

基模稳功率固体激光器的实验研究

张包铮 林美荣 李江卫 姚和军 张光寅

(南开大学物理系, 天津 300071)

提要 本文分析了含有热透镜的固体激光腔, 动力学稳定性、模式特性和输出功率特性对动力学因子的依赖关系, 得出了稳模输出和稳功率输出的一般条件。实现了连续 Nd : YAG 激光器运转在稳功率点, 获得较大功率的基模输出。

关键词 固体激光腔, 稳功率输出

Experimental study on solid laser resonator with fundamental mode and stable-power output

ZHANG Baozheng, LIN Meirong, LI Jiangwei, YAO Hejun, ZHANG Guangyin

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract In this paper, the dependences of dynamic stability, mode property and character of output power on the dynamic factor for a solid laser resonator with a thermal lens is analyzed, and the conditions of stable-mode output and stable-power output under general case are also given. Experimentally the high TEM₀₀ power output of CW Nd : YAG laser operating in the stable-power state is obtained for the first time.

Key words solid laser resonator, stable-power output

1 引言

作者之二在工作[1]中曾指出, 在固体激光器的稳定区内, 除存在与 $dw_f/d(1/f) = 0$ 对应的热稳模点外, 还存在与 $dP_{out}/d(1/f) = 0$ 对应的热稳功率点 (w_f 为激光棒上光斑尺寸, P_{out} 为激光输出功率, f 为热焦距)。一般地, 两者运行状态不相同, 因而有热稳模腔与热稳功率腔之分。以前的工作[2]都只讨论了热稳模腔的问题。运行于热稳模点的激光器不一定稳功率输出。依据文献[1]的原理, 本工作设计了稳功率的连续 Nd : YAG 激光器, 实现了激光腔运转在稳功率点, 获得较大功率的稳定基模输出。实验结果与理论计算很好地符合。

2 激光腔模式特性

根据 Kogelnik^[3] 对含热透镜的谐振腔所建立的光学模成像理论, 连续或高重复率脉冲运

转的固体激光腔可以简化为一个内含热焦距为 f 的等效三镜腔,如图 1 所示。图中 R_1 和 R_2 分别为谐振腔输出镜和全反镜的曲率半径。 L_1 和 L_2 分别为热透镜到两个腔镜的距离。引入下述腔参数

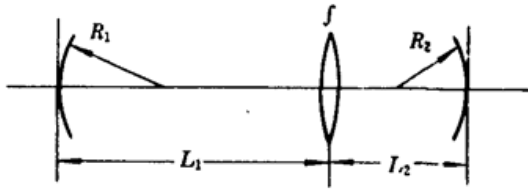


Fig. 1 The equivalent resonator with three mirrors

$$u_1 = L_1(1 - L_1/R_1) \quad (1)$$

$$u_2 = L_2(1 - L_2/R_2) \quad (2)$$

$$\chi = 1/f - 1/L_1 - 1/L_2 \quad (3)$$

$$g_1 = -(L_2/L_1)(1 + \chi u_1) \quad (4)$$

$$g_2 = -(L_1/L_2)(1 + \chi u_2) \quad (5)$$

$$L' = -L_1 L_2 \chi \quad (6)$$

激光棒上的基模光斑尺寸 ω_f 表示为^[1,2]

$$\omega_f^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{|2\chi u_1 u_2 + u_1 + u_2|}{[(1 - g_1 g_2) g_1 g_2]^{1/2}} \quad (7)$$

由于 ω_f^2 是热透镜曲光度 $1/f$ 的函数,因而热扰动将引起基模运转的不稳性。

谐振腔稳定运转条件为

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (8)$$

利用式(1)~(6)可将上述稳定条件改写为

$$0 < (1 + \chi u_1)(1 + \chi u_2) < 1 \quad (9)$$

激光棒上的基模光斑尺寸是动力学因子 $1/f$ 的函数,且依赖于腔参数。不难证明,当 $|u_1| > |u_2|$ 时,谐振腔存在两个动力学稳定区,稳定区边界对应的 χ 值分别为

$$\chi = -1/u_1 \quad \text{当 } g_1 = 0 \quad (10)$$

$$\chi = -1/u_2 \quad \text{当 } g_2 = 0 \quad (11)$$

$$\chi = 0 \quad \text{当 } g_1 g_2 = 1 \quad (12)$$

$$\chi = -1/u_1 - 1/u_2 \quad (13)$$

在两个动力学稳定区中间是非稳区,其宽度为

$$\Delta\chi = |1/u_2| - |1/u_1| \quad (14)$$

当 $|u_1| < |u_2|$ 时,同样存在两个动力学稳定区,只是上述结果的角码相互交换即可。当 $|u_1| = |u_2|$ 时,由(14)式可知非稳区宽度为零,这时仅存在一个宽度为 $2|1/u_1|$ 的动力学稳定区。

下面给出 ω_f 对 $1/f$ 的依赖关系的两种典型情况的计算结果。对于 $|u_1| > |u_2|$ 情况。采用平凸腔,设腔参数分别为 $L_1 = 30$ cm, $L_2 = 15$ cm, $R_1 = \infty$, $R_2 = -100$ cm。光斑尺寸 ω_f 随动力学因子 $1/f$ 变化的关系曲线如图 2 所示。 $\omega_f \sim 1/f$ 曲线表明,在两个动力学稳定区内, ω_f 随 $1/f$ 的变化都存在一个极小值,也就是此点 $d\omega_f/d(1/f) = 0$ 。激光运转在这两个状态($P_m^{(1)}$, $P_m^{(2)}$)时,由于热扰动引起 ω_f 的变化最小,一般称作热稳腔,确切地说是热稳模腔。

对于 $|u_1| = |u_2|$ 情况。设腔长参数 L_1 和 L_2 同上,两个腔镜曲率半径分别为 $R_1 = \infty$, $R_2 = -15$ cm。计算结果如图 3 所示。由图表明,此时激光腔不存在非稳区,两个动力学稳定区变为一个, ω_f 随 $1/f$ 的变化曲线存在一个极小值,对应于 P_m 。

3 激光腔的输出功率特性

激光腔运转时,除激光模体积随动力学因子 $1/f$ 变化外,腔增益和损耗也随动力学因子变化,因此要想严格地描述输出功率随 $1/f$ 的变化关系比较困难。为了考察激光输出功率特性,

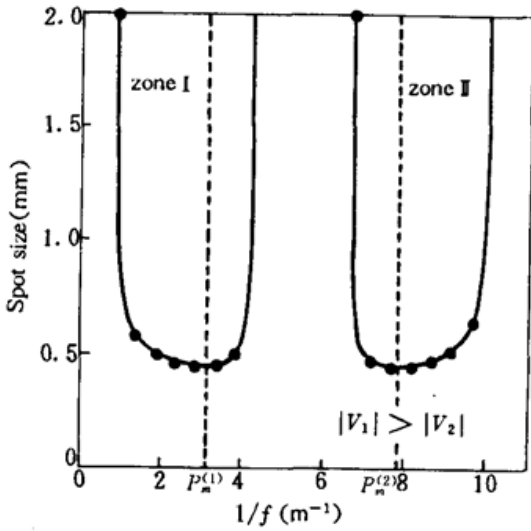


Fig. 2 The spot size w_f on the laser rod as a function of $1/f$, in $|u_1| > |u_2|$ case

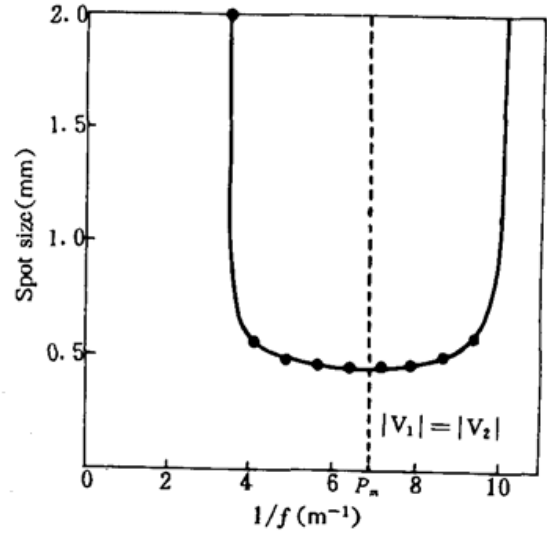


Fig. 3 The spot size w_f on the laser rod as a function of $1/f$, in $|u_1| = |u_2|$ case

我们对激光输出功率进行了实验观测。实验采用的 YAG 固体激光器其腔参数与上节 $|u_1| > |u_2|$ 的情况相同。激光棒尺寸为 $\phi 5 \times 120$ mm。谐振腔内未加小孔光阑。用 DW-2 型激光功率计测量输出功率,用旋转镜扫描激光束,光二极管作为接收器,在示波器荧光屏上观测激光输出模式。

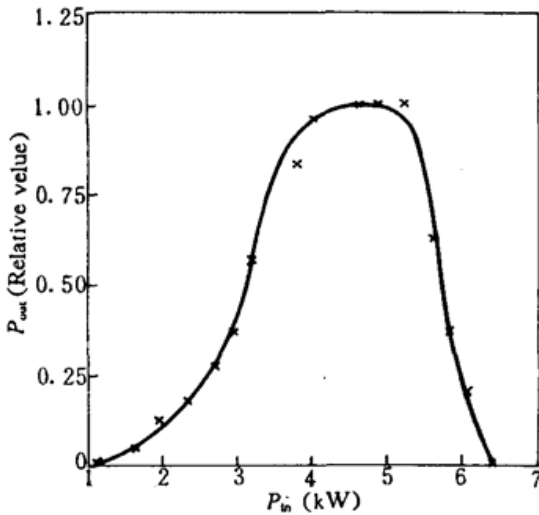


Fig. 4 The laser output power as a function of the input power

实验测量的输入功率 P_{in} 与输出功率 P_{out} 的关系曲线如图 4 所示。图 4 表明,在实验输入的功率范围内,激光输出功率存在一个极大值 P_0 ,此时 $dP_{out}/d(1/f) = 0$ 。这一点称稳功率点^[1]。在示波器上显示的激光输出模式如图 5 所示。图中表明,当输入功率为 5 kW 时,激光为基模输出,而输入功率小于或大于此值时,都有较强的高次模出现。

4 大基模体积稳功率运转

为了进一步分析固体激光腔热稳模运转与稳功率运转的关系,我们首先测量了激光棒在不

同输入功率下的热焦距 f ,最后得到经验公式为

$$1/f = aP_{in} + b \tag{15}$$

对于 $\phi 5 \times 120$ mm 的激光棒,公式中的系数 a 和 b 分别为:

$$a = 1 \text{ kW}^{-1} \text{ m}^{-1}, \quad b = -1.0 \text{ m}^{-1}$$

利用(15)式,可将图 4 横轴的 P_{in} 值变为 $1/f$ 值。于是可将图 2 的 $w_f \sim 1/f$ 曲线与图 4 合并成图 6。从图 6 可得出结论:(1) 在实验输入功率范围内,激光腔运转在第 I 动力学稳定区;(2) 稳功率点 P_P 在第 I 稳定区泵浦功率的高值边界处;(3) 在腔内未加小孔光阑限模的情况下,热稳模点 P_m 与稳功率点 P_P 不相重合。

功率输出特性与动力学稳定区的相对关系是不难理解的。当输入功率增加时,激光增益随

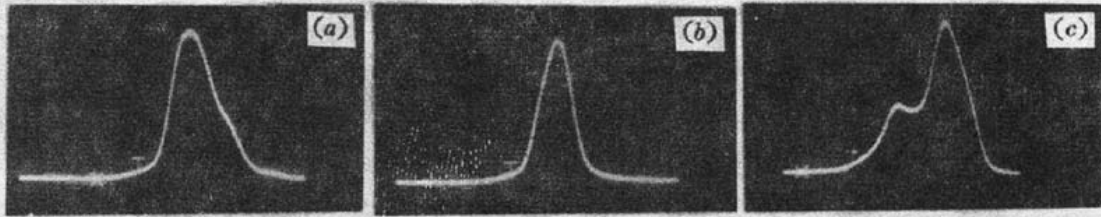


Fig. 5 The oscilloscope traces of the laser beam

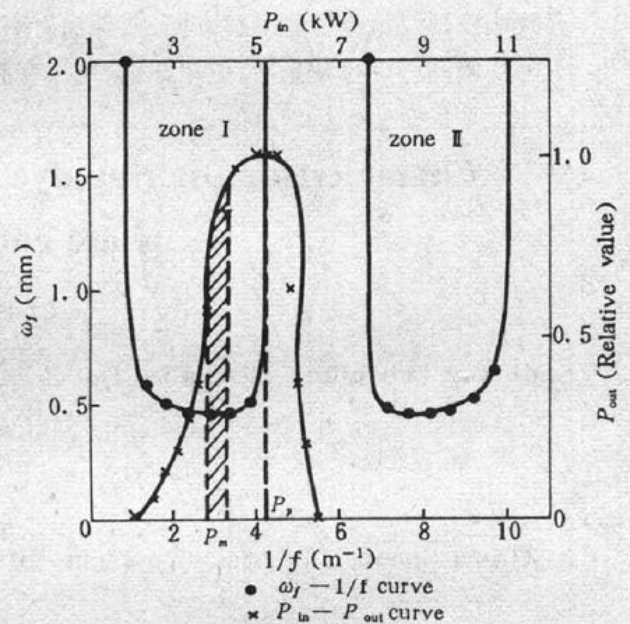
(a) $P_{in} = 4.5 \text{ kW}$; (b) $P_{in} = 5 \text{ kW}$; (c) $P_{in} = 5.3 \text{ kW}$

之增加,而当进入第 I 动力学稳定区时基模衍射损耗在减小。当增益高至与腔内总损耗(包括衍射损耗及输出损耗)相当时,此时对应于激光输出阈值。此点位于动力学稳定区的低泵浦边界值附近。当输入功率继续增加时,此时增益亦在增加总损耗不再增加,故功率迅速增加。当输入功率增加到稳定区的高值边界附近时,输出功率达到最大值。当输入功率继续增大时,将高于稳定区的高值边界进入高损耗的不稳定区,此时输出功率急剧下降。因此输出功率曲线在此稳定区的高边界值附近有一峰值,在峰值处呈现稳功率特征。

为了获得稳定的基模运转,传统的激光腔设计方法是,将激光器运转在 $d\omega_f/d(1/f) = 0$ 的热稳模点 P_m ,并认为此时模式稳定输出功率也就达到稳定^[2]。实际上,运行于热稳模点 p_m 时,由于输入功率 P_{in} 的起伏,输出功率 P_{out} 也将波动较大(见图 6 中的阴影区)。为了使激光腔在热稳模点运转,一般在腔内加入一小孔光阑进行限模,为此基模体积较小,从而使基模运转下的功率输出受到限制。

根据 2,3 两节分析得出的激光腔运转特性与动力学因子 $1/f$ 的关系,激光腔设计可采用如下方法:首先选取激光腔参数,根据(7)式计算出 $\omega_f \sim 1/f$ 曲线。使激光器运转在动力学稳定区的高值边界附近的稳功率点。由于激光棒为有限孔径,通过激光棒的自孔径限模,达到基模运转, ω_f 的最大值为 $\omega_f = \phi/\pi$ ^[1]。

根据上述设计方法,我们采用连续 Nd:YAG 激光器实验装置,其腔参数与 2 节中 $|u_1| > |u_2|$ 的情况相同,计算得出的 $\omega_f \sim 1/f$ 曲线即为图 6 所示。动力学稳定区高值边界对应的输入功率为 $P_m = 5 \text{ kW}$ 。当激光器运转在稳功率点时,获得基模输出功率为 34.5 W(而当运行在稳模点时,基模输出功率只 20 W 左右)。实验与理论得到很好吻合。

Fig. 6 The comparison of the $\omega_f \sim 1/f$ curve with the $P_{out} \sim 1/f$ curve

参 考 文 献

- 1 张光寅,张包铮,中国激光,19(5),321(1992)
- 2 V. Magni, *Appl. Opt.*, 25(1), 107(1986)
- 3 H. Kogelnik, *Bell. Syst. Tech. J.*, 44, 455(1965)