

LD 端面泵浦固体激光谐振腔的研究

陈昭炫¹, 蔡志平^{2*}, 黄朝红², 汪玉树¹

(1. 厦门大学物理学系, 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了对激光谐振腔体进行优化设计, 采用 $ABCD$ 光学传输矩阵理论, 计算得到具有普适性的三镜折叠腔内高斯模式束腰的解析解. 对一典型平-平热透镜腔进行计算分析, 结果表明: 在针对其进行优化设计的泵浦范围内, 腔体稳定性很好, 激光光斑半径基本不随泵浦功率变化而波动. 实验中以 808 nm 尾纤输出的激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 晶体产生连续 1 064 nm 激光, 激光输出结果与理论模型值能够较好地相符.

关键词: 传输矩阵; 激光光斑; 稳定腔; 固体激光器

中图分类号: O 443; TN 248

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2005) Sup-0343-04

随着工艺技术的成熟, 半导体激光器(即激光二极管 LD)的输出功率不断提高, 价格也不断下降. 利用 LD 作为泵浦源已成为固体激光器研究的主流. 通过良好的谐振腔设计, LD 泵浦固体激光器可同时实现高功率激光输出和较好的激光输出特性. 但多数对激光谐振腔的设计分析研究^[1-6]是采用 $ABCD$ 传输矩阵进行数值模拟计算, 研究或设计某种特殊的激光腔体结构, 其物理意义与工程应用往往缺乏通用性. 本文采用一种较之等价腔法更为简明的方法, 对具有普适性的三镜折叠无源腔进行分析, 计算得到该腔内光腰半径和位置的解析解. 实验中, 结合 Paolo Laporta^[7]等人的理论模型, 我们选定一组优化的腔体参数, 对一个典型线性结构的有源平-平腔进行了理论与实验的比较分析, 本文结果可为同类激光器的设计提供参考.

1 谐振腔解析解

1.1 无源折叠腔解析解

在固体激光器中, 为满足长腔和小束腰的要求, 如内腔倍频等, 常使用折叠腔^[3,4]. 采用 $ABCD$ 传输矩阵理论对图 1 所示三镜折叠腔进行分析, 设 M_1 、 M_2 曲率半径分别为 $R_1 = r$ 、 $R_2 = c$, 折叠镜 M 的曲率半径 $R = 2f$, 热透镜 M_T 焦距为 f_T , M_1 、 M_T 间距离为 x , M_1 、 M 的距离为 L , M_2 、 M 的距离为 l , 则从 M_T 处起始的往返矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L-x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/c & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L-x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/r & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{pmatrix}$$

解得 A 、 B 、 C 、 D 如下

$$\begin{cases} A = [-lh - L + x - l + \frac{(L-x)l}{f}] [\frac{2}{r} + \frac{1}{f_T} - \frac{2x}{rf_T} + \frac{1}{f} (1 - \frac{2m}{r} - \frac{L-x}{f_T}) - \frac{q}{f_T}] + ph, \\ B = [-lh - L + x - l + \frac{(L-x)l}{f}] q + [x + m - \frac{2xm}{r} - \frac{x(L-x)}{f_T}] h, \\ C = (lk - 1 + \frac{1}{f}) [\frac{2}{r} + \frac{1}{f_T} - \frac{2x}{rf_T} + \frac{1}{f} (1 - \frac{2m}{r} - \frac{L-x}{f_T}) - \frac{q}{f_T}] - pk, \\ D = (lk - 1 + \frac{1}{f}) q - [x + m - \frac{2xm}{r} - \frac{x(L-x)}{f_T}] k \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} p &= (1 - \frac{2m}{r} - \frac{L-x}{f_T}) - \frac{1}{f_T} [x + m - \frac{2xm}{r} - \frac{x(L-x)}{f_T}], \\ q &= x (\frac{1}{f} + \frac{1}{f_T} - \frac{L-x}{ff_T}) + (1 - \frac{2x}{r}) (\frac{m}{f} + \frac{x}{f_T} - 1), \\ h &= 1 - \frac{2(L-x+l)}{c} - \frac{(L-x)}{f} (1 - \frac{2l}{c}), \\ k &= \frac{2}{c} + \frac{1}{f} (1 - \frac{2l}{c}), \quad m = L - \frac{x(L-x)}{f_T}. \end{aligned}$$

稳定谐振腔的本征模在腔内往返一周后, 必须重现其自身, 有 $q = \frac{Aq+B}{Cq+D}$, 因腔内每个元件的传输矩阵都是么模矩阵, 有 $AD - BC = 1$, 对上式求解可

收稿日期: 2005-04-09

基金项目: 福建省重大基金(2002F011, 2004HZ01-1-3), 厦门大学学科技术创新工程基金(XDKJ CX20041003)资助

作者简介: 陈昭炫(1980-), 男, 硕士研究生.

*通讯作者: zpcai@jingxian.xmu.edu.cn

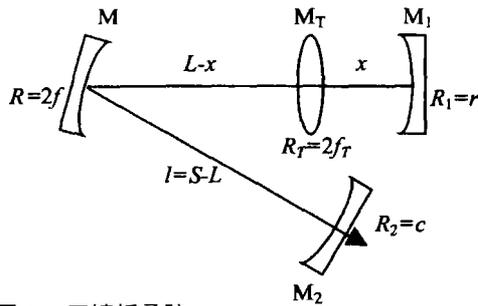


图 1 三镜折叠腔

Fig. 1 Schematic V-configuration cavity

得^[8]

$$\frac{1}{q} = \frac{D-A}{2B} \pm i \frac{\sqrt{1-(D+A)^2/4}}{B} = \frac{1}{R} - i \frac{1}{z},$$

$$z^2 = \frac{|B|}{\sqrt{1-(A+D)^2/4}} \quad (2)$$

考虑无源腔,即 $f_T \rightarrow \infty$ 的情况,为确定 $M_1 M$ 分臂的光腰位置,将 z^2 对 x 求导取极值

$$\frac{\partial z^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{|B|}{\sqrt{1-(A+D)^2/4}} \right) = 0,$$

解得光腰位置为

$$x_0 = \frac{(r + \frac{1}{2} \max) (r + \frac{1}{2} \min)}{r + 2 \frac{1}{2} \max - \frac{1}{2} \min}.$$

其中定义调整量 $\frac{1}{2} \max = L - f - r$, $\frac{1}{2} \min = \frac{f^2}{l - c - f}$,将此光腰位置 x_0 值代入式(1),再由式(2)

可得束腰半径 w_0 为

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 (r + \frac{1}{2} \max) (r + \frac{1}{2} \min) \cdot \frac{1}{(\frac{1}{2} \max - \frac{1}{2} \min) / (r + 2 \frac{1}{2} \max - \frac{1}{2} \min)^2},$$

光腔稳定性条件可用 $\frac{1}{2} \min < \frac{1}{2} \max$ ^[9].

1.2 有源线性腔解析解

线性腔与折叠腔都是驻波腔,因此分析光腔的方法相同.现在研究一个典型的例子:线性结构有源热透镜腔.图1中取镜 M, M_1 及 M_2 为平面镜,则折叠腔等效为线性腔,此时有 $f = r = c = \infty$,代入式(1)得

$$A = 1 - 2(2S - x)/f_T + 4x(S - x)/f_T^2,$$

$$B = 2S - 4x(S - x)/f_T, \quad D = 1 - 2x/f_T.$$

其中 $S = L + l$,将得出的 A, B, D 代入式(2)得到镜 M_T 处的激光光斑半径为

$$w^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 [2x(S - x) - S f_T]^2 f_T^2 / \{(S - x - f_T)(f_T - x)[x(S - x) - S f_T]\} \quad (3)$$

光腔稳定性参量

$$(A + D)/2 = 1 - 2(x^2 - Sx + S f_T)/f_T^2 \quad (4)$$

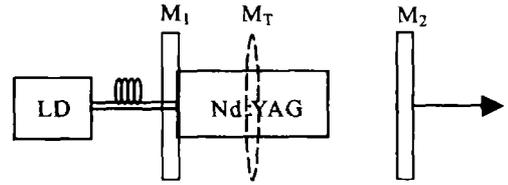


图 2 平平腔 Nd:YAG 激光器

Fig. 2 Nd:YAG laser of plano-plano cavity

2 腔体分析

对上述典型的有源线性腔进行腔体分析,研究图2所示 808 nm LD 泵浦 1 064 nm Nd:YAG 平-平腔激光器.将激光晶体中的热透镜效应视作在晶体中心放置一焦距为 f_T 的理想薄透镜,其上基模光斑半径作为激光晶体中的基模半径.热透镜焦距由下式给出^[10]

$$f_T = \frac{K_c \frac{2}{p}}{P_{in} (dn/dT)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-plc)} \quad (5)$$

选择相关的参数:晶体热导率 $K_c = 13 \text{ W/(mK)}$,泵浦光斑半径 $p = 200 \mu\text{m}$,热耗散率 $\alpha = 0.24$,晶体折射率 $n = 1.82$,折射率温度系数 $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,吸收系数 $\mu_p = 9 \text{ cm}^{-1}$,晶体长度 $l_c = 8 \text{ mm}$,腔长 $L_l = 38 \text{ mm}$,激光波长 $\lambda = 1 064 \text{ nm}$, P_{in} 为入射泵浦功率.对应图1,有 $S = L_l - l_c + l_c/n$, $x = l_c/(2n)$,将 S, x 及式(5)代入式(3)、(4),得到稳定性参数及晶体中心处激光光斑半径随 P_{in} 和 f_T 的变化曲线分别如图3、4所示.

稳定腔必须满足的条件是: $-1 < (A + D)/2 < 1$,因而越趋于稳区中心即 $(A + D)^2/4 \rightarrow 0$ 时,腔体就越稳定.从图3(a)可看出,随着入射泵浦功率的增加,腔体越来越稳定,在泵浦功率 $P_{in} = 10 \sim 16 \text{ W}$ 范围内, $(A + D)^2/4 < 0.05$,腔体处于最佳稳定状态,即使在 $P_{in} = 8 \sim 20 \text{ W}$, $(A + D)^2/4 < 0.25$,仍然非常稳定.图3(b)显示了热焦距 f_T 满足稳定性条件的容许变化范围很宽为 $34 \text{ mm} \sim \infty$,在我们感兴趣的 $43 \sim 200 \text{ mm}$ 范围内, $(A + D)^2/4 < 0.4$ 处于稳区中心附近,当 $f_T = 72 \text{ mm}$ 时, $(A + D)^2/4 \rightarrow 0$,腔体最稳定.

为了使泵浦光和激光模式能够稳定地达到匹配,激光晶体中心光斑半径的变化应缓慢平稳.由图4(a)可知,在强泵浦区,激光光斑半径随功率变化波动很小,在 $P_{in} = 8 \sim 20 \text{ W}$ 范围内, $w = 152 \sim 161 \mu\text{m}$,波动小于 3%,在 $P_{in} = 10 \sim 16 \text{ W}$, $w = (154 \pm 2) \mu\text{m}$,对泵浦功率的变化尤其不敏感.在低泵浦区,激光光斑稍大,但根据前面的稳定性分析,谐振腔要达到最佳稳定运转,必然会有一个从低功率泵浦到超过 10 W 的高功率泵浦的过渡.而从图4(b)可看出,当热焦距 $f_T =$

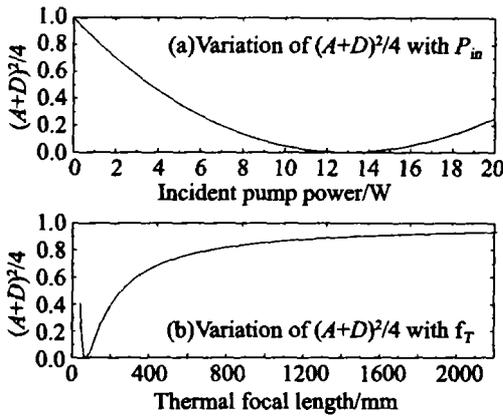


图3 稳定性参数 $(A + D)^2/4$ 随 P_{in} 及 f_T 的变化

Fig.3 Variation of the stability parameter $(A + D)^2/4$ with P_{in} and f_T

37 ~ 337 mm, 相应于 $P_{in} = 2.8 \sim 25$ W 时, 激光光斑半径为 $150 \mu m < r < 200 \mu m$, 处于正常的波动范围。

3 理论计算与实验结果

激光器 3 个重要参数阈值功率、输出功率和斜效率可表示为参数 r 的函数如下^[7]

$$P_{th} = \frac{I_{sat}}{2} \left(\frac{1}{p} + 2 \right) \quad (6)$$

$$P_{out}(r) = \frac{T}{2} \left(\frac{1}{p} + 2 \right)^2 [P_{in} - P_{th}(r)] \quad (7)$$

$$s(r) = \frac{P_{out}(r)}{P_{in} - P_{th}} \quad (8)$$

$$= \left(\frac{r}{p} \right)^2 \quad (9)$$

其中 r 为激光与泵浦光模斑交叠参数, p 是激活介质内平均泵浦光斑半径, r 是振荡激光光斑半径, $\alpha = -1/2 \times \ln(R_1 R_2)$ 是总的单程对数损耗, R_1 、 R_2 分别为输入输出透镜对激光的反射率, I_{sat} 是饱和光强, η_p 是泵浦效率, T 是耦合输出镜透射率。

由式(6)、(9)知 P_{th} 是关于 r 的函数, 而 r 随入射泵浦功率 P_{in} 变化而变化, 因此求阈值功率时有 $P_{in} = P_{th}$ 。把式(5)代入式(3)即可得到 r 随 P_{in} 的变化关系, 将其代入式(9)和式(6), 令 $P_{in} = P_{th}$, 代入相关参数 $p = 200 \mu m$, $R_1 = 1$, $R_2 = 90\%$, $I_{sat} = 2.899 \times 10^7$ W/cm², $\eta_p = 53.06\%$, $T = 10\%$, 解关于 P_{th} 的方程, 得到阈值功率 $P_{th} = 0.43$ W。当入射泵浦功率 $P_{in} = 19.4$ W 时, 根据式(7)和式(8)求得输出功率 $P_{out} = 5.96$ W, 斜效率 $s = 31.35\%$ 。

根据以上参数设计实验装置如图 2 所示, 晶体前端面镀 808 nm 增透、1 064 nm 全反膜 M_1 作为输入镜, 后端面镀 1 064 nm 高透膜, 平面镜 M_2 对 1 064 nm 反射率为 90% 作为耦合输出镜。808 nm 的 LD 尾

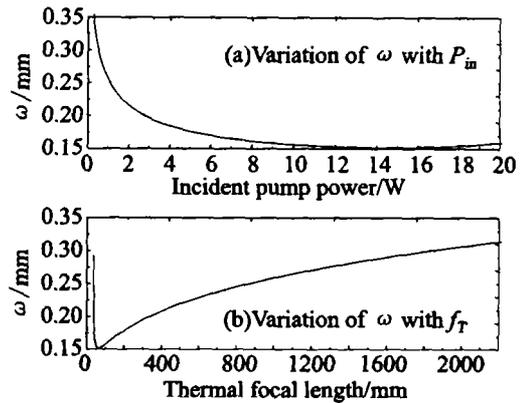


图4 激光光斑半径 随 P_{in} 及 f_T 的变化

Fig.4 Variation of the laser radius with P_{in} and f_T

纤注入晶体前端面, 泵浦光斑半径约为 $200 \mu m$, Nd:YAG 晶体 (3 mm \times 3 mm \times 8 mm) 侧面用铝箔裹住装入铜套, 并采用半导体热能转换器 TEC 制冷。

实验所得数据与理论计算结果列于表 1。对于阈值功率, 理论计算值为 0.43 W, 实测为 2.36 W, 两者相差较多, 部分是因为实验所用腔镜的反射率没有理论计算采用的标称值高, 以致损耗偏大, 阈值相应偏高。更主要的是, 实验是针对强泵浦区设计的, 在这范围系统达到热稳定运行, 而在近阈值处, 激光输出不那么稳定, 振荡光斑对入射功率的波动变化很敏感, 如图 4(a) 所示, 且阈值处热透镜效应小, 晶体中光束会聚不明显, 由式(6)和式(9)知 P_{th} 与 $(\frac{1}{p} + 2)^2$ 成正比, 因此光斑尺寸稍有增大, 阈值功率即按平方关系增加。当有 19.4 W 泵浦功率注入晶体时, 实验获得 5.32 W 输出功率, 斜效率达 31.16%, 对比理论值 5.96 W 和 31.35%, 斜效率几乎一致, 输出功率因损耗偏大以及散热不够完善略有饱和而有所偏低。

表 1 激光输出性能理论值与实验结果的比较

Tab.1 Summary results of 1 064 nm output laser

	阈值功率/W	输出功率/W	斜效率/%
理论值	0.43	5.96	31.35
实验值	2.36	5.32	31.16

图 5 所示为激光输入输出曲线理论与实验的对比。在小于 10 W 的低泵浦区, 腔体处于逐渐趋于最稳定的过程, 尚未达到系统热稳定的泵浦功率范围, 激光与泵浦光模式匹配不好, 导致实测输出功率较理论值低。当泵浦功率逐渐增至 10 ~ 16 W 范围, 由前面的稳定参量和光斑变化分析知道, 此时系统处于最佳稳定运转状态, 晶体内的激光光斑大小基本无起伏, 与泵浦光模斑交叠很好, 模式达到很好地匹配。从图 5 也可以

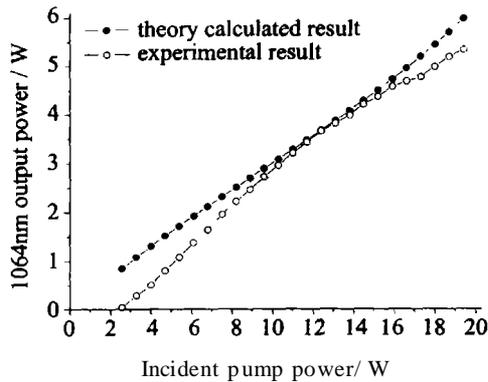


图5 输出功率随泵功率的变化

Fig. 5 Variation of output power vs. pump power

看出,此范围实验结果与理论值符合得很好.随着泵浦功率进一步提高,热效应变得严重,因热补偿不够,散热装置没有优化,输出功率略低于理论.

上述实验结果只是初步的,在泵浦光注入优化和散热装置更为完善后,激光输出性能会进一步提高.

4 结 论

结合 $ABCD$ 传输矩阵理论,采用一种比等价腔法更为简单明了的方法,分析了三镜折叠腔,获得腔内光腰半径和位置的解析解.考虑热透镜效应,对一典型的线性平-平激光谐振腔进行分析,结果表明:在实验设计所针对的泵浦范围,腔体稳定性很好,激光光斑半径基本不随泵浦功率变化而波动.结合文献[7]中固体激光器的优化设计模型进行初步实验和理论计算,比较发现激光输出结果与理论模型值能够较好地相符.

参考文献:

- [1] Li P X, Li D H, Zhang Z G, et al. Diode-pumped compact cw frequency-doubled Nd: YAG laser in the watt range at 473nm[J]. Chin. Phys. Lett., 2003, 20(7): 1 064 - 1 066.
- [2] Gao L L, Tan H M. Compact 600 mW blue laser with a composite Nd: YAG[J]. Opt. & Las. Tech., 2003, 35: 575 - 578.
- [3] 王鹏飞, 吕百达. 折叠腔腔参数对内腔倍频系统稳定性的影响[J]. 激光技术, 2003, 27(4): 328 - 330.
- [4] Bai J T, Chen G F. Continuous-wave diode-laser end-pumped Nd: YVO₄/KTP high-power solid-state green laser[J]. Opt. & Las. Tech., 2002, 34: 333 - 336.
- [5] 侯学元, 孙渝明, 李宇飞, 等. 双棒串接 Nd³⁺: YAG 激光器[J]. 光子学报, 2001, 30(6): 757 - 760.
- [6] 刘均海, 卢建仁, 吕军华, 等. 高功率半导体激光器端面抽运连续固体激光器谐振腔的设计[J]. 中国激光, 2000, 27(1): 7 - 10.
- [7] Laporta P, Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers[J]. IEEE J. Quant. Electron., 1991, 27(10): 2 319 - 2 326.
- [8] 雅里夫 A. 光电子学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 79 - 80.
- [9] 吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 133.
- [10] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56(19): 1 831 - 1 833.

Resonators of Laser Diode End-pumped Solid-state Lasers

CHEN Zhao-xuan¹, CAI Zhi-ping^{2*}, HUANG Chao-hong², WANG Yu-shu¹

(1. Dept. of Phys., Xiamen Univ., 2. Dept. of Electr. Eng., Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: According to $ABCD$ transmission matrix theory, analytical solutions concerning Gaussian beam were derived in a V-configuration folded cavity. The calculated results for the thermal lensing effects of laser crystal in a plano-plano cavity indicate that such a resonator operates rather stably in the pumping power range of interest, and that the laser radius varies insignificantly with pumping power in the stable region. Experiment on 808 nm LD end-pumped cw 1 064 nm Nd: YAG laser was performed. The experimental results are in agreement with the theoretical analyses.

Key words: transmission matrix; laser radius; stable cavity; solid-state laser