

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0001-05

千瓦级激光二极管抽运 Yb:YAG 板条激光器

柳 强, 陆富源, 巩马理, 李 晨, 陈 刚

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 分析了高功率抽运条件下板条 Yb:YAG 激光器的温度和热应力分布, 计算了板条激光器宽度方向和厚度方向的热焦距, 并进行了一维变反射率镜混合谐振腔设计。采用角抽运方法, 实现了千瓦级 Yb:YAG 板条激光器运转, 斜率效率 43%, 光-光转换效率约 35%, 最后进行了激光二极管抽运千瓦级板条激光器的设计。

关键词 激光技术; 高功率激光器; 固体激光; Yb:YAG 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

kW-Class Laser Diode Pumped Yb:YAG Slab Lasers

LIU Qiang, LU Fu-yuan, GONG Ma-li, LI Chen, CHEN Gang

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract This work analyses the temperature and thermal stress distributions inside Yb:YAG slab crystals with high pump power. The focal lengths of thermal lenses in both thickness and width directions inside the laser crystal are calculated. The hybrid resonator using one-dimensional VRM is designed and the thermal-lensing effects in the slab are considered. The kilo-watts composite Yb:YAG/YAG slab laser pumped by laser diode is presented, in which the corner-pumped scheme is used, with slope efficiency of 43% and optical-to-optical efficiency of 35%. A slab laser scheme with ten kilo-watt output is designed out.

Key words laser technique; high power laser; solid-state laser; Yb:YAG crystal

1 引 言

高功率固体激光器无论是在工程还是在科学研究领域都有广泛的应用^[1]。Yb:YAG 作为一种新型的激光材料在近十多年来得到重视, 相对于传统的 Nd:YAG, Yb:YAG 在高功率运转方面有着更大的发展潜力^[2]。但是由于 Yb:YAG 是准三能级结构, 为了发挥其潜在的优点, 抽运方案的设计就显得尤为重要了。传统的端面抽运、表面抽运和边缘抽运很难满足低浓度掺杂准三能级激光晶体高效高密度均匀抽运的要求。本文采用角抽运方式, Yb:YAG 晶体的掺杂原子数分数(下同)为 0.5%, 尺寸为 1 mm(厚)×4 mm(宽)×42 mm(长), 实现了高效率连续激光运转, 最大连续输出功率 1050 W, 斜率效率 43%, 光-光转换效率约 35%。

2 千瓦级板条 Yb:YAG 激光器热分析

2.1 温度和热应力分析

三维瞬态热传导方程:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + F_v = \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho c T), \quad (1)$$

稳态条件下热传导方程

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = -F_v, \quad (2)$$

边界条件

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h \cdot (T_c - T_s), \quad (3)$$

热应力数学模型

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_{ij} + \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \delta_{ij} + \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \alpha T \delta_{ij} \right], \quad (4)$$

上述公式中 k 为介质热传导率, F_v 为单位体积的产热功率, ρ 为介质密度, c 为比热, h 为对流换热系数, T_c 为环境温度, T_s 为介质表面温度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, α 为热胀系数。对流换热系数 $h = 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 加载到上下表面, 0.5% 掺杂的 Yb:YAG 晶体的热传导率 $k = 7.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 热胀系数 $\alpha = 7.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 杨氏模量 $E = 3 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊

作者简介: 柳 强(1971—), 男, 副研究员, 主要从事二极管抽运固体激光及非线性频率变换技术的研究。

E-mail: qiangliu@mail.tsinghua.edu.cn

松比 $\nu = 0.25$ 。抽运功率 3500 W, Yb:YAG 掺杂原子数分数为 0.5%。Yb:YAG 晶体两侧键合了非掺杂的 YAG。掺杂区域 (Yb:YAG) 的尺寸为 42 mm (长) \times 4 mm (宽) \times 1 mm (厚), 两条非掺杂区域 (YAG) 的尺寸为 42 mm (长) \times 2 mm (宽) \times 1 mm (厚), 板条在四个角部沿 45° 方向倒角, 倒角宽度为 2 mm, 4 个角面的尺寸约为 2.8 mm \times 1 mm。

对于激光介质的发热按均匀发热内热源模型进行处理; 材料热应力按无约束状态时进行处理。采用 ANSYS 软件求解方程就可以得到晶体内部温度及热应力分布。温度分布范围为 18.3 ~ 138.8 °C (见图 1), 热应力分布范围为 $4.86 \times 10^7 \sim 1.79 \times 10^8$ Pa (见图 2) 远小于 YAG 晶体的破碎应力, 对晶体不构成威胁。

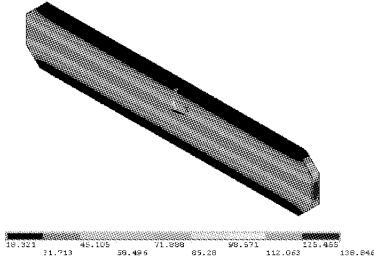


图 1 板条内的温度分布

Fig. 1 Temperature distribution in the slab

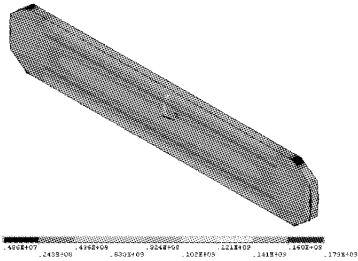


图 2 板条内的热应力分布

Fig. 2 Thermal stress distribution in the slab

2.2 热透镜效应

由于板条形激光器在空间上两个方向的不对称性产生热梯度的空间不对称性, 进而导致在宽度与厚度方向的热透镜不相同。

由透镜焦距的定义知, 距离参考位置 (即光心) r 处的焦距 $f(r)$ 对应于一个相移 $\Delta\phi(r)$, 它们的关系为^[3]

$$\Delta\phi(r) = kr^2/2f(r), \quad (5)$$

式中 k' 为波数。

考虑到热透镜产生的原因, 总相移 $\Delta\phi(r)$ 是单程激光通过激光棒时折射率变化产生的累积效果,

即

$$\Delta\phi(r) = k' \int_0^l \Delta n(r, z) dz, \quad (6)$$

式中 $\Delta n(r, z)$ 为热致折射率变化, l 为激光晶体长度, z 方向为光在晶体中直线行进的方向。热致折射率变化 $\Delta n(r, z)$ 一般由 3 个因素引起: dn/dT 引起的折射率随温度的变化; 热应力以及晶体热致畸变。但一般情况下, 热应力和热致畸变效应不很明显, 由 dn/dT 引起的折射率随温度的变化是引起热效应的主要原因, 可近似认为

$$\Delta n(r, z) = \Delta T(r, z) \cdot (dn/dT), \quad (7)$$

综合(5)~(7)式, 可得

$$f(r) = r^2 / \left[2 \frac{dn}{dT} \int_0^l \Delta T(r, z) dz \right] = r^2 / \left\{ 2 \frac{dn}{dT} \int_0^l [T(r, z) - T(r_0, z)] dz \right\}, \quad (8)$$

式中 r_0 为计算相位差时的基准位置。

如前所述, 板条状激光介质在宽度方向 (x 方向) 与厚度方向 (y 方向) 上的热透镜焦距是不同的, 只要将(8)式中的距离 r 分别换成 x 与 y 即可得这两个方向各自的热透镜焦距, 并取基准位置为坐标原点 (即取 $x_0 = 0, y_0 = 0$), 则有

$$f_x(x) = \frac{x^2}{2 \frac{dn}{dT} \left[\int_0^l T(x, z) dz - \int_0^l T(0, z) dz \right]}, \quad (9)$$

$$f_y(y) = \frac{y^2}{2 \frac{dn}{dT} \left[\int_0^l T(y, z) dz - \int_0^l T(0, z) dz \right]}, \quad (10)$$

用 ANSYS 得到的温度场代入(9), (10)式, 计算出宽度方向的热透镜焦距分布在 130 mm 左右, 厚度方向热透镜效应比宽度方向强, 大约为 20 mm 左右。

3 一维变反射率镜输出镜的混合腔设计

实验中的板条厚度仅为 1 mm, 在该方向采用稳定腔就可以获得较好的光束质量^[4], 而板条宽度有 4 mm。由于热透镜效应的限制只能采用较短的腔长, 若在宽度方向也采用稳定腔, 则基模体积太小, 难以提高提取效率。非稳腔具有大的可控基模体积, 容易鉴别和控制横模等优点, 在板条宽度方向可以采用非稳腔来提高该方向的基模体积, 因而可以采用稳定-非稳定混合腔获得较好的转换效率。这种谐振腔可以使用球面镜-柱面镜作为腔镜来实

现^[5]。但是一般的虚共焦非稳腔的输出光束在近场是空心光束,远场光斑也存在较强的旁瓣,光束质量不理想。变反射率镜(VRM)可以很好地克服上述缺点,利用它可以控制输出光场的衍射效应,同时提高近场和远场光束质量。针对板条结构,可以采用一维变反射率镜作为输出镜来提高输出光束质量。该谐振腔在板条厚度方向是稳定腔,而在板条宽度方向是非稳腔,并且输出镜的反射率在宽度方向是超高斯分布,中心反射率高,两边反射率低,而反射率在厚度方向是均匀的。

一维超高斯镜的反射率 R 随镜上横向坐标 x (即板条宽度方向)分布一般表示为^[6] (x 轴零点位于镜子中心)

$$R(x) = R_0 \exp\left[-2\left(\frac{|x|}{w_m}\right)^n\right], \quad (11)$$

式中 R_0 为镜面中心的光强反射率, w_m 为反射率降到 $1/e^2$ 的膜半宽度。 $n=2$ 时称为高斯镜, $n>2$ 时称为超高斯镜。 n 可以是非整数。

变反射率镜空腔的几何放大率为^[7]

$$M_g = G + \frac{|G|}{G} \sqrt{G^2 - 1}, \quad (12)$$

式中 $G = 2g_1g_2 - 1$, $g_i = 1 - L/R_i$ ($i=1,2$), L 为总腔长, R_i 为腔镜的曲率半径。而含热透镜谐振腔等价 g 参量 g^* 为

$$g_i^* = g_i - Dd_i(1 - d_i/R_i), \quad (13)$$

式中 D 为腔内热透镜的屈光度, d_i 为镜子表面到晶体端面之间的距离。基模光斑在超高斯镜上的半径为 ($1/e^2$ 强度)

$$w_i = (|M_g|^n - 1)^{1/n} w_m, \quad (14)$$

基模反馈系数为 $|\gamma_0|^2 = R_0^2/M_g$, 模式鉴别能力为 $|\gamma_{0,0}|^2/|\gamma_{1,0}|^2 = M_g^2$, 等效腔长为 $L_{eq} = 2M_gg_2L$ 。

采用变反射率镜输出镜的调 Q 激光器腔内的基模光束经过超高斯镜反射后,入射在增益介质上的基模光斑的横向尺寸为增益介质尺寸的 0.6 倍左右时,可以获得 80% 左右的提取效率^[7],而在连续激光器中,可以适当增大该比值以提高提取效率。据此,计算了一维变反射率镜混合腔在非稳方向的腔参量,选定谐振腔的球面全反镜 $R_1 = \infty$ (平面镜),平凸柱面镜凸面的曲率半径为 $R_2 = -0.5$ m,总腔长 $L = 8.6$ cm,输出耦合率 40%,超高斯阶数 $n = 6$,输出镜中心(光强)反射率 $R_0 = 78\%$,膜斑直径 $w_m = 1.91$ mm,在抽运功率为 3500 W 时非稳等效放大率 $M^* = 1.3$ 。此时,在板条厚度方向上谐振腔保持在稳定区内。一维超高斯输出镜的反射率分布

如图 3 所示。

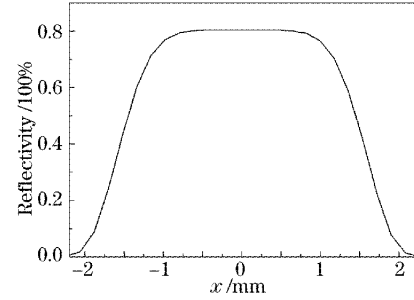


图 3 一维超高斯镜反射率分布的设计结果

Fig. 3 Design reflectivity of the 1-D super-Gaussian mirror

4 万瓦级输出实验结果及万瓦级板条激光器设计

千瓦级 Yb:YAG 板条激光器结构和文献[8]的实验装置是基本相同的,抽运功率增加到 3000 W,采用了平凹球面全反镜和均匀反射率的平凸柱面镜构成混合谐振腔,实验上获得了 1050 W 连续激光输出,斜率效率达到 43%,光-光转换效率最高达到 35%。

首先考虑对于一定尺寸的板条,在不产生放大自发辐射(ASE)和寄生振荡条件下所能承受的最大抽运功率。设板条长宽厚分别为 l, w, t , 满足 $l > w > t$, 单位 cm。

总抽运泵功率为 P_{pt} , 吸收效率为 η , 则平均抽运功率密度 P_p 为^[9]

$$P_p = \eta P_{pt} / lwt, \quad (15)$$

在连续抽运而无激光输出条件下,反转粒子数密度为

$$\Delta n = f_{lb}n_U - f_{la}n_L = f_{lb} \frac{P_p \tau_f}{h\nu_p} - f_{la} \left(n_d - \frac{P_p \tau_f}{h\nu_p} \right) = (f_{lb} + f_{la}) \frac{P_p \tau_f}{h\nu_p} - f_{la} n_d, \quad (16)$$

式中 n_U 和 n_L 分别为上下能级多重态粒子总数, f_{la} 和 f_{lb} 分别表示激光下能级和激光上能级的玻尔兹曼分布因子, $h\nu_p$ 为抽运光子的能量, τ_f 表示上能级寿命, n_d 为掺杂浓度。小信号增益系数为

$$g_0 = \sigma_e \Delta n, \quad (17)$$

σ_e 表示激光跃迁的光谱截面。为了有效抑制放大自发辐射与寄生振荡,在连续工作条件下则需要小信号增益和有效增益长度的乘积小于 3, 即

$$g_0 l < 3, \quad (18)$$

把(15)式~(17)式代入(18)式,得

$$g_0 l = \left[(f_{1b} + f_{1a}) \frac{\eta P_{pt} \tau_f}{h\nu_p \times wt} - f_{1a} n_d l \right] \sigma_e < 3, \quad (19)$$

把 Yb:YAG 材料参量分别代入,得

$$P_{pt} < (1.875 \times 10^{20} + 0.047 n_d l) \times 2.715 \times 10^{-16} \times \frac{wt}{\eta}, \quad (20)$$

这是为了抑制放大自发辐射和寄生振荡的最低要求。

为了保证激光器正常工作,需要限制晶体的最高工作温度。假设板条内部热功率分布均匀,表面散热也均匀,忽略温度变化对热导率 k 的影响,板条中心相对于表面的温升为

$$\Delta T = \int_0^{l/2} \frac{Qx}{k} dx, \quad (21)$$

其中热功率密度 Q 为

$$Q = P_p \chi = \chi \eta P_{pt} / (lwt), \quad (22)$$

其中 χ 为热负载比,把(22)式代入(21)式,得

$$\Delta T = \int_0^{l/2} \frac{\chi \eta P_{pt} x}{lwt k} dx, \quad (23)$$

板条的冷却面所承受的由热膨胀引起的张力决定了板条所能承受的热应力极限。假设板条内受热均匀,两个最大的表面受到均匀冷却,则板条冷却面所受到的张力应力大小为(不考虑端面和边缘的影响)

$$\sigma_s = \frac{2}{3} \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T, \quad (24)$$

另一方面,低掺杂 Yb:YAG 材料的抗热冲击强度 R 可以表示为

$$R = \frac{k(1-\nu)\sigma_{smax}}{\alpha E} = 6.8 \text{ W/cm}, \quad (25)$$

式中 σ_{smax} 为最大表面应力,典型值为 $1.3 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 。由(25)式和(24)可以得到,板条的极限温升为

$$\Delta T_{max} = \frac{3}{2} \frac{R}{k} = 140 \text{ K}, \quad (26)$$

为了避免板条因受热应力过大而碎裂,可以使板条表面的设计热应力小于极限热应力的 $1/5 \sim 1/2$ 倍(设为 $b = \sigma_s / \sigma_{smax} < 0.2 \sim 0.5$),从而

$$\Delta T_d < b \Delta T_{max}, \quad (27)$$

由(23)式得到板条内的温升为

$$\Delta T_d = \frac{1}{8} \frac{\chi \eta P_{pt} t}{k l w}, \quad (28)$$

把(28)式和(26)式代入(27)式,得

$$P_{pt} < 12 \frac{1}{\chi \eta} \frac{lw}{t} b R, \quad (29)$$

把 Yb:YAG 材料参量分别代入,得

$$P_{pt} < 742 \frac{1}{\eta} \frac{lw}{t} b. \quad (30)$$

受 Yb:YAG 单晶大小的限制,板条的尺寸也受到相应的限制。一般 YAG 棒的直径小于 5 cm。我们要求板条所能承受的抽运总功率达到 15 kW 以上,根据(29)式和(30)式,取 $l = 11.2 \text{ cm}$, $b = 0.25$, $\eta = 0.91$, $\chi = 0.11$,作出板条宽度与厚度关系曲线如图 4 所示。

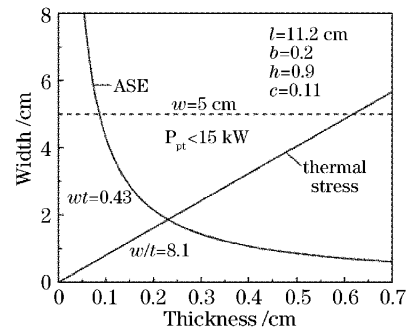


图 4 放大自发辐射与寄生振荡,热应力和 Yb:YAG 单晶的大小共同限定板条宽度与厚度关系曲线

Fig. 4 Curve of thickness versus width limited by the ASE or parasitic oscillation, thermal stress and available size of single Yb:YAG crystal

图4中三条曲线所围成的封闭区域内的板条尺寸参量是可以满足要求的。根据前面的分析方法,可以以两种板条尺寸为例,计算得到 14.4 kW 抽运的板条激光器的工作参量,如表 1 所示。把两个 Yb:YAG 板条串接起来放在谐振腔内,或者用一个作为主振级,一个作为放大级,就可以实现万瓦以上连续激光输出。

表 1 10 kW Yb:YAG 抽运激光器的设计工作参量

Table 1 Design working parameters of the 10 kW Yb:YAG slab laser

Crystal	Yb:YAG	
Dimension /mm ³	112×38×2.2	112×42×1.4
Dopant concentration /at-%	0.7	0.57
Pump power /kW	14.4	14.4
Absorption efficiency /100%	0.84	0.84
Average temperature rise /K	12	6.8
Thermal lens /cm	5	4.2
Coolant /(W/cm ²)	16	14

5 结 论

介绍了角抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条激光

器的研究结果,计算了板条激光器的温度和热应力分布,分析了板条激光器宽度方向和厚度方向的热焦距,并进行了采用一维变反射率镜输出镜混合腔的板条激光器设计,实验获得了 1050 W 连续激光输出,斜率效率 43%。在此基础上,设计了万瓦级 Yb:YAG 高功率板条激光器,初步计算并分析了其工作参量。分析结果表明,采用两个 Yb:YAG 板条串接起来放在谐振腔内,或者用一个作为主振级,一个作为放大级,就可以实现万瓦以上 Yb:YAG 连续激光输出。

参 考 文 献

- 1 Reinhart Poprawe, Peter Loosen, Hans-Dieter Hoffmann. Development trends of new high-power laser sources [C]. *SPIE*, 2005, **5707**: 81~90
- 2 David S. Sumida, Alexander Betin, Hans Bruesselbach *et al.*. Diode-pumped Yb:YAG catches up with Nd:YAG [J]. *Laser Focus World*, 1999, **35**(6): 63~70
- 3 B. Neuenschwander, P. Albers, H. P. Weber. Efficient multiple-longitudinally diode laser pumped Nd:YAG slab laser [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1992, **24**(3): 363~370
- 4 Norman Hodgson, Hanna J. Hoffman, Valerii Ter-Mikirtychev *et al.*. Diode-pumped, 220 W ultra-thin slab Nd:YAG laser with near-diffraction limited beam quality [C]. *Technical Digest of the Conference Lasers and Electro-Optics*, 2002. 264
- 5 Keming Du, Nianle Wu, Jiandong Xu *et al.*. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5): 370~372
- 6 M. Morin. Graded reflectivity mirror unstable laser resonators [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1997, **29**(8): 819~866
- 7 Michel Morin, Michel Poirier. Graded reflectivity mirror unstable laser resonator design [C]. *SPIE*, 1998, **3267**: 52~65
- 8 Qiang Liu, Mali Gong, Fuyuan Lu *et al.*. 520-W continuous-wave diode corner-pumped composite Yb:YAG slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 726~728
- 9 Riccardo Tommasini, Juerg E. Balmer. Amplified spontaneous emission and maximum gain-length product revised for general line shapes [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(4): 538~545