

# 片状固体激光器的基模

陆璇辉 王绍民

(杭州大学物理系)

## Fundamental modes of slab lasers

Lu Xuanhui, Wang Shaomin

(Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou)

**Abstract:** Based on the viewpoint that slab lasers have intrinsic pseudo-phase-conjugate properties and a new matrix with the optical beam passing through an inclined interface, we obtained a conclusion that the fundamental modes of slab lasers have different beam spot size and beam divergence.

### 一、引言

片状固体激光器片内的光束在上下表面产生全内反射,按之字形路径传输,提高了激活介质的利用率,从而可获得较高的能量输出<sup>[1]</sup>。更重要的是,与传统的棒状固体激光器相比,它能补偿激光介质内部因温度不均匀而造成光学畸变<sup>[2-4]</sup>,因而引起了人们的广泛注意。

本文试图用矩阵光学来分析它的补偿性。同时对这种结构的基模进行分析。由于片状固体激光器的菲涅耳数  $N \gg 1$ , 因而适于用矩阵光学来进行分析。

### 二、片状固体激光器的补偿性

片状固体激光器的结构和光路如图1所示。上下底面抛光,侧面磨毛。

由于片状固体激光器有较大的冷却表面,侧面隔热,因而温度梯度基本上只发生在  $y$  方面,  $x$  方向的可以忽略不计。 $y$  方向的温度分布可表示为:

$$T(y) = \frac{Qt^2}{8k} \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{2y}{t} \right)^2 \right];$$

$Q$  为单位体积内的加热速率,  $k$  为热导率。

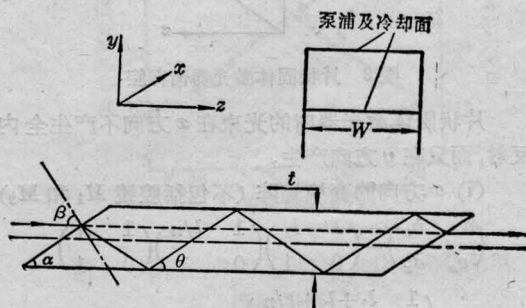


图1 片内几何结构和几何光路

$\beta$ —布儒斯特角;  $\theta$ —传输角;  $t$ —片厚;  $W$ —片宽

由于温度分布产生一种近于抛物线的折射率分布,因而会形成一种柱透镜效应,这将导致激光器的动态不稳定。然而,当片的上下两面产生全内反射时,便可消除这种影响。因为全内反射具有准相位共轭性质<sup>[5]</sup>,故在  $y$  方向的畸变可以得到补偿。假定由于热效应产生的柱透镜可以表示为  $\begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix}$ , 则对一次全内反射,当入射光和出射光为对称的情况时,其传输矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} d_i & b_i \\ c_i & a_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

如果在片内的反射次数为  $N$ , 则

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \right]^N \\ & = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}^N \end{aligned} \quad (2)$$

在我们的情况下,  $N=2n(n=1, 2, 3, \dots)$ 。因此总等效矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}^{2n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

由此可见, 这种全内反射片状激光器等效于一个准相位共轭镜, 它补偿了由于温度不均匀而引起的光学畸变, 从而具有较高的动态稳定性。这一点已为实验所证实<sup>[2,3]</sup>。

### 三、片状固体激光器的基模分析

片状固体激光器的谐振腔结构如图 2。

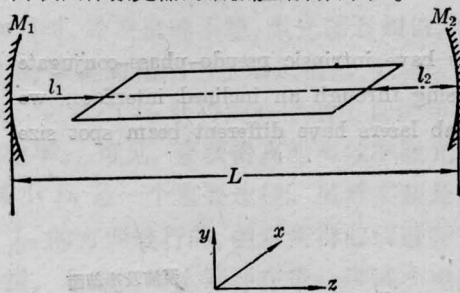


图 2 片状固体激光器谐振腔

片状固体激光器内的光束在  $x$  方向不产生全内反射, 而只在  $y$  方向产生。

(i)  $x$  方向的变换矩阵 (不包括腔镜  $M_1$  和  $M_2$ )

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a_x & b_x \\ c_x & d_x \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & l_1+l_2+l/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $l=Nt/\sin\theta$ , 是光线走过的路程。而  $l_1+l_2=$  常数。

(ii)  $y$  方向的变换矩阵 (不包括腔镜  $M_1$  和  $M_2$ ), 由(3)可表示为

$$\begin{pmatrix} a_I & b_I \\ c_I & d_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

当光束通过界面时, 因光束与端面法线成布儒斯特角, 角度较大, 一般来说是非近轴光线,  $ABCD$  矩阵不适用。但如果我们仅考虑光束通过界面后光束复曲率的变化, 则  $ABCD$  矩阵还是适用的。不过得重新定义一个矩阵。

根据折射定律

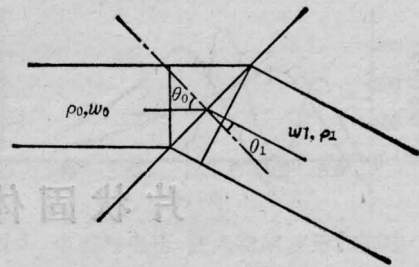


图 3 光束通过斜界面时的变换

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1; \quad (5)$$

$n_0$  和  $n_1$ ,  $\theta_0$  和  $\theta_1$  分别为两不同介质的折射率、入射角和折射角 (见图 3)。

对(5)两边微商,

$$n_0 \cos \theta_0 d\theta_0 = n_1 \cos \theta_1 d\theta_1 \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_1}{d\theta_0} = \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1} \quad (7)$$

(7)是角放大率。

根据光学  $ABCD$  矩阵的性质, 其矩阵行列式应满足

$$\det M = AD - BC = n_0/n_1; \quad (8)$$

而对无限薄元件而言, 相应的矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_t \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中  $M_a$  为横向放大率,  $M_t$  为角放大率。

由(7)式

$$M_t = \frac{d\theta_1}{d\theta_0} = \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1} \quad (10a)$$

将(10a)代入(8), 可得

$$M_a = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0} \quad (10b)$$

这样我们就得到了光束通过斜界面的变换矩阵

$$\begin{pmatrix} a_{II} & b_{II} \\ c_{II} & d_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0} & 0 \\ 0 & \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

此式是我们定义的一个新矩阵。

如果两端面相互平行, 在内部产生全内反射, 射出后只要将(11)式中的  $n_0$  与  $n_1$ ,  $\theta_0$  与  $\theta_1$  交换就可以得到从介质内向外传输的变换矩阵。因而光束通过整个片 (相对  $y$  分量) 的变换矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0} & 0 \\ 0 & \frac{n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$y$  方向的变换矩阵(不包括腔镜  $M_1$  和  $M_2$ ):

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a_y & b_y \\ c_y & d_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & l_1+l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

从上面的分析可以看出, 该结构的  $x$  方向和  $y$  方向的性能不一样, 这一点是可以预料的。

另外, 由(12)式可以看到片子相对  $y$  方向等效于平面镜, 则它的自再现模式是由侧面反射来的场形成的, 我们称之为“之”字形路径。应用具有侧反射面的光学谐振腔的模式<sup>[6]</sup>来处理, 对于球面稳定腔而言, 光束为高斯型。

为了更具体地说明, 我们只讨论片状激光器的基模。根据  $ABCD$  定律, 并令其自洽, 即

$$q = \frac{Aq+B}{Cq+D} \quad (14)$$

$$\text{其中 } \frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w_i^2}.$$

谐振腔  $M_1$  和  $M_2$  处的光斑参数分别为  $x$  方向和  $y$  方向。

(i)  $x$  方向

$$w_{1x} = \left( \frac{\lambda L_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{G_{2x}}{G_{1x}(1-G_{1x}G_{2x})} \right]^{1/4} \quad (15a)$$

$$w_{2x} = \left( \frac{\lambda L_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{G_{1x}}{G_{2x}(1-G_{1x}G_{2x})} \right]^{1/4} \quad (15b)$$

其中

$$G_{1x} = 1 - \frac{l_1+l_2+l/n}{R_1}, \quad G_{2x} = 1 - \frac{l_1+l_2+l/n}{R_2}$$

$L_e$  为等效腔长, 其值为  $L_e = l_1+l_2+l/n$ , 波前曲率半径与腔镜吻合。

发散角

$$\theta_x = \frac{\lambda}{\pi w_{ix}} \quad i=1, 2. \quad (16)$$

(ii)  $y$  方向

$$w_{1y} = \left( \frac{\lambda L'_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{G_{2y}}{G_{1y}(1-G_{1y}G_{2y})} \right]^{1/4} \quad (17a)$$

$$w_{2y} = \left( \frac{\lambda L'_e}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{G_{1y}}{G_{2y}(1-G_{1y}G_{2y})} \right]^{1/4} \quad (17b)$$

$$\text{其中 } G_{1y} = 1 - \frac{l_1+l_2}{R_1}, \quad G_{2y} = 1 - \frac{l_1+l_2}{R_2},$$

$L'_e$  为  $y$  方向的等效腔长, 其值为  $L'_e = l_1+l_2$ , 波前曲率半径与腔镜吻合。

发散角

$$\theta_y = \frac{\lambda}{\pi w_{iy}} \quad i=1, 2 \quad (18)$$

#### 四、讨 论

为了便于讨论, 令  $R_1=R_2=R$ , 则  $G_{1x}=G_{2x}=G_x$ ;  $G_{1y}=G_{2y}=G_y$ 。

从上面的计算可以得出结论: 片状固体激光器的基模波前曲率半径是一样的, 而在  $x$  和  $y$  方向上的光斑尺寸则不相同, 它们分别为

$$w_{1x}=w_{2x}=w_x = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{L_e R^2}{2R-L_e} \right]^{1/4} \quad (19)$$

$$w_{1y}=w_{2y}=w_y = \left( \frac{\lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left[ \frac{L'_e R^2}{2R-L'_e} \right]^{1/4} \quad (20)$$

因为  $L_e > L'_e$

则

$$\frac{w_x}{w_y} = \left[ \frac{L_e / (2R-L_e)}{L'_e / (2R-L'_e)} \right]^{1/4} > 1 \quad (21)$$

(21)说明光斑为矩形,  $x$  方向比  $y$  方向尺寸大, 其比值由(21)式决定。

它的发散角在  $x$  与  $y$  方向上也不一样,

$$\theta_x = \frac{\lambda}{\pi w_x} \quad (22)$$

$$\theta_y = \frac{\lambda}{\pi w_y} \quad (23)$$

$$\text{光束的立体角 } \Omega = \pi(\theta_x \theta_y) \quad (24)$$

#### 参 考 文 献

- 1 Chernoch J P, High Power Nd:YAG Mini-FPL, Final Report, AFBL-TR-75-93, Air Force Avionics Lab WPAFB, Ohio (1975)
- 2 Eggleston J M et al. *Opt. Lett.*, 1982; **7**(9): 405
- 3 Eggleston J M et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984; **QE-20**(3): 289
- 4 Kane T J et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985; **QE-21** (8): 1195
- 5 王绍民 应用激光, 1984; **4**(3): 109
- 6 方洪烈 et al. 中国科学(A 辑), 1986;(9): 949

(收稿日期: 1987年2月17日)