

文章编号: 1001-3806(2006)06-0585-04

Yb:YAG 板条激光器谐振腔设计与光束质量测量

薛海中¹, 陆富源², 薛梅³, 柳强², 过振^{1*}, 张海涛², 巩马理²

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 清华大学 精密仪器系 光子与电子研究中心 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 3. 南京大学, 南京 210093)

摘要: 为了提高二极管抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条激光器的输出光束质量, 研究了复合板条内的热透镜效应, 分析了复合板条在宽度和厚度方向的热透镜焦距, 以及热透镜对谐振腔模式的影响, 设计了混合谐振腔, 并对该谐振腔输出光束质量进行了分析。采用角抽运复合板条方法, 实现了千瓦级 Yb:YAG/YAG 复合板条激光器连续运转。采用 CCD 照相法测量了输出激光的光束质量, 在 500W 连续输出时, 光束质量 M^2 因子在板条宽度方向和厚度方向分别优于 20 和 5。实验结果表明, 在复合板条激光器中可以采用混合谐振腔获得较好光束质量的激光输出。

关键词: 激光器; 高功率激光; 复合板条激光器; Yb:YAG

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers

XUE Hai-zhong¹, LU Fu-yuan², XUE Mei³, LIU Qiang², GUO Zhen¹, ZHANG Hai-tao², GONG Ma-li²

(1. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract To improve the beam quality of a diode-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser, the thermal lens effect inside the slab was analyzed. The focal lengths of the thermal lens both in thickness and width directions inside the slab were calculated. Its influence on the resonator mode was also analyzed. A hybrid resonator was designed and the beam quality of its laser output was considered. A continuous wave kilowatts Yb:YAG/YAG composite slab laser pumped by laser diode was presented, in which the corner-pumped scheme was used. Its beam quality was measured with CCD camera. The M^2 factors at width and thickness direction were better than 20 and 5 respectively, at an output power of 500W. The results show that the hybrid resonator is suitable for slab laser to obtain a good beam quality output laser.

Key words lasers, high power laser, composite slab laser, Yb:YAG

引言

高功率二极管抽运固体激光器在工业、科学领域等都有广泛的应用。由于 Yb:YAG 激光器在连续工作时产生大量的热量, 同时受到冷却装置的致冷, 因而在增益介质内部产生温度梯度, 从而引起热光效应^[1], 包括热透镜效应和热致双折射效应等, 这些效应是影响激光输出功率和光束质量的重要因素^[2,3]。笔者讨论了腔内热透镜对谐振腔的影响, 分析并设计了均匀反射率输出镜混合腔。针对板条激光器的结构特点, 考虑板条内部热透镜效应, 讨论了高功率板条激光器的谐振腔设计。

1 复合板条激光器的热透镜效应

BROWN 等人^[4]分析了非键合板条内部一维温度分布, 可以较好地估算均匀抽运并且宽度与厚度的比值大于 10 的板条内的温度分布, 但是不适用于计算复合板条内温度分布, 因为复合板条的热传导过程与单一材料板条有很大差别。作者使用了结构如图 1 所示复合板条^[5]。为了估算复合板条内的热光效应, 必须先求出其温度分布。

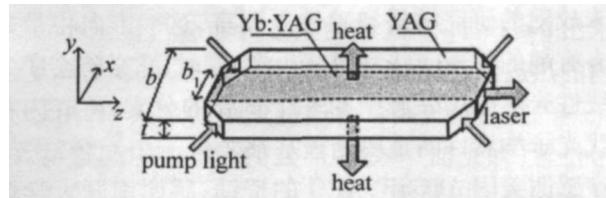


Fig. 1 Structure of the composite slab and its pump configuration

作者简介: 薛海中 (1960-), 男, 研究员, 博士研究生, 现从事光电系统工程及设备的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhgu@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-03-29 收到修改稿日期: 2006-06-06

考虑如图 1 所示的中心掺杂边缘非掺杂的 Yb:YAG/YAG 复合板条。板条中心 Yb:YAG 宽度为 b , 厚度为 t , 两边缘面分别键合非掺杂的 YAG, 所得到

的复合板条总宽度为 b , 厚度为 t , 长度为 l , 定义板条中心为坐标系原点, 宽度、厚度、长度方向分别定义为 x 轴、 y 轴、 z 轴。为了使图面清晰, 图中把坐标系标在了板条外。使用微通道热沉从上下表面散热。由于板条结构的对称性和抽运的对称性, 同时 z 轴方向的温度梯度不导致热聚焦效应^[6], 因而, 可以只考虑 $x-y$ 平面内的温度分布。

可以通过求解经典热传导方程来计算 Yb:YAG/YAG 复合板条内的温度分布。稳态下, 在各向同性介质中温度分布 $T(x, y)$ 满足:

$$\kappa^2 T_{xx} =$$

$$\begin{cases} -Q_0(x, y), & (-b_1/2 \leq x \leq b_1/2) \\ 0, & (-b/2 \leq x \leq b_1/2 \text{ 或者 } -b_1/2 \leq x \leq b/2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, κ 是 Yb:YAG/YAG 的热导率, $Q_0(x, y)$ 是板条内的热功率密度。在 $y = \pm t/2$ 处的边界条件由牛顿换热定律给出, 而忽略 $x = \pm b/2$ 边界上板条与空气之间的热传递, 从而得到:

$$\begin{cases} \pm \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\pm t/2} = h \left[T_h - T(y = \pm \frac{t}{2}) \right] \\ \pm \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm b/2} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_h 是热沉表面温度, h 是表面换热系数。因为 YAG 与低掺杂的 Yb:YAG 的热导率差别可以忽略, 如果在键合面 $x = \pm b_1/2$ 处的热接触良好, 则温度分布在界面处是连续函数, 并且一阶偏微分 $\partial T / \partial x$ 在 $x = \pm b_1/2$ 也是连续函数。由于板条结构的对称性和抽运的对称性, 热功率密度 $Q_0(x, y)$ 是关于 x 的偶函数, 因而可以只考虑 $x \geq 0$ 的温度分布。在角抽运板条中, 可以近似认为抽运吸收分布不随厚度变化, 因而 $Q_0(x, y)$ 可以表示为:

$$Q_0(x, y) = A \exp[-\alpha(x + b_1/2)] + B \times \exp[-\alpha(-x + b_1/2)] \quad (3)$$

式中, A 和 B 分别表示板条两个边缘处的热功率密度, 对于角抽运有 $A = B$, α 是板条掺杂部分的吸收系数。求解上述热传导方程在边值条件下的解可以求出板条内的温度分布。在 $b_1/2 \leq x \leq b/2$ 区域内无谐振模, 只求出 $0 \leq x \leq b_1/2$ 区域的温度分布就可以求出该区域内的热透镜, 根据板条内的温度分布, 可以估算复合板条内的热透镜焦距。由透镜焦距的定义知, 相对于参考位置(即光轴)一定距离处的光程差引起透镜效应, 其光程差可以写为^[7]:

$$\phi(x, y) = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\text{slab}} \int_{-l/2}^{l/2} [T_2(0, 0) - T_2(x, y)] dz \quad (4)$$

式中, $T_2(0, 0)$ 分别是板条中心的温度, l 是板条的长度。板条的热色散系数^[8] $(dn/dT)_{\text{slab}} = dn/dT + E\alpha B_\perp$, 其中 YAG 的固有热色散 $dn/dT = 9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

杨氏模量 $E = 2.77 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 热膨胀系数 $\alpha = 7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, B_\perp 是偏振光与应力方向垂直时的压光系数, $B_\perp = 3.4 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ ^[9]。从而 $(dn/dT)_{\text{slab}} = 9.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

板条在 x 方向和 y 方向的温度分布有很大差别, 因而其热透镜也相应地存在不同。热透镜的焦距 f_{th} 在 x 方向和 y 方向分别为:

$$\begin{cases} f_{\text{th}}(x) = \frac{x^2}{2\Phi(x, 0)} \\ f_{\text{th}}(y) = \frac{y^2}{2\Phi(0, y)} \end{cases} \quad (5)$$

根据(1)式~(3)式求出复合板条内温度分布, 代入(4)式和(5)式, 可以求出复合板条内的热透镜焦距, 由于求解过程比较繁琐, 在此略去, 仅给出结果。在 x 方向和 y 方向的相对热透镜焦距与功率密度乘积 $f_{\text{th}} \times (A + B)$ 如图 2 所示, 其中, A 和 B 是(3)式的热功率密

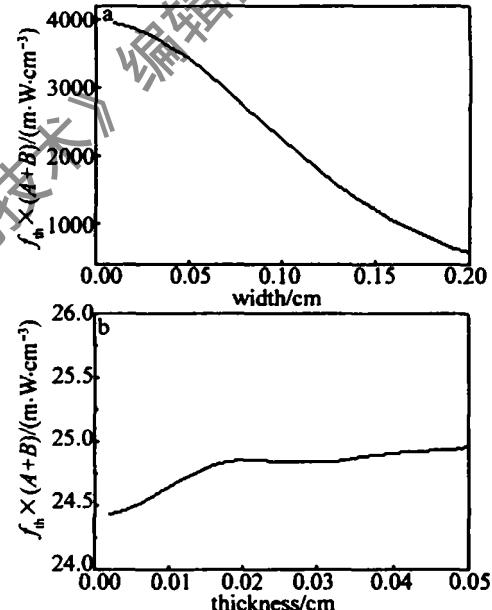


Fig. 2 Normalized focus length of the thermal lens in the width and thickness direction

度。图中采用的板条参数为^[5]: 长度 $l = 42 \text{ mm}$, Yb:YAG 的宽度 $b_1 = 4 \text{ mm}$, 板条总宽度 $b = 8 \text{ mm}$, 厚度 $t = 1 \text{ mm}$, Yb:YAG 的原子数分数为 0.005 , 热导率 $\kappa = 0.10 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, 吸收系数 $\alpha = 0.6 \text{ cm}^{-1}$ ^[1], 表面传热系数 $h = 10 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 。在 $A = B = 500 \text{ W}/\text{cm}^3$ 时, x 方向和 y 方向的热透镜焦距分别为 50 cm (x 方向的最小值) 和 2.48 cm 。当抽运功率从 0 增大到 3300 W 时, 热透镜焦距在宽度方向从无穷大减小到 36 cm , 厚度方向从无穷大减小到 2 cm 。

2 腔内含有热透镜的谐振腔

考虑如图 3 所示的腔内含有热透镜的谐振腔模型。空腔时, 腔内无热透镜, 腔长等于 $d_1 + d_2$, 谐振腔

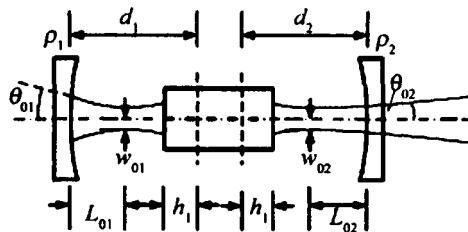


Fig. 3 Model of the cavity with thermal lens

的 g 参数为 $g_i = 1 - (d_1 - d_2)/\rho_i$, 其中 $i = 1$ 或 2 , ρ_1, ρ_2 为两个腔镜曲率半径, d_1, d_2 为两个腔镜与热透镜主平面之间的距离。当腔内热透镜屈光度为 D 时谐振腔等效 g 参数, 记为 g_i^* , 则 $g_i^* = 1 - L^*/\rho_i^*$, 其中 L^* 为等效腔长, ρ_1^*, ρ_2^* 为两个腔镜的等效曲率半径, $L^* = (d_1 + d_2) - Dd_1d_2$, $\rho_i^* = QL^*/(Dd_i\rho_i + L^*)$, 热透镜的正面离介质端面的距离 $h = l/2n$, 其中 l 为激光板条长度, n 为激光板条的折射率。

采用 g_i^* 参数可以将内含热透镜的谐振腔等效为两镜空腔, 由谐振腔的矩阵运算可以得出含热透镜稳定腔在基横模运转条件下的腔内光束束腰大小 w_{0i} 及远场发散角 θ_{0i} 为^[10]:

$$w_{0i}^2 = \frac{\lambda L^*}{\pi} \frac{[g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)]^{1/2}}{|g_1^* + g_2^* - 2g_1^* g_2^*|} \quad (6)$$

$$\theta_{0i}^2 = \frac{\lambda_1}{\pi L^*} \frac{|g_1^* + g_2^* - 2g_1^* g_2^*|}{[g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)]^{1/2}} \quad (7)$$

式中, λ_1 为输出激光波长。

高平均功率固体激光器一般运转在多横模振荡状态以获得大模体积和高平均功率输出, 此时往往以增益介质的截面做为限模孔径, 而板条截面远大于基模光束截面, 此时光束发散角与限模孔径(板条截面)成正比。多横模振荡束腰半径 $w_{m,i}$ 发散角 $\theta_{n,i}$ 与基模振荡光束的束腰 w_{0i} 发散角 θ_{0i} 之间须满足:

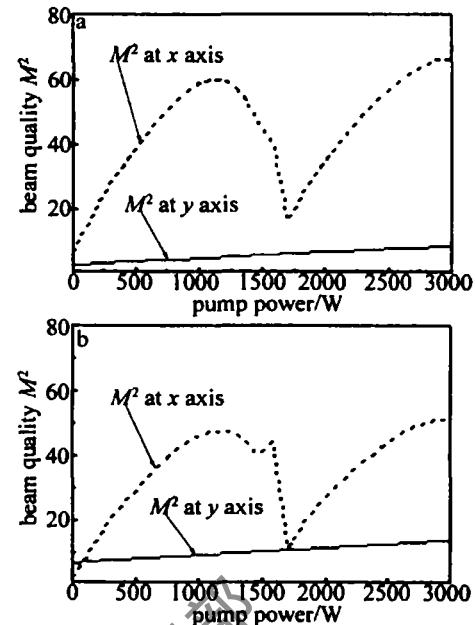
$$w_{m,i} = (m + \frac{1}{2})^{1/2} w_{0i} \quad (8)$$

$$\theta_{n,i} = (m + \frac{1}{2})^{1/2} \theta_{0i} \quad (9)$$

式中, m 为矩形孔径下的横模阶次。而 m 可由位于限模孔径处的基模光斑半径 w_{0i} 与限模孔径 r_0 的半径之比得到, $m = (r_0/w_{0i})^2 - 1/2$ 从而得到多模远场发散角满足^[10]:

$$\left| \frac{\theta_{n,i} L^*}{r_0} \right|^2 = (g_1^* + g_2^* - 2g_1^* g_2^*)^2 / [g_1^* g_2^* (1 - g_1^* g_2^*) + [(d_1 L^*) \times |g_1^* + g_2^* - 2g_1^* g_2^*| - g_1^* (1 - g_1^*)]]^2 \quad (10)$$

由(8)式~(10)式可以计算腔内高阶模的束腰和远场发散角, 从而可以预测输出激光的光束质量。根据前节求出的热透镜焦距, 代入上述公式, 可以计算出在不同抽运功率下输出镜端的束腰半径和多模远场发散

Fig. 4 M^2 factor as a function of the pump power
a—generatrix parallel to width b—generatrix vertical to width

角, 从而可以求出光束参量积, 再转换为 M^2 因子。在谐振腔两镜之间距离为8.6cm、板条位于谐振腔中心时, 分别计算了球面镜曲率半径 $\rho_1 = 1m$ 、柱面镜曲率半径 $\rho_2 = -1.5m$, 母线分别平行或者垂直于板条宽度时的 M^2 因子与抽运功率的关系, 如图4所示。

由图4可以看出, 在图4a中厚度方向的光束质量较好, 但宽度方向的光束质量较差; 图4b中厚度方向的光束质量较差, 但宽度方向的光束质量较好。

3 实验装置及结果

采用经过扩束的He-Ne光作为探测光束, 用感光片粗略观察He-Ne光通过Yb:YAG/YAG复合板条后的焦点位置, 测得在1000W抽运功率和无激光输出条件下, 板条在厚度和宽度两个方向的热透镜焦距分别为10cm和80cm。而由(5)式计算得到厚度和宽度两个方向的热透镜焦距分别为6.3cm和1.2m。

采用了高反球面镜和透过率为40%的柱面镜构成谐振腔, 后者的母线平行于板条宽度方向。球面镜的曲率半径 $\rho_1 = 1m$, 柱面镜的曲率半径 $\rho_2 = -1.5m$, 板条位于谐振腔中心, 谐振腔两镜之间距离约为8.6cm。采用如图5所示的CCD照相法测量光束质量。用M146功率计(最大2000W)监测激光功率, 在距离激光腔输出镜约1.5m处放置一个焦距 $f = 300mm$ 的凸透镜, 用CCD相机(CVD-10 9315)及配套的M200光束分析软件监测该光束的光强分布, 把CCD相机分别放置在凸透镜后面的焦平面处和束腰处, 软件可以根据刀口法计算出光斑在x方向和y方向的大小。在焦平面处的x方向和y方向的光斑大小

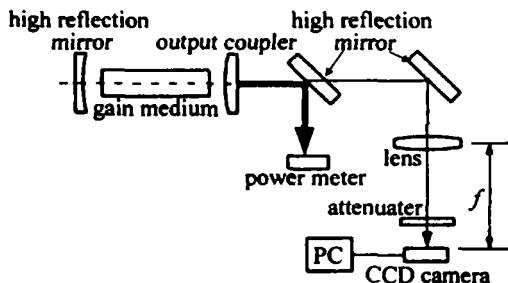


Fig. 5 Beam quality measurement with CCD method

分别记为 w_x, w_y , 则光束发散角为:

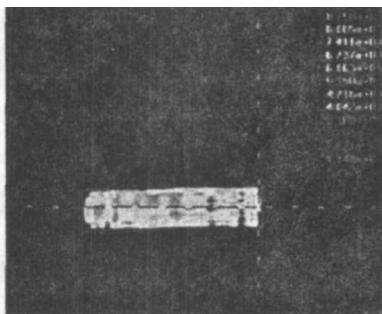
$$\begin{cases} \theta_x = w_x / f \\ \theta_y = w_y / f \end{cases} \quad (11)$$

把 CCD 相机移到凸透镜后面的束腰处, 距离凸透镜为 D (实验中测得 $D \approx 480\text{mm}$), 用同样方法测量出束腰大小 w_{0x} 和 w_{0y} , 则腔内束腰为:

$$\begin{cases} w_{0x} = w_{0x} f / (D - f) \\ w_{0y} = w_{0y} f / (D - f) \end{cases} \quad (12)$$

在 500W 输出功率下, 对应的抽运功率为 1600W, 测量并计算得到光束发散角 $\theta_x = 1\text{m rad}$, $\theta_y = 10\text{m rad}$, $w_{0x} = 2.36\text{mm}$, $w_{0y} = 0.65\text{mm}$, 从而光束参量积为 $26\text{mm} \cdot \text{m rad} \times 6.5\text{mm} \cdot \text{m rad}$ 换算成 M^2 因子为 20×5

把实验结果与图 4 比较可见, 理论计算结果与实验结果基本一致, 从而可以认为, 前面对复合板条的热透镜分析以及谐振腔的分析都是合理的。凸透镜后面的束腰处的光斑分布如图 6 所示。

Fig. 6 Spot of the beam waist after the $f = 30\text{cm}$ lens

(上接第 584 页)

- [20] CHEN Z M, MCHELL M, SEGEV M *et al*. Self-trapping of dark incoherent light beams [J]. Science, 1998, 280(5365): 889~892.
- [21] CHEN Z G, MARTIN H, EUGENIEVA E D *et al*. Anisotropic enhancement of discrete diffraction and formation of two-dimensional discrete-soliton trains [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(14): 143902-1~143902-4.
- [22] CHEN Z M, MARTIN H, EUGENIEVA E D *et al*. Formation of discrete solitons in light-induced photonic lattices [J]. Optics Express, 2005, 13(6): 1816~1826.

4 结 论

从理论上计算了二极管抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条的热透镜效应, 考虑热透镜焦距并设计了适用于高功率板条激光器的混合谐振腔, 并分析了其激光输出的光束质量。采用角抽运方法, 实现了千瓦级 Yb:YAG 板条激光器运转, 在 500W 连续输出时, 光束质量 M^2 因子在宽度方向和厚度方向分别优于 20 和 5。理论预测的光束质量因子与实验结果相符, 结果有力证明了本文中理论分析的正确性。

参 考 文 献

- [1] CHEN A I S, BALEM BO I S, DRUON F *et al*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-part I: theoretical analysis and wavefront measurements [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(9): 1217~1234.
- [2] ZHU G Zh, CHEN P F, ZOU X F *et al*. Finite element analysis of laser medium's thermal lens [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 208~212 (in Chinese).
- [3] ZHANG Q L, JIANG H H, YIN Sh T. Properties of LD edge-pumped Yb:YAG laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 82~86 (in Chinese).
- [4] BROWN D N. On linear thermal and stress effects and scaling behavior of YAG slab amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(12): 2393~2402.
- [5] LIU Q, GONG M L, LU F Y *et al*. 520W continuous-wave diode-coupled-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. Opt Lett, 2005, 30(7): 726~728.
- [6] WALLACE J. Commercial disk laser reaches 4 kW output [J]. Laser Focus World, 2004, 40(9): 19~20.
- [7] CHEN Y, CHEN B, PATEL M K *et al*. Calculation of thermal gradient-induced stress birefringence in slab lasers [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(7): 909~916.
- [8] HELLO P, DURAND E, FRITSCHEL P. Thermal effects in Nd:YAG slabs 3-D modelling and comparison with experiments [J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(7): 1371~1390.
- [9] WYNNE R, DANEU J, FAN T Y. Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG [J]. Appl Opt, 1999, 38(15): 3282~3284.
- [10] ZHAO Ch M, WEIG H. An investigation on the improvement of the beam quality of high average power solid-state lasers [J]. Optoelectronic Engineering, 1997, 24(5): 50~58 (in Chinese).

- [23] CHEN Zh G, XU J J, LOU C B. Novel discrete solitons in light-induced photonic lattice [J]. Physics, 2005, 34(1): 12~17 (in Chinese).
- [24] LOU C B, XU J J, QIAO H J *et al*. Enhanced second-harmonic generation by means of high-power confinement in a photovoltaic soliton-induced waveguide [J]. Opt Lett, 2004, 29(9): 953~955.
- [25] CHRISTODOULIDES D N, LEDERER F L, SIBERBERG Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices [J]. Nature, 2003, 424(6950): 817~823.
- [26] HOU Ch F, YUAN B H, XU K B. Research progress of photorefractive spatial optical soliton [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 167~171 (in Chinese).