口径和透镜口径的比值 m 成正比,即对于焦距相同的透镜, m 越大,透镜所需要偏转的角度也就越大。

4 结 论

高功率激光器中,空间滤波器的基本功能是改善光束质量。与此同时,滤波针孔兼有限制鬼光束的作用。国内学者在分析滤波器鬼光束时,通常假设针孔板抑制了透镜 L_2 向左反射光束的潜在危害,而不深究起源于 L_2 的笔形光束的去向^[1]。李银柱等人^[3]在分析笔形光束影响时,提出了预防神光装置中笔形光束危害的必要性,但是没有给出定量分析结果。

计算结果表明:对两透镜同轴的滤波器而言,针孔板不能完全遮断鬼光束,笔形光束的潜在危害不容忽视。按作者提出的两透镜非同轴构型,选取适当的滤波器设计参数,并适当倾斜透镜 L_2 ,能有效地避免笔形光束对高能激光系统造成的危害。

透镜倾斜会使空间滤波器输出主光束的像差增

大,需要在后续光路中调整光路结构或引入特定的元件来减小这类不良影响。光束经透镜两曲面多次折、反射,存在高阶鬼像,并生成高阶笔型光束。关于失调空间滤波器中主光束像差以及高阶鬼像所产生的笔形光束等,文中未能深入研究,有待今后作进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 冯国英,陈建国,马再如 *et al* 高功率激光系统中近轴鬼点的寻找 [J]. 光学学报, 2003, 23(5): 632~ 635.
- [2] 李良珏,王仕璠,李银柱 *et al* “神光”装置中空间滤波器的鬼点分析 [J]. 中国激光, 2001, 28(9): 826~ 828
- [3] 李银柱,李良钰,戴亚平 *et al* 高功率激光装置中的鬼点反射分析 [J]. 中国激光, 2001, 28(8): 677~ 680.
- [4] MURRAY J E, Van WANTER GHEM B, SEPALA L *et al* Parasitic pencil beam caused by lens reflections in laser amplifier chains [J]. SPE, 1997, 2633 609.
- [5] 谭吉春,景 峰,朱启华 *et al* 多通放大器腔内的杂散光 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 159~ 163
- [6] 卢亚雄,吕百达. 矩阵光学 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 1988 82~ 95.

(上接第 518页)

的激光器或放大器的数目增大到一定程度时,最佳的实验方案当属并联主振荡-功率放大(MOPA)系统。现在,国外的锁相光纤激光器阵列采用的基本方案都是利用种子激光器经过分束器,进入多路光纤放大器中进行功率放大,再进行锁相。

2 小 结

总之,光纤激光器的相干合成技术才刚刚起步,尚处于实验室探索阶段,没有很多现成的方法和结论可供借鉴。但是,相干合成的主要目的是要获得比从单个激光器输出功率更高的激光束,并保持良好光束质

量。因此,对于一个阵列系统来说,主要任务就是要在高的激光效率,稳定的位相锁定及高的光束质量三者之间寻找一个最佳的匹配关系。从而使系统的输出满足需要。

参 考 文 献

- [1] DHAN N, JAYANTA K S, YOONCHAN J *et al* High power fiber laser new developments [J]. SPE, 2003, 4974 50~ 59.
- [2] 楼祺洪,朱健强,周 军 *et al* 双层光纤激光器及其在军事中的应用 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2003, 14(5): 28~ 32
- [3] JACQUES M, ALAN W, RENÉ D. Coherent coupling of an array of Nd³⁺ doped single mode fiber lasers using an intracavity phase grating [J]. SPIE, 1992 1789: 13~ 17.