

文章编号: 1001-3806(2003)03-0199-03

## 凹凸激光谐振腔参数的热设计

夏惠军 杨明金 赵刚 苏心智  
(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 讨论了凹凸稳定腔激光输出束散角与激光腔各参数的关系, 得出了一系列激光棒热光焦度变化和束散角变化数据, 并分析了这些数据。

关键词: 束散角; 腔参数; 热光焦度

中图分类号: TN242 文献标识码: A

### Thermal parameters of concave convex laser resonator

Xia Huijun, Yang Mingjin, Zhao Gang, Su Xinzhi  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

**Abstract:** In the paper, the relation between laser divergence and parameters of concave convex laser resonator has been experimentally investigated. A series of data about Nd:YAG rod thermal diopter and laser divergence have been obtained and analyzed.

**Key words:** laser divergence; resonator parameters; thermal diopter

### 引言

激光发射器是激光目标指示器的核心部件, 整机的许多主要指标是由激光发射器来满足的, 其中光束束散角是一个重要的指标。深入研究激光谐振腔各参数对束散角的影响是开发激光目标指示器关键任务之一。作者着重分析了一种激光器的各参数与束散角的关系及在技术上的处理。

### 1 对谐振腔参数的计算分析

图 1 是一激光发射器示意图。谐振腔为凹凸球面折叠腔。凸镜的  $R_2 = -615\text{mm}$ , 对  $1.06\mu\text{m}$  全反。凹镜的  $R_1 = 930\text{mm}$ , 对  $1.06\mu\text{m}$  的反射率  $R = 20\%$  作为半反耦合输出镜。输出校正镜的  $R_3 = 312.6\text{mm}$ 。

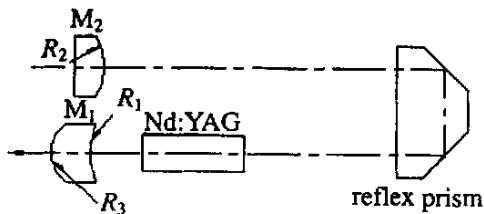


Fig. 1 Schematic diagram of YAG laser

谐振腔腔长  $L = 490\text{mm}$ 。由稳定条件  $0 < g_1 g_2 < 1$  知此为稳定腔, 且向虚共心介稳腔接近(当  $g_1 g_2 = 1$  时, 为介稳)。

当激光器按  $20\text{Hz}$  的重复频率工作时, 由于传热状况和热的积累, 晶体内部不同部位温度不同。而 Nd:YAG 晶体的折射率会随温度变化, 这种变化大致可分为两类。一类是工作物质 YAG 的外围表面部分的折射率无规则的变化, 把腔内振荡波型设计成球面波正好对这类变化不敏感。这是因为 Nd:YAG 的外围表面部分已不在振荡波型包络内。另一类可作这样分析, 由于泵浦脉冲间隔时间  $\Delta t$  短于激光棒的热弛豫时间  $\tau$ , 其温度分布很容易达到稳态, 是有规律的变化, 晶体的中心温度高, 边缘温度低, 成轴对称变化<sup>[1]</sup>。在均匀泵浦条件下, 用 1 维稳态热传导方程和辐射边界条件进行分析, 整个晶体棒的热畸变引起光程变化特征等价于一个一定焦距  $f$  的透镜。它对谐振腔的影响等效于使其中一个反射镜的表观球心位置发生了移动。

如图 2 所示, 作者把晶体的热透镜效应看成是具有光焦度  $D$  的透镜, 这里  $D = 1/f$ , 图 2 是含有一个热透镜的多元件球面谐振腔。引入  $g^*$  参数<sup>[2,3]</sup>:

$$L^* = d_1 + d_2 - D d_1 d_2 = L - D d_1 d_2 \quad (1)$$

$$g_1^* = g_1 - D d_2 (1 - d_1/R_1) \quad (2)$$

$$g_2^* = g_2 - D d_1 (1 - d_2/R_2) \quad (3)$$

作者简介: 夏惠军, 男, 1974 年 12 月出生。硕士研究生。现主要从事激光技术方面的研究工作。

收稿日期: 2002-06-12; 收到修改稿日期: 2002-09-17

由(1)式~(3)式可知,没有热透镜效应(即  $D = 0$ )时,  $L^* = L, g_1^* = g_1, g_2^* = g_2$ 。

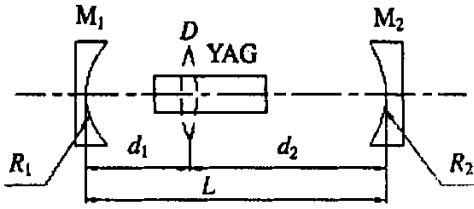


Fig. 2 Equivalent resonator with internal thermal focusing

现在就  $g^*$  参数等价腔对热透镜腔进行分析,稳定性条件为  $0 < g_1^* g_2^* < 1$ 。定义当  $g_1^* g_2^* = 1$  时,临界光焦度为:

$$D_1 = -1/(R_1 - d_1) - 1/(R_2 - d_2) \quad (4)$$

$$D_4 = 1/d_1 + 1/d_2 \quad (5)$$

当  $g_1^* g_2^* = 0$  时,临界光焦度为:

$$D_2 = 1/d_2 - 1/(R_1 - d_1) \quad (6)$$

$$D_3 = 1/d_1 - 1/(R_2 - d_2) \quad (7)$$

由(2)式, (3)式得:

$$g_2^* - g_2 = (g_1^* - g_1) \frac{d_1/d_2 + g_2}{d_2/d_1 + g_1} \quad (8)$$

如图3,对于本凸凹稳定腔其工作区在第1象限空白区域部分范围内(阴影部分为非稳腔工作区)。

$$\theta_{m_1, n}^2 = \frac{[g_2^* (L^*/R_1)^2 + g_1^* (1 - g_1^* g_2^*)]^2 R_0^2 / L^{*2}}{g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*) + \{d_1/L^* [g_2^* (L^*/R_1)^2 + g_1^* (1 - g_1^* g_2^*)] - g_2^* (L^*/R_1)\}^2} \quad (10)$$

式中,  $R_0$  为 Nd:YAG 晶体棒实际利用的半径,  $R_0 = 2.5\text{mm}$ 。

将  $R_1, R_3$  处理成一薄透镜,激光经  $R_1, R_3$  输出时外发散角(即通常意义下的高斯光束远场发散角)由下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\theta = 2\theta_{m_1, n} \frac{[\xi^2 + (L_{01} - f')^2]^{1/2}}{f'} \quad (11)$$

$$\xi^2 = \left\{ L^* \frac{[g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)]^{1/2}}{g_2^* (L^*/R_1)^2 + g_1^* (1 - g_1^* g_2^*)} \right\}^2 \quad (12)$$

Table 1 Summary of parameters

|                               |          |        |        |        |        |        |        |        |          |
|-------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| $D/10^{-3}\text{mm}^{-1}$     | -0.1983  | 0      | 0.1767 | 0.3647 | 0.5537 | 0.7237 | 0.8937 | 1.0637 | 1.2356   |
| $L^*/\text{mm}$               | 496.10   | 490    | 484.56 | 478.77 | 472.95 | 467.72 | 462.49 | 457.26 | 451.96   |
| $g_1^*$                       | 0.5490   | 0.4731 | 0.4055 | 0.3335 | 0.2611 | 0.1960 | 0.1309 | 0.0658 | 0        |
| $g_2^*$                       | 1.8213   | 1.7967 | 1.7748 | 1.7515 | 1.7281 | 1.7070 | 1.6859 | 1.6648 | 1.6435   |
| $g_1^* \cdot g_2^*$           | 1        | 0.8501 | 0.7196 | 0.5841 | 0.4512 | 0.3346 | 0.2207 | 0.1096 | 0        |
| $L_{01}/\text{mm}$            | 930      | 814.21 | 752.46 | 716.05 | 704.21 | 714.23 | 747.16 | 811.77 | 930      |
| $\theta_{m_1, n}/\text{mrad}$ | —        | 3.1197 | 3.2440 | 3.3247 | 3.3522 | 3.3289 | 3.2554 | 3.1243 | —        |
| $\theta/\text{mrad}$          | —        | 2.2016 | 2.8348 | 3.1893 | 3.3035 | 3.2068 | 2.8868 | 2.2280 | —        |
| state                         | critical | stable | stable | stable | stable | stable | stable | stable | critical |

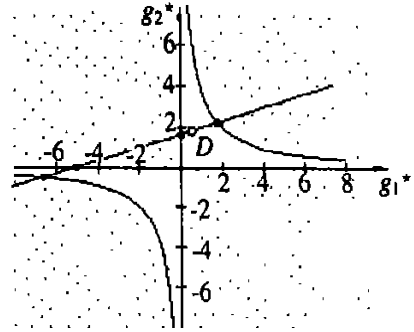


Fig. 3 Stability diagram

$g^*$  参数图上工作点从  $D = 0$  开始,随着泵浦功率的变化按(8)式作直线运动,直线斜率  $K$  为:

$$K = (d_1/d_2 + g_2)/(d_2/d_1 + g_1) \quad (9)$$

当光焦度  $D$  处于  $D_1$  和  $D_2$  之间时,谐振腔符合稳定条件。由激光器谐振腔的参数  $R_1 = 930\text{mm}, R_2 = -615\text{mm}, d_1 = 74\text{mm}, d_2 = 416\text{mm}$  可算出:  $K = 0.3240\text{mm}, D_1 = -0.1983 \times 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ ,对应热焦距  $f_1 = -5042.9\text{mm}; D_2 = 1.2356 \times 10^{-3}\text{mm}^{-1}$ ,对应热焦距  $f_2 = 809.32\text{mm}$ 。

当热透镜效应产生的光焦度满足  $-0.1983 \times 10^{-3}\text{mm}^{-1} < D < 1.2356 \times 10^{-3}\text{mm}^{-1}$  时,谐振腔是稳定的。其内发散角(定义在光学谐振腔内介质中,高斯光束的发散角为内发散角)可由下式计算:

$L_{01}$  为激光出射前腰斑与  $R_1$  的距离,由下式计算:

$$L_{01} = L^* \frac{g_2^* (L^*/R_1)}{g_2^* (L^*/R_1)^2 + g_1^* (1 - g_1^* g_2^*)} \quad (13)$$

由(11)式~(13)式知,  $\theta$  取最小值时,薄透镜像方焦距:

$$f' = R_1 = 930 \quad (14)$$

由薄透镜焦距公式得:  $R_3 = (n - 1)/nR_1$  (15)

取  $n = 1.50624$  可计算得  $R_3 = 312.6\text{mm}$ 。其它各计算数据列于表1中。

由表中可以看出束散角  $\theta$  随光焦度  $D$  的变化, 如图 4 所示, 在  $D = 0.5537 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$  附近较大的范围, 束散变化不大。例如,  $D = 0.3737 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1} \sim 0.7297 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ , 束散角变化为  $\theta = 3.20 \text{mrad} \sim 3.30 \text{mrad}$ , 图 4 两小黑点之间曲线标示为此范围。实验测得重频 20pps 输入能量分别为 6J, 7J, 对应输出能量分别为 63mJ, 72mJ, 对应束散角分别在  $2.4 \text{mrad} \sim 2.5 \text{mrad}$ ,  $2.5 \text{mrad} \sim 2.6 \text{mrad}$  范围内变化, 与光焦度  $D$  在曲线的峰顶部分基本一致。

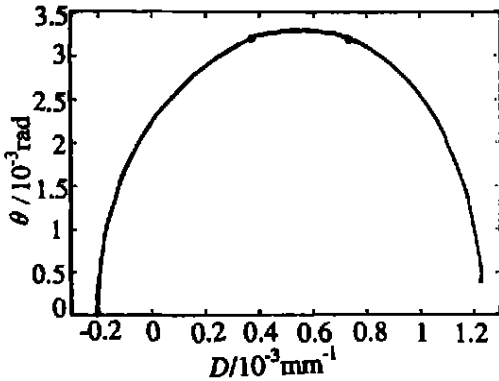


Fig. 4 Curve of divergence  $\theta$  versus thermal diopter  $D$

当  $D$  处于 0 到  $-0.1983 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$  之间时, 这是负透镜效应。激光器开始工作的很短时间内, 这时输出的激光能量会有所降低。过后便趋于稳定, 产生正透镜效应。

当  $D$  由  $-0.1983 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$  变到  $1.2356 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$  时, 对应  $g_1^* \cdot g_2^*$  的值由 1 变到 0, 全反射镜  $M_2$  的镜面上的光斑由大变到小, 最后聚成一点。考虑到全反射镜  $M_2$  不被光损伤,  $M_2$  镜上的光斑必须有一个最小尺寸限制。也就是说设计时选择  $D$  的工作点应向  $D_1$  靠近。

## 2 小结

为保证好的束散, 对一台激光器应作如下考虑。

(1) 选择折叠腔是在小的结构尺寸情况下, 以加大谐振腔长来改善束散, 加长脉宽。同时还使得全反射镜膜片和半反射镜膜片同在激光器的一个端面, 而在另一端放置全反射棱镜。这样的结构在受热变形时, 谐振腔的两个反射镜膜片位置变形状态基本一致, 而不影响谐振腔。

(2) 选用球面稳定谐振腔主要是由于该腔损耗低, 要求调整精度低。适用于这里选用的长腔和折叠腔。为改进束散, 又不影响激光器的输出, 采用激光棒的自孔径限制光束, 并使谐振腔向介稳工作状态趋近, 以获得准球面波。这种选择带来两个好处。一是腔内振荡的球面波型对 YAG 激光棒的折射率热不均匀畸变不敏感。二是振荡的球面波型很容易地用光学系统校正为平面波输出。

(3) 虽然介稳腔可带来小的束散, 但在开始工作时出现负透镜效应, 腔的损耗加大, 出光很弱, 甚至不出光, 且要求调整精度相对较高, 是不可取的。

(4) 考虑到热稳定性时, 一方面要求热透镜的光焦度  $D$  的变化范围大, 而对束散  $\theta$  的改变不大, 则要求  $D$  处于临界光焦度  $D_1$  和  $D_2$  之间。另一方面还要考虑到全反射镜膜片不被光损伤, 则要求  $D$  要偏向  $D_1$  一边, 使全反射镜  $M_2$  上的光斑大一点。

## 参 考 文 献

- [1] Steffen J, Lörtscher J, Herziger G. IEEE J Q E, 1972, 8(2): 239 ~ 245.
- [2] 吕百达. 激光光学. 2 版, 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [3] Driedger K P, Hflander R M, Weber H. IEEE J Q E, 1988, 24(4): 665~ 674.
- [4] 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术. 成都: 电子科技大学出版社, 1999.