

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1268-04

Yb:YAG 薄片激光介质的温度效应*

李小莉 施翔春 石 鹏 郭明秀 张贵芬 陆雨田 胡企铨

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 研究了 Yb:YAG 薄片激光器中影响激光介质温度的几个因素。理论和实验均表明减薄 Yb:YAG 片并增加抽运光被 YAG 片吸收的次数, 是降低激光介质温度、提高激光器输出功率和效率的有效途径。用 0.35 mm 厚的 Yb:YAG 薄片获得 15.9 W 的 1.03 μm 激光输出, 斜率效率超过 40%。

关键词: Yb:YAG 晶体; 薄片激光器; 温度效应

中图分类号: TN248.1+3 文献标识码: A

1 引 言

Yb:YAG 晶体属于准三能级系统的激光增益介质, 它比属于四能级系统的 Nd:YAG 晶体有许多突出的优点^[1,2]。首先它的量子效率高, 理论上可达 91% ;其次它对抽运光的热转换率低, 只有 11%。此外, 该材料还具有斜率效率高、吸收带宽宽(在中心波长 940 nm 处为 18 nm)、荧光寿命长(1.2 ms)等优点, 因此特别适合于半导体激光器抽运的大功率脉冲激光器。这种材料的一个不足之处是其激光下能级在常温下热平衡粒子数浓度较高, 要求很高的抽运功率密度。我们采用 Yb:YAG 薄片激光器的结构, 以期同时实现高效率、大功率输出和好的光束质量^[3]。

Yb:YAG 薄片激光器采用端面抽运、端面冷却的方式, 热场梯度与器件的光轴方向一致, 热畸变的影响被缩小到最低限度, 有利于得到很好的光束质量。我们用钛宝石激光以接近垂直的角度抽运 Yb:YAG 薄片激光器, 获得了 50% 以上的斜率效率, 在抽运功率密度达到 5 kW/cm² 的条件下仍未发现明显的热畸变, 不过此时抽运功率仅 1 W。大功率抽运条件下情况很不一样。计算表明, 0.9 mm 厚的 Yb:YAG 片在 50W 功率抽运下(抽运光斑直径为 2 mm, 激光介质后表面作为腔镜, 抽运光被其后表面全反膜反射回来, 因此实际上抽运光将通过晶体两次)将产生 80 $^{\circ}\text{C}$ 左右的升温, 其两表面间的温差约为 40 $^{\circ}\text{C}$, 与冷却热沉之间还有很高的温度梯度。Yb:YAG 这种材料在热平衡状态时的激光下

能级粒子数浓度较高, 由此引起的热效应问题非常突出, 因此高效快速的冷却是能否实现高功率稳定输出的关键。

2 冷却方式和效果

Yb:YAG 薄片在大功率抽运下温度很高, 高效快速地冷却激光介质, 保持其处在较低的温度条件下至关重要。我们采用了散热能力达 6 kW/cm² 的微通道热沉来进行冷却。Yb:YAG 薄片紧贴微通道热沉上, 由恒温循环水系统控制热沉的温度。实验结果表明, Yb:YAG 激光器的阈值抽运功率随冷却水温度的下降而加速下降, 如图 1 所示。国外文献报道, 在 -60 $^{\circ}\text{C}$ 和更低的低温条件下效果非常明显, 激光器的效率将直线上升^[4]。

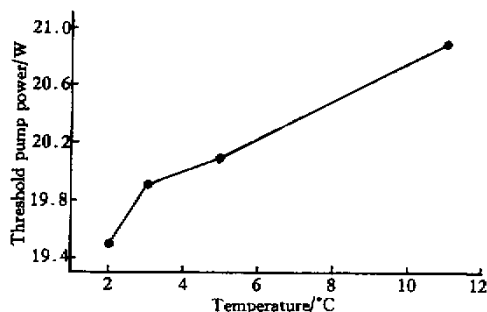


Fig. 1 Threshold pump power vs temperature of cooling water

Yb:YAG 薄片与热沉之间的热阻对冷却的影响也很大。我们用实验对比了 Yb:YAG 薄片与热沉之间涂有低熔点金属导热层和薄片直接紧压在热沉未涂金属导热层这两种结构。结果前者的输出功率和斜率效率都比后者有明显提高, 如图 2 所示。实

* 国家科委 863 高科技项目资助课题。

实验使用的激光增益介质由 Yb:YAG 薄片制成, Yb³⁺ 的摩尔分数为 0.1, 厚度为 0.9 mm。薄片的一面镀全反膜作为腔镜, 经曲率半径为 200 mm 的凹面镜的折迭(为补偿热透镜效应)与输出透过率 7% 的平板构成约 30° 的 V 型腔。抽运光斑直径约为 1.2 mm。薄片固定在微通道热沉上冷却, 冷却水温度为 15 °C。实验只是为了研究热阻的影响, 激光器各因素并未取最佳状态, 所以效率较低。

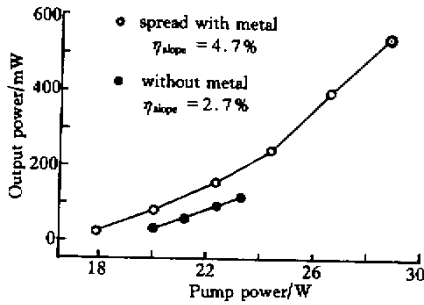


Fig. 2 Laser output vs input power for Yb:YAG crystal spread with or without thermal conductive metal

3 片厚影响的理论分析

对抽运激励和激光辐射运用严格的平面波分析法可以得出 Yb:YAG 激光器中抽运光被 Yb:YAG 晶体吸收两次时(激光介质作为全反腔镜的情形)的阈值抽运功率和斜率效率公式如下^[5]:

$$P_{th} = h\nu_p \frac{N_2 A}{\tau} \frac{1}{(1 - e^{\sigma_p N_{2p}})(1 + R_p e^{\sigma_p N_{2p}})} \quad (1)$$

$$\eta_{slope} = \eta_{mode} \frac{\nu_l}{\nu_p} \frac{1 - R}{R} \frac{(1 - e^{\sigma_p N_{2p}})(1 + R_p e^{\sigma_p N_{2p}})}{(e^{\sigma_l N_{2l}} - 1)(T^2 e^{\sigma_l N_{2l}} + 1)} \quad (2)$$

其中 h 为普朗克常数, ν_l 为激光频率, ν_p 为抽运光频率, A 为抽运光光斑面积, R 为激光器输出耦合的反射率, R_p 为晶体后表面的抽运光反射率, T 为单程腔内透过率(不计耦合输出和基级的二次吸收损耗), τ 为受激态能带的储能寿命, σ_l 为受激发射截面, σ_p 为抽运吸收截面, η_{mode} 为模匹配效率, N_2 为受激态能带粒子数密度沿轴向的积分, N_{2l} 、 N_{2p} 分别是与激光和抽运光相关的斯塔克能级的反转粒子数。在(1)式、(2)式各项中, 温度直接影响 N_2 、 N_{2l} 、 N_{2p} 的值。

在端面抽运、端面冷却的情况下, 热场梯度与光轴方向一致, 考虑一维散热的近似情形, 热传导方程为(抽运光被激光介质吸收两次的情形)^[6]:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = - \frac{\eta_t P \alpha e^{-\alpha z}}{Ak} - \frac{\eta_t R_p P e^{-\alpha L} \alpha e^{-\alpha(L-z)}}{Ak} \quad (3)$$

其中 t 为晶体温度, z 为晶体沿光轴方向的厚度, P 为抽运功率, η_t 为晶体热转换率, α 为对抽运光的热吸收系数, k 为晶体热导率, L 为晶体厚度。利用晶体后表面与冷却水之间热交换、前表面绝热的边界条件可以算出晶体内的温度分布。计算过程不考虑热量沿径向的传导以及晶体前表面向空气的散热。由(3)式可知, 晶体温度随抽运功率变化, 而(1)式中阈值抽运功率又随晶体温度改变。为求阈值抽运功率(1)式、(3)式被不断迭代直至达到稳态。

(1)式、(2)式中的 P_{th} 和 η_{slope} 考虑了基态的二次吸收。由于二次吸收, P_{th} 直接受到激光介质片厚的影响。片厚增加, 二次吸收增大, 导致 P_{th} 增大。另一方面, 片厚增加, 晶体温度上升, N_2 、 N_{2l} 、 N_{2p} 改变, 同样导致 P_{th} 增大。理论曲线表明, 温度变化对 P_{th} 影响更大。为计算二次吸收对 P_{th} 的影响, 假定晶体温度不随片厚增加而上升, 它与冷却水的温度相同, 设定为 15 °C, 计算结果对应图 3 中的细实线。实际上, Yb:YAG 薄片有温升, 薄片内部以及薄片和冷却装置之间都存在温度梯度, 考虑温升后的理论曲线也示于图 3, 它的斜率明显大于前述细实线。由此可知随片厚变化, 温度对 P_{th} 的影响更大。同样对 η_{slope} 进行分析可知, 片厚增加, 温度上升, η_{slope} 加速下降。

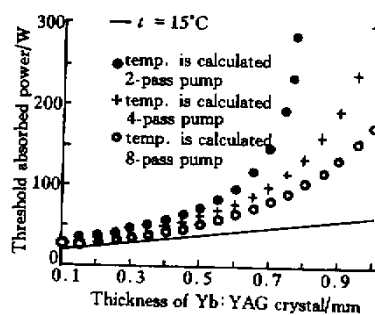


Fig. 3 Calculated threshold absorbed power vs thickness of Yb:YAG crystal

以上计算取抽运光斑直径为 2 mm, Yb:YAG 中 Yb³⁺ 的摩尔分数为 0.1, 后表面镀全反膜作为腔镜, 冷却水温度为 15 °C, 激光器输出腔镜透过率为 90%。

考虑晶体温升后的 P_{th} 计算结果示于图 4。激光介质作为全反腔镜时, 抽运光将两次通过晶体, 如果还没有被吸收完, 则可以安排剩余的抽运光返回, 再次进出晶体, 使抽运光得到充分利用。图中包括

抽运光被晶体 2 次、4 次、8 次吸收时的值。在阈值抽运功率对应的温度条件下,由(2)式算出 η_{slope} ,结果示于图 5,这是在阈值抽运功率条件下的斜率效率。随着抽运的增加,温度会上升,斜率效率会下降。所以图 5 的斜率效率实际上是极限值。

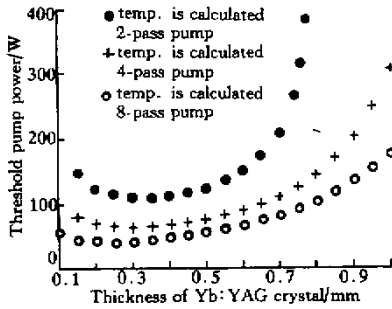


Fig. 4 Calculated threshold pump power vs thickness of Yb:YAG crystal

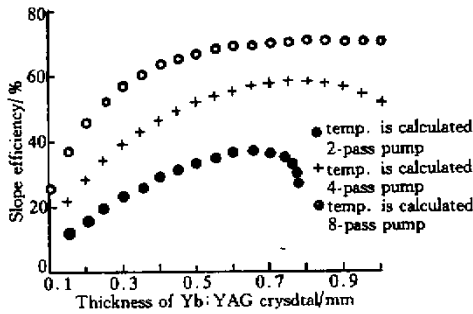


Fig. 5 Calculated slope efficiency vs thickness of Yb:YAG crystal

由图4和图5可以看出,随着晶体厚度的增加,阈值抽运功率加速上升,而斜率效率加速下降。说明激光介质的厚度越大,热效应的影响也越大。此结果提示我们,激光介质薄片应该尽可能地薄。在减薄激光介质的同时,当然要设法使抽运光能够多次进入激光介质,从而被充分地吸收。

4 减薄效果的实验结果

实验选用 Yb^{3+} 的摩尔分数为 0.1 的 Yb:YAG 薄片,激光器谐振腔结构如图 6 所示。Yb:YAG 薄片紧贴在微通道热沉上,其间有钎箔为连接层,以保证散热良好。薄片的后表面对 940 nm 和 $1.03 \mu\text{m}$ 镀全反膜,充当全反腔镜。输出镜 M 是对 $1.03 \mu\text{m}$ 透过率 10.5% 的平板。腔长为 114 mm。三路光纤耦合输出的 940 nm 半导体激光抽运 Yb:YAG,并设置三个凹面镜将剩余的抽运光反射回去,再次抽运晶体,使抽运光 4 次通过 Yb:YAG 而被充分吸

收。抽运光光斑直径约为 2 mm。热沉的循环水温度为 15°C 。Yb:YAG 薄片的前表面也采取了一定的散热措施。实验比较了 0.5 mm 和 0.35 mm 两种厚度的 Yb:YAG 薄片,结果如图 7 所示。可以看出,0.35 mm 的净输出功率(因而绝对效率)和斜率效率均高于 0.5 mm 的相应值。比之前述的 0.9 mm 薄片,这些量值的提高更为明显。

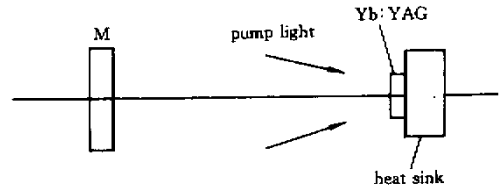


Fig. 6 Schematic diagram of the structure of a Yb:YAG thin disk laser

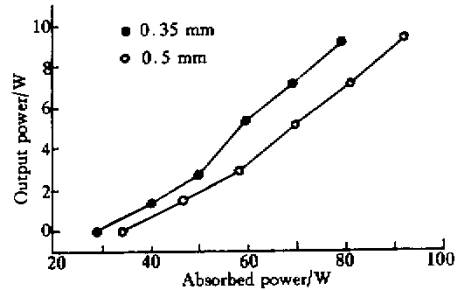


Fig. 7 Laser output vs absorbed power for different Yb:YAG crystal thickness

至于对阈值的影响,我们有三组对比记录示于表 1。显而易见,减薄 Yb:YAG 薄片的厚度对降低阈值大有好处。

Table 1. Threshold absorbed power vs different thickness of Yb:YAG crystal

	thickness of Yb:YAG/mm	threshold absorbed power/W
experiment 1	1.0	14
	0.9	9.7
experiment 2	0.9	36
	0.6	22
experiment 3	0.5	33
	0.35	28

(以上三组数据是在不同的抽运方式、冷却方式和腔结构条件下得到的,相互之间没有可比性。)

结语 在大功率半导体激光抽运 Yb:YAG 薄片激光器时,激光介质温升引起的热效应的影响十分突出,因此高效快速的冷却十分重要。理论和实验均

表明,减薄 Yb:YAG 片并增加抽运光被晶体吸收的次数是提高输出功率和效率的有效途径。据此研究结果用厚 0.35 mm Yb:YAG 薄片获得了 15.9 W 的 1.03 μm 激光,斜率效率超过 40%。由厚度更薄的晶体和抽运光被晶体吸收 16 次的抽运组成的 Yb:YAG 薄片激光器正在进一步研制,以获得更大的功率和效率。

实验中的大量精密机械设计和加工由翁明亮、周国强、樊坤林完成,上海光机所晶体组、薄膜中心以及上海西光晶体厂及时地为我们提供了各种特殊要求的试验样品,在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] Giesen A, Hügel H, Voss A *et al.*. Scalable concept for

diode-pumped high-power solid-state lasers. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **58**(5):365~372

[2] Lacovara P, Choi H K, Wang A *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1089~1091

[3] Erhard S, Giesen A, Karszewski M *et al.*. Novel pump design of Yb:YAG thin disk laser for operation at room temperature with improved efficiency. In *OSA Trends in Optics and Photonics, Advanced Solid-State Lasers*, Fejer M M, Injeyan H, Keller U eds., 1999, **26**:38~44

[4] Brauch U. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 nm and 1053 nm. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):713~715

[5] Beach R J. CW Theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(1~3):385~393

[6] Cousins A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(4):1057~1069

Temperature Effect of Yb:YAG Thin Disk Laser Crystal

Li Xiaoli Shi Xiangchun Shi Peng Guo Mingxiu Zhang Guifen Lu Yutian Hu Qiquan
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 5 June 2000; revised 10 August 2000)

Abstract: Some factors affecting the temperature of laser crystal in Yb:YAG thin disk lasers are studied. The theoretical and experimental results show that reducing thickness of the crystal and increasing the number of pump passes simultaneously are effective to reduce the temperature of crystal and to improve the output power and efficiency of the lasers. As a result, 15 W output power at 1.03 μm with a slope efficiency over 40% from a 0.35 mm thick Yb:YAG disk laser is obtained.

Key words: Yb:YAG; thin disk laser; temperature effect