

·激光技术·

## 热透镜效应对固体激光器输出影响研究

蔡军<sup>1</sup>, 张晓娟<sup>1</sup>, 徐涛<sup>2</sup>

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201; 2. 中航工业西飞公司技术中心 115室, 陕西 西安 710089)

**摘要:**对含热透镜的固体激光器谐振腔进行理论分析, 得到等效谐振腔的  $G$  参数, 分析讨论  $G$  参数随泵浦功率的变化, 给出了不同腔型输出功率的变化情况。采用 Tm:YAP 激光器作为研究对象, 由实验验证了不同腔型激光输出功率的变化, 得出对平平腔固体激光器而言, 短腔适合高功率输出的结论。

**关键词:** 热透镜效应; 固体激光器; 输出功率

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0015-03

## Influence of Thermal Lens Effect on Output of Solid State Laser

CAI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-juan<sup>1</sup>, XU Tao<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China; 2. Technology Center, AVIC Xi'an Aircraft Industry Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The solid state laser resonance cavity with thermal lens is analyzed, the  $G$  parameters of resonance cavity are obtained, changing  $G$  parameters with the pumped power are analyzed and discussed, and the changes of output power of the different cavity are presented. By studying the Tm:YAP laser, the changes of output power of different cavity are validated by the experimental results. To the plane-plane cavity solid state laser, a conclusion that short cavity is appropriate for high power output is obtained.

**Key words:** thermal lens effect; solid state laser; output power

LD 泵浦固体激光器具有体积小、结构简单、功率高等优点, 使其成为近些年来研究热点。但是, 当固体激光器运转时, 泵浦光的能量在晶体内部转换成热能, 导致晶体内部的温度分布不均匀, 应力发生变化, 由于温度和应力的改变使折射率发生改变, 产生热效应。激光晶体的热效应(包括热透镜效应、热致衍射损耗和热破裂等)会对激光器的运转带来严重的影响<sup>[1,2]</sup>, 影响激光器的输出功率、输出光束质量等。其中, 热透镜效应(包括温度梯度、端面效应和热致双折射等)是激光运转中产生影响最大的<sup>[3]</sup>。

首先对固体激光器的等效谐振腔进行理论分析,

最后由实验验证热透镜效应对激光输出的影响。

### 1 理论分析

激光晶体位于激光腔内, 晶体长为  $l$ , 折射率为  $n_0$ , 晶体距前后腔镜的距离分别为  $d_1, d_2$ 。当泵浦功率较大时, 晶体吸热会产生光学畸变, 包括由于受热不均匀导致的折射率变化、内应力变化和晶体端面的曲率变化, 这些效应在谐振腔中产生一个等效凸透镜的作用, 设透镜焦距为  $f$ , 主面到晶体端面的距离为  $h$ 。根据文献<sup>[4]</sup>有

$$\frac{1}{f} = \frac{2n_0}{b} \sin^2 \frac{l}{b} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-12-25

基金项目: 光电信息控制和安全技术重点实验室基金项目(9140C150104100C1501)

作者简介: 蔡军(1975-), 女, 江苏泰兴人, 学士, 工程师, 主要从事固体激光器及相关研究。

$$h = \frac{b}{2n_0} \tan \frac{l}{b} \quad (2)$$

式中,  $b$  为抽运激光电输入功率的函数, 引入常数  $c$ , 可描述为  $b^2 = cP_m^{-1}$ ,  $P_m$  为抽运激光功率, 由于热透镜焦距一般都远大于晶体长度, 式(1)、式(2)简化为

$$f = MP_{in}^{-1} \quad (3)$$

$$h = \frac{l}{2n_0} \quad (4)$$

则激光谐振腔可以等效为含薄透镜的激光谐振腔, 见图1。

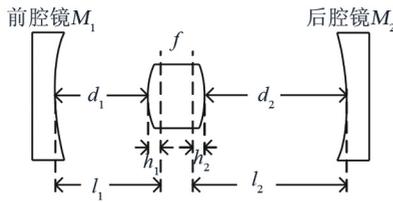


图1 含热透镜的激光谐振腔

腔内变化矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则,  $a = 1 - l_2 \frac{1}{f}$ ;  $b = l_1 + l_2 - l_1 l_2 \frac{1}{f}$ ;  $c = -\frac{1}{f}$ ;  $d = 1 - l_1 \frac{1}{f}$ 。其对应空腔时参数为

$$g_1 = 1 - \frac{l_1 + l_2}{R_1}; g_2 = 1 - \frac{l_1 + l_2}{R_2} \quad (6)$$

而含有热透镜谐振腔的等效  $G$  参数  $g^*$  及等效腔长  $L^*$  为

$$g_1^* = g_1 - \frac{l_2(1 - \frac{l_1}{R_1})}{f} \quad (7)$$

$$g_2^* = g_2 - \frac{l_1(1 - \frac{l_2}{R_2})}{f} \quad (8)$$

$$L^* = l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f} \quad (9)$$

将式(7)、式(8)消去  $f$ , 得到

$$g_2^* = \frac{l_1(1 - \frac{l_2}{R_2})}{l_2(1 - \frac{l_1}{R_1})} g_1^* + 1 - \frac{l_1 + l_2}{R_2} - \quad (10)$$

$$\frac{l_1(1 - \frac{l_2}{R_2})}{l_2(1 - \frac{l_1}{R_1})} (1 - \frac{l_1 + l_2}{R_1})$$

其中,  $l_1 = d_1 + h_1, l_2 = d_2 + h_2, h_1 = h_2 = h = l/2n_0$ 。

对平平腔,  $R_1 = \infty, R_2 = \infty$ , 则有

$$g_2^* = \frac{d_1 + l/2n_0}{d_2 + l/2n_0} g_1^* + \frac{d_2 - d_1}{d_2 + l/2n_0} \quad (11)$$

在  $g^*$  参数坐标系中, 如图2所示,  $g_2^*$  是关于  $g_1^*$  的一条直线。当  $0 < g_1^* g_2^* < 1$  时, 对应图2中阴影部分, 谐振腔为稳定腔, 当  $g_1^* g_2^* = 0$  或  $1$  时, 谐振腔处于从稳定腔转化为非稳腔的临界点, 对应图2中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点, 随着泵浦功率的增加,  $g_1^*$ 、 $g_2^*$  沿图2中直线从  $A$  点向  $D$  点变化。

由式(11)可知,  $B$  点处有

$$g_2^* = 0, g_1^* = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + l/2n_0} \quad (12)$$

$C$  点处有

$$g_1^* = 0, g_2^* = \frac{d_2 - d_1}{d_2 + l/2n_0} \quad (13)$$

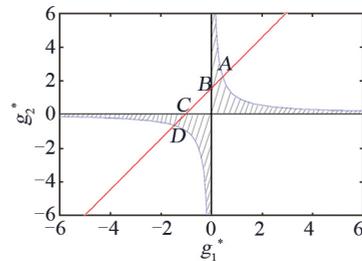


图2  $G$  参数坐标, 临界点  $A, B, C, D$

可见, 直线  $AD$  的斜率随着腔型的变化而变化, 随着  $d_1, d_2$  取值不同,  $BC$  的长度也不同。

随着泵浦功率的增加,  $g_1^*, g_2^*$  从  $AB$  段进入  $CD$  段, 谐振腔从稳定腔变为非稳腔。由于双折射效应, 径向和切向热透镜效应不同, 径向和切向等效谐振腔不是同时进入非稳腔。有以下3种情况<sup>[5]</sup>:

(1)  $BC$  段很小。随着泵浦功率的增加, 输出功率增加, 直至径向等效谐振腔进入  $BC$  段(变为非稳腔), 径向等效谐振腔输出功率减小。而此时, 切向等效谐振腔还处于  $AB$  段(稳定腔), 切向等效谐振腔输出功率仍在增加。因  $BC$  段很小, 当径向等效谐振腔进入  $CD$  段(又变为稳定腔), 切向等效谐振腔一直处于  $AB$  段(稳定腔)或者切向等效谐振腔刚刚进入  $BC$  段, 也就是, 径向等效谐振腔和切向等效谐振腔总有一个处于稳定腔。随着泵浦功率的增加, 总有一个方向的等效谐振腔输出功率一直在增加, 表现为总的输出功率减小幅度不大, 甚至是增加。

(2)BC段较大。随着泵浦功率的增加,输出功率增加,直至径向等效谐振腔进入BC段(变为非稳腔),径向等效谐振腔输出功率减小。此时,切向等效谐振腔还处于AB段(稳定腔),切向等效谐振腔输出功率随泵浦功率增加而增加,总的输出功率表现为增加。因BC段较大,径向谐振腔还没有进入到CD段,切向热透镜对应的等效腔也进入了BC段,变为非稳腔,此时总的输出功率开始减小。当径向等效谐振腔进入CD段后,输出功率又开始增加。

(3)BC段很大。开始时,输出功率变化同情况2),当径向等效腔到达C点时,输出功率达到最小值;径向等效腔在CD段时,输出功率增加;当径向等效谐振腔到达D点时,输出功率达到第二个最大值,此后,随着泵浦功率增加,径向等效谐振腔又进入非稳状态,由于BC段很大,切向等效谐振腔仍处于BC段,输出功率又开始下降。继续增加泵浦功率,切向等效谐振腔进入CD段,输出功率又再次增加。

## 2 实验结果与讨论

实验验证以上3种情况,实验采用Tm:YAP激光器作为研究对象。实验装置如图3所示。

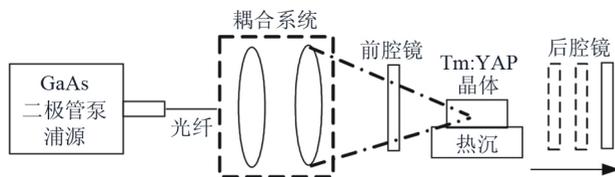


图3 不同腔长激光器实验示意图

Tm:YAP作为激光晶体,晶体为圆柱体,单掺 $Tm^{3+}$ 离子。采用800 nm半导体激光器作为泵浦源,泵浦光由芯径为 $400\ \mu m$ ,数值孔径角为0.22的光纤耦合输出,经过光学耦合系统准直后聚焦到YAP晶体中。

泵浦光聚焦到晶体上的尺寸约为 $530\ \mu m$ ,谐振腔设计为光束质量上接近基横模运转,同时在晶体上的激光光斑直径与泵浦聚焦光斑直径相接近(泵浦光束束腰略小于激光腔模束腰)<sup>[6]</sup>,这时有较高的泵浦匹配系数,热致衍射损耗几乎不随泵浦功率的增加而发生变化,主要考虑热透镜效应。

改变 $d_2$ 的值,可以获得不同的谐振腔,测量输出功率随泵浦功率的变化,如图4所示。

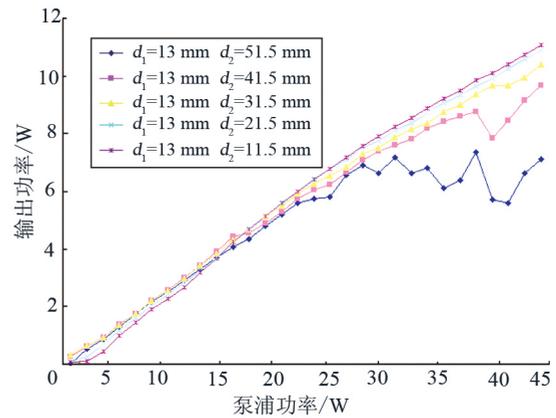


图4 不同谐振腔输出功率

实验表明,在 $d_1=13\ mm$ 相同时,当 $d_2=11.5\ mm$ 、 $21.5\ mm$ 、 $31.5\ mm$ 时,符合情况(1);当 $d_2=41.5\ mm$ 时, $d_1$ 和 $d_2$ 相差较大时,符合情况(2);当 $d_2=51.5\ mm$ 时, $d_1$ 和 $d_2$ 相差更大时,符合情况(3)。可见,对平平腔,晶体相对于腔镜两端的距离不大时,即 $d_1$ 和 $d_2$ 相差不大时,激光输出功率才不会有明显的下降点。

## 3 结论

理论分析了含热透镜的谐振腔,分析了平平腔G参数以及腔型结构对输出功率的影响,实验验证了不同腔型的输出功率变化。由实验结果可以看出,对平平腔固体激光器而言,短腔较适合高功率输出。

## 参考文献

- [1] Chen Y F. Optimization in Scaling Fiber-coupled laser-diode End-pumped Laser to Higher Power: Influence of Thermal Effects[J]. IEEE QE, 1997,33(8):1424-1429.
- [2] Agnesi A. Design and Characterization of a Diode-pumped, Single Longitudinal and Transverse Mode, Intracavity-doubled CW Nd:YAG laser[J]. Appl. Opt., 1997,36(3):597-601.
- [3] 张弛,李文博. LD泵浦Nd:YAG热效应研究[J]. 中国科技信息, 2006(17):258-259.
- [4] Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-column fundamental mode and high alignment stability [J]. Appl. Opt., 1986, 25(1):107-117.
- [5] 汪莎,刘崇,陈军,等. 固体激光器腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(10):1431-1435.
- [6] 姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社, 2007.