

# 板条固体激光器热稳特性的研究

廖 严 何慧娟 李永春 顾圣如 赵隆兴 钱林兴 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术开放实验室, 上海 201800)

## 提 要

本文报道板条激光器的热稳运行, 在 150 W 至 10000 W 的泵浦功率下输出发散角基本保持不变, 最大输出功率大于 150 W; 并给出了腔内插入柱面镜, 以压缩输出激光发散角的初步结果。

关键词 板条激光器, 热稳性, 压缩发散角。

## 1 引 言

虽然通常板条结构固体激光器能消除一阶热效应<sup>[1]</sup>, 但在高功率泵浦下仍有热效应如热聚焦等<sup>[2, 3]</sup>。因此, 在高平均功率下分析研究板条激光器的热稳性仍具有意义。光线在板条介质厚度方向上下表面之间的全内反射具有准相位共轭性质<sup>[4]</sup>, 除端面区域以外, 厚度方向的热畸变可以得到补偿, 而宽度方向则不具备此性质。在理想情况下, 假设宽度方向完全均匀泵浦, 宽度两侧面完全绝热, 从而宽度方向没有热效应。但实际不可能达到这种理想情况, 在宽度方向仍存在热效应, 并且与厚度方向不同, 所以应对宽度及厚度方向热效应作分别补偿。

本文作者曾对研制的高平均功率板条激光器<sup>[5]</sup>的热稳定性作了研究。

## 2 原 理

激光器的结构如图 1 所示, 在高功率泵浦下, 腔内有热效应时, 激光腔可等效为图 2 所示, 为便于处理, 可以把  $x$ 、 $y$  方向的热聚焦效应用相应的热焦距  $f_x$  和  $f_y$  来表示。当激

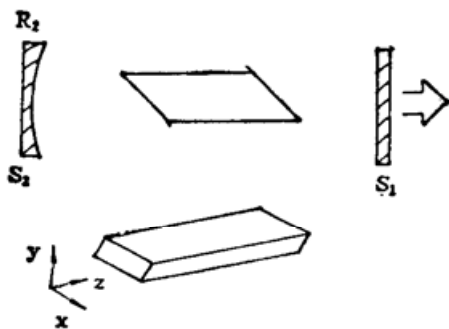


Fig. 1 Scheme the slab laser

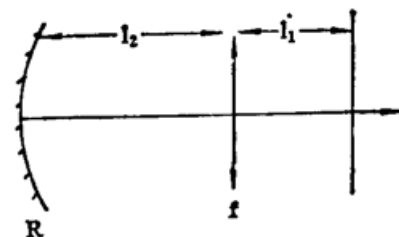


Fig. 2 The equivalent resonator of Fig. 1

光器在一定泵浦功率范围内运转时,存在相应范围的热焦距,对尺寸为  $6 \times 20 \times 94 \text{ mm}^3$

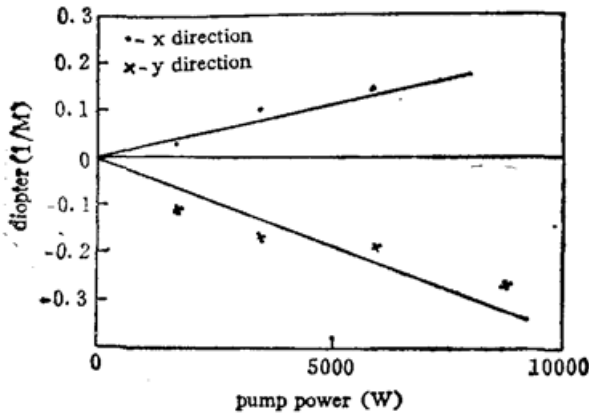


Fig. 3 Measured thermal diopter of the laser slab vs. pump power

的 Nd:YAG 激光板条,在平均泵浦功率为  $150 \text{ W} \sim 10000 \text{ W}$  时,测量  $x$ 、 $y$  方向热透镜的焦距.用常用的热焦距测量方法,测量结果如图 3 所示.  $x$  方向热透镜焦距为正,  $y$  方向为负.

虽然板条激光器是多模输出.通常人们还是采用现有的热稳理论来分析,用以指导实验.由于在  $x$  和  $y$  方向的热透镜焦距  $f_x$ 、 $f_y$  不一样,应在  $x$ 、 $y$  方向分别讨论.由  $ABCD$  定律很容易得出腔内单程传播矩阵,设为

$$\begin{pmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{pmatrix}, \quad (i=x, y).$$

其中包括板条介质的等效热透镜及所须加的补偿镜.由腔的  $G$  参数等价方法,可得:

$$G_{1i} = a_i - (b_i/R_{1i}), \quad G_{2i} = d_i - (b_i/R_{2i}), \quad (i=x, y) \quad (1)$$

当  $s_1$  为平面输出耦合镜时,也就是用平凹谐振腔时,在  $s_1$  处输出光斑半径为

$$W_{1i} = \frac{\lambda b_i}{\pi} \sqrt{\frac{G_{2i}}{G_{1i}(1-G_{1i}G_{2i})}}, \quad (i=x, y) \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,根据热稳定性要求:

$$\frac{dW_{1i}}{df_i} = 0, \quad (i=x, y) \quad (3)$$

式中  $f_i$  为板条在  $i$  方向的热焦距,由 (2)、(3) 式得到用参数  $G$  表达的热稳公式

$$2G_{1i}G_{2i}(1-G_{1i}G_{2i})\frac{db_i}{df_i} - b_iG_{2i}(1-2G_{1i}G_{2i})\frac{dG_{1i}}{df_i} + G_{1i}b_i\frac{dG_{2i}}{df_i} = 0, \quad (i=x, y) \quad (4)$$

若腔内除板条介质以外,无其它光学元件时,则 (4) 式变为

$$2G_{1i}G_{2i}(1-G_{1i}G_{2i})l_1l_2 - b_iG_{2i}(1-2G_{1i}G_{2i})l_2 + G_{1i}b_il_1[1 - (l_2/R_2)] = 0, \quad (i=x, y) \quad (5)$$

只要  $R_2$ 、 $l_1$ 、 $l_2$  满足 (5) 式,平凹腔板条激光器在该点附近输出是热稳的.

### 3 理论计算与实验结果

#### 3.1 腔输出光斑半径随热焦距的变化关系

从 (5) 式出发,根据测得的热焦距,选取  $R_2 = 2 \text{ m}$  的全反球面镜,  $l_2 \approx 670 \text{ mm}$ ,  $l_1 \approx 150 \text{ mm}$ ,组成平凹结构的热稳腔,该腔输出光斑半径随热焦距变化的理论曲线如图 4 所示,由于腔的热稳范围较大,板条介质在宽度及厚度两个方向的热焦距变化范围,都在该腔的热稳区内,因而不必从两个方向分别补偿,这就简化了腔结构.

#### 3.2 输入功率与输出功率和发散角的关系

用  $f = 1 \text{ m}$  的透镜测量输出发散角,图 5 为板条激光器输入功率与输出功率和发散角(半角)关系曲线,可见发散角不随输入输出功率增加而变,一般未作热补偿的腔由于没作

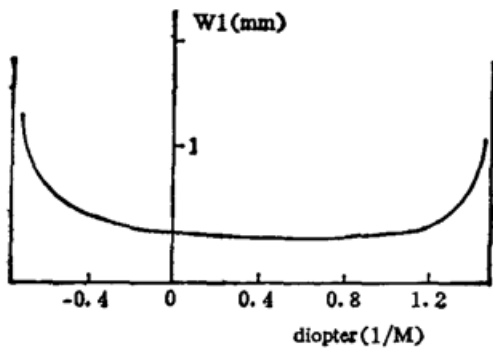


Fig. 4 The computerized output spot radius vs. thermal dioptr of the laser slab.  $R=2\text{ m}$ ,  $l_1=670\text{ mm}$ ,  $l_2=150\text{ mm}$

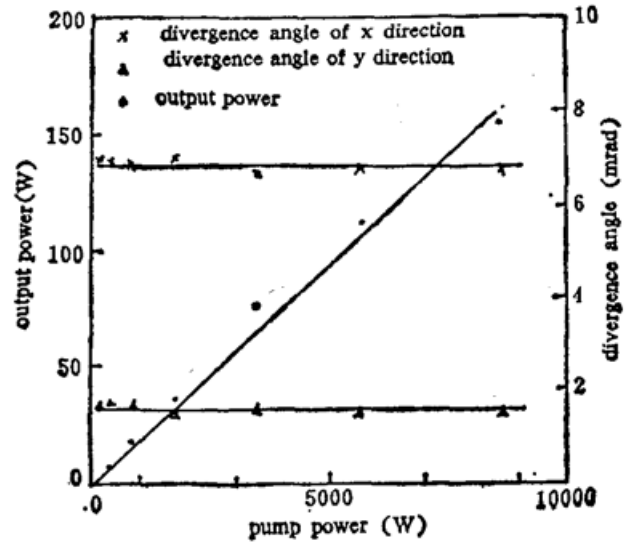


Fig. 5 Measured divergence angle and output power vs. pump power

热稳考虑, 发散角随输入输出增加而增加<sup>[6,7]</sup>, 我们用同样结构的平行平面腔作对比, 发散角也是随输入输出增加而增大。

### 4 讨论及改善发散角的方法

板条激光器在高平均功率输出时, 研究改善输出光束质量, 减小发散角, 仍是开发板条激光器应用前景的重要内容。考虑如图 6 所示的谐振腔, 反射镜的曲率中心与凹透镜的虚焦点几乎是重合的, 即

$$R > f, \quad l = R - f - \Delta. \quad (6)$$

式中  $\Delta$  是小量,  $\Delta > 0$  时, 腔处于非稳态,  $G_1 G_2 > 1$  所以腔的本征模是点光束, 由非稳腔的点光束模式, 可得理论光束发散角<sup>[8]</sup>

$$\alpha^2 = (a/l_2)^2 + (\lambda/\pi a)^2, \quad (7)$$

$$l_2 = f(l_1 + R - f - \Delta)/(l_1 + R - \Delta). \quad (8)$$

由纯几何分量与衍射分量的贡献组成,  $l_2$  为光束经平面输出镜反射之前的共轭象点到输出光阑的距离,  $a$  为输出光阑孔径, 对于板条为相应方向的口径, 为便于表述引进量  $l_1$ 。设  $l_1$  为以下一元二次方程的解

$$Al_1^2 + Bl_1 + C = 0, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= -2[(d+f)(R-2\Delta) - f^2], \\ B &= 4[(R-\Delta)f^2 - (d+f)(R-\Delta)^2], \\ C &= -2R[(d+f)(R-\Delta)^2 - f^2(R-\Delta)]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当  $\Delta \rightarrow 0$  时, 由 (9), (10) 可得  $l_1 + R = 0$ ,  $l_2 \rightarrow \infty$ , 发散角的几何分量趋于零, 光束发散仅受衍射影响, 这就提供了一个压缩发散角的途径。

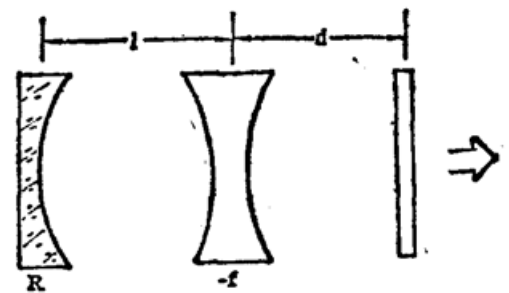


Fig. 6 The equivalent resonator configuration used for compressing divergence angle

实验采用增加对板条的泵浦功率, 使得其热效应很严重, 在厚度方向热透镜焦距约为  $-0.7\text{ m}$ . 在平行平面腔情况下, 该方向输出激光发散角(半角)接近  $5\text{ mrad}$ . 在这种情况下作压缩发散角尝试, 将图 6 中  $-f$  作为厚度方向热透镜焦距, 即  $-f = -0.7\text{ m}$ . 因为在宽度方向的热透镜焦距与厚度方向不同, 要兼顾宽度方向和避免腔长过长, 所以后腔镜不用曲率半径太小的凹球面镜, 而在贴近后腔镜处插入母线沿宽度方向的柱面凸透镜, 它改善厚度方向的发散角, 而对宽度方向无影响. 由等效的  $R$  及  $f$ , 调节  $l$  使其处于  $\Delta (= R - f - l) \rightarrow 0$ , 在厚度方向进行了压缩发散角尝试, 得到了满意的结果. 光束发散角由未补偿前的约  $5\text{ mrad}$  降低为小于  $1.5\text{ mrad}$ , 而输出能量则为未补偿前的  $85\% \sim 90\%$ , 仅牺牲了  $15\%$  左右的输出能量. 由于加入腔内的柱面透镜没有在表面镀上增透膜, 估计镀增透膜以后输出还会有所增加. 这种方法也很容易推广应用于在两个方向同时压缩发散角.

### 参 考 文 献

- [1] J. M. Feggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*, The Slab Geometry Laser-Part I: Theory. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20** (3): 289~300
- [2] T. J. Kane, R. C. Eckardt, R. L. Byer, Reduced Thermal Focusing and Birefringence in Zig-Zag Slab Geometry Crystalline Lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19** (9): 1351~1354
- [3] Kazuki Kuba, Takashi Yamamoto, Shigenori Yagi, Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator, *Opt. Lett.*, 1990, **15** (2): 12~123
- [4] 王绍民. 片状固体激光器内在的尊准相位共轭性质. *应用激光*, 1984, **4** (3): 109~110
- [5] 何慧娟, 李永春, 顾圣如等. 输出平均功率达 200 W 的板状激光器. *中国激光*, 1990, **17**(9): 513~516
- [6] B. Lu, B. cai, Y. Liao, S. Xu *et al.*, Flowing air-water cooled slab Nd:glass laser. *Proc. SPIE*, 1988, **1021**: 175~180
- [7] Takeshi Kasai, Yoshihiko Sindo, and Keiji Haga, High average power Nd:YAG slab laser" *Proc. SPIE*, 1989, **1040**: 32~36
- [8] 吕百达. *激光光学*. 成都: 四川大学出版社, 1986: 205

## Investigation on thermal stability of solid-state slab laser

LIAO YAN    HE HUIJUAN    LI YONGCHUN    GU SHENGRU

ZHAO LONGXING    QIAN LINXING    WANG ZHIJIANG

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

(Received 2 July 1991; revised 5 December 1991)

### Abstract

A slab laser is operated thermal-stably with almost invariant divergence angle within the pump power ranging from 150 W to 10000 W. The maximum laser output power is over 150 W. The compression of output divergence angle by placing suitable cylindrical lens into the resonator is also reported in this paper.

**Key words** slab laser, thermal stability, compressing divergence angle.