

文章编号: 1007-5461(2002)02-0104-05

二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器获得 16 W 连续激光输出

李 超, 徐 震, 李俊林, 吴念乐, 李师群

(清华大学物理系, 量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100084)

姚广涛, 张绍光

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要 近年来, Yb:YAG 激光研究已被视为发展高效、高功率二极管泵浦固体激光器的一个主要方向。本文简要分析了 Yb:YAG 作为增益介质优于 Nd:YAG 的性质, 阐述了 Thin Disk 激光器的原理, 并介绍了我们在国内首次获得 16 W 连续激光 (波长 1030 nm) 输出的二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器装置及数据。

关键词 二极管泵浦固体激光器 (DPSSL); Yb:YAG, Thin Disk 激光器

中图分类号 TN248.1+3

文献标识码 A

1 引 言

由于激光二极管 (LD) 具有外量子效率高, 泵浦波长易与介质吸收峰很好对应等特点, 使得二极管泵浦固体激光器 (DPSSL) 的光-电转换效率可达到 50% 以上。此外, 由于采用 LD 泵浦降低了冷却要求, 加之 LD 频率稳定, 也因而减小了激光器的技术噪声。DPSSL 的各项指标, 如斜效率、线宽、稳定度、脉宽、单频运转等均超过了闪光灯泵浦的固体激光器。如果采用适当的冷却及合适的增益介质, 那么 DPSSL 还会在保证高功率输出的情况下获得很好的光束质量。

但是, 常见固体激光器增益介质——如 Nd:YAG 以及传统的冷却方式和泵浦几何 (如: 棒状和板条形), 并不是用来设计可同时提供高效率 and 好光束质量的高功率激光器的最佳选择。从这一点来说, Yb:YAG 以其优秀的性质, 在近年来逐渐成为研究人员关注的热点。许多国际著名的研究机构, 如美国的利夫莫尔国家实验室、林肯实验室、德国的斯图加特大学、英国的南安普敦大学等相继开展了对 Yb:YAG 的研究, 将其视为发展高效、高功率固体激光器的一个主要途径。

其中由德国斯图加特大学和宇航公司于 1992 年发明的 Thin Disk 激光器^[1~3]正是采用了新的设计思想, 利用 Yb:YAG 的优秀性质, 将 Yb:YAG 晶体制成碟片型, 并采用 LD 对其进行泵浦, 从而在高功率激光源领域中获得了很大的成功, 其应用前景十分看好。

我们采用 Thin Disk 激光器的设计思想, 用波长为 940 nm, 光纤耦合输出功率为 40 W 的二极管激光器泵浦 Yb:YAG, 在国内首次获得了 16 W 连续输出, 波长为 1030 nm 的激光。

2 Yb:YAG 的性质

Yb:YAG 表现出准三能级的性质, $F_{5/2}$ 多重态在基态上 10000 cm^{-1} 处, 再高的能级在 5d 组态中, 差不多在 100000 cm^{-1} 处, 远大于在 YAG 中的禁带宽度 ($\sim 40000 \text{ cm}^{-1}$)。晶格场让 4f 多重态分裂 700 个波数,

基金项目 国家自然科学基金项目批准号: 69878012

收稿日期: 2001-01-05; 修改日期: 2001-02-21

图 1 表示了这个情况。激光下能级在被分裂的 $^2F_{7/2}$ 能级中一部分能态上有少量的粒子数布居。由于缺乏更高的泵浦能级, 用宽带去泵浦 (如闪光灯) 效率很低。在 $^2F_{7/2}$ 能级中, 只有有限的宽度用作泵浦带。在这种准三能级系统中, 要降低阈值必须降低温度。由于缺乏更高的泵浦能级, 给 Yb:YAG 带来了两大好处: 一是无激发态吸收, 二是无上转换。与 Nd:YAG 不一样, Yb:YAG 不存在激发态吸收和上转换引起的荧光淬灭, 而正是荧光淬灭限制了 Nd 在 YAG 中的掺杂浓度。

与其他激光介质比起来 (尤其是 Nd:YAG), Yb:YAG 具有如下优点: 光-光效率高 (理论上可达到 83%); 发热量小 (<11%); 有适应激光二极管泵浦的宽带宽, 相对较大的受激辐射截面; 高掺杂浓度 (25%), 无荧光淬灭; 吸收长度很短 (0.5 mm); 无激发态吸收, 无上转换; 热传导率以及基质材料的抗拉强度很高; 荧光寿命长, 比 Nd:YAG 至少大 5 倍。所以在脉冲泵浦情况下可以贮备更多的能量; 出光波长在一定范围内可调; 可运转在亚皮秒量级上。

从上述这些优点可以看出 LD 泵浦的 Yb:YAG 激光器在某些应用上明显优于 Nd:YAG 激光器。但同时 Yb:YAG 也有增益小; 阈值高, 需要较高的泵浦功率密度; 效率对温度比较敏感, 受温度影响较大; 需要高效致冷等缺点。其中最主要的缺点就是需要较高的泵浦功率密度。

不过采用高功率的 InGaAs 应变层激光二极管泵浦可以很容易克服 Yb:YAG 这一大缺点。LD 的发射波长可以调到 Yb^{3+} 的吸收波长, 从而获得很高的泵浦功率密度。文献 [4]、[5] 和 [6] 已报导了这方面的实验工作。

由于 Yb:YAG 可实现 Yb^{3+} 离子的高浓度掺杂, 因此增益介质可做成微片, 这对实现 LD 泵浦的固体激光器的集成化、小型化将具有十分重要的意义。Thin Disk 激光器的成功之处正是采用了碟片型的晶体 (厚度约为 200 ~ 400 μm)。

虽然还有其它掺 Yb 的系统, 比如 $Yb:LiYF_4$, $Yb:YAlO_3$, 但 Yb:YAG 是最有发展前途的, 因为它有适应激光二极管泵浦的宽带宽, 相对较大的受激辐射截面, 较好的热传导性质, 并容易生长出优质晶体。

3 Thin Disk 激光器

传统的固体激光器冷却是沿着垂直光轴的横向进行热传递的, 因而由于温度的升高所引发的热透镜效应等, 导致光束质量变差、能量损失大, 这一现象在能够提供很高的能量转换效率, 但同时也需要更多泵浦功率密度的准三能级系统中尤为明显。例如, 在端泵棒状激光器中, 为了限制 Yb:YAG 棒横向上的温升 (<50 K), 棒长就必须与输出功率成正比 (>25 mm/kW), 而截面直径就必须与输出功率的平方根成正比 (<7 mm/kW^{1/2})。因此, 为了充分发挥 Yb:YAG 的潜力, 克服传统冷却方案所带来的弊端, 就需要对此加以改进。1992 年德国斯图加特大学的 Dr. Giesen 等人提出了 Thin Disk 激光器的思想 [1~3], 在确保高功率激光器在高效输出的同时获得了很好的光束质量。

Thin Disk 激光器的基本思想是利用很薄的碟片型晶体来作激光器的增益介质。碟片型晶体的一个表面被安装在热沉上, 该平面同时构成激光器的反射镜之一, 冷却沿着与光轴平行的方向进行。

由于热源与热沉间的距离很小, 因而即使在泵浦功率密度很高的情况下, 晶体内部的升温也不会很大。当泵浦光以近平面波入射, 并且晶体的直径比厚度大得多的情况下, 其热通量可被看成是一维的情形。这样晶体内部温度的均匀分布大大消除了晶体的热形变。这一远远优于传统冷却方案的特点, 使得在泵浦功率密度不变的情况下, 只需增大泵浦直径, 就可简单地提升输出功率。

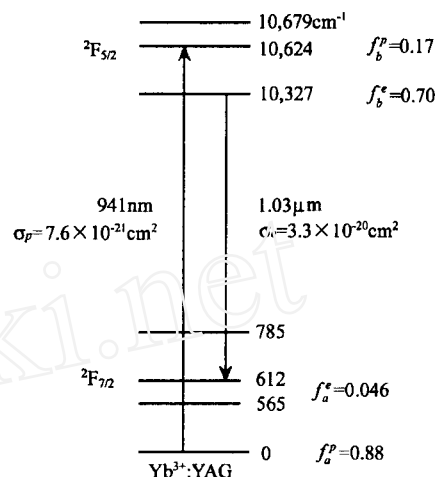


Fig.1 Stark level spectroscopy of Yb:YAG

由于做成碟片型的晶体厚度很薄, 单次通光期间晶体不能完全吸收泵浦光, 为能充分吸收泵浦光, 泵浦光需多次通过激光介质。这一设计可以提高泵浦功率密度, 在保证很高的吸收前提下, 降低晶体的掺杂浓度及厚度, 从而降低由泵浦离子数决定的阈值功率。

系统采用半导体激光器光纤耦合进行泵浦以保证激光器的设计与泵浦源独立。其主要优点如下: 1) 光纤束端面的功率密度很高; 2) 由于光纤耦合所带来的很大自由度, 使得激光器可以做得很小, 且泵浦源与其分开可保证控制、维护以及冷却比整合在一起的激光器容易; 3) 激光器的设计可以不受半导体激光器数目的限制。

一个典型激光器的晶体的直径、厚度以及掺杂浓度分别为 7 mm、0.3 mm 和 8~13%。其前表面对泵浦光及激光全透后表面则对这些波长高反。泵浦光由 InGaAs 半导体激光器提供, 其波长为 940 nm, 泵浦方式为端泵, 具体原理如图 2 所示。

泵浦光通过四面反射镜及一面平面镜所构成的光学系统可实现在晶体中穿梭八次, 这样大约 90% 的泵浦光就被晶体所吸收了。输出耦合镜的透过率为 2~5%。

4 实验结果与讨论

4.1 实验结果

整个实验装置如图 3 所示, 我们用波长为 940 nm, 光纤耦合输出功率最高为 40.43 W 的 InGaAs 二极管激光器进行泵浦, 泵浦源工作温度为 12.5℃。

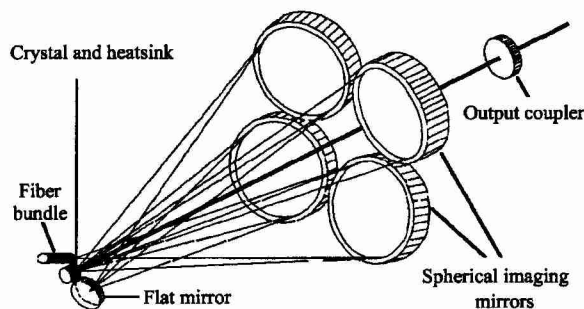


Fig.2 Three-dimension view of the pumping scheme and the resonator



Fig.3 View of the experimental setup of the Yb:YAG thin disk laser

当使用 $r=1$ m、透过率为 4%(1030 nm) 的输出耦合镜时, 在腔长为 9 cm 的情况下, 我们在晶体温度分别为 -10°C 、 0°C 、 10°C 时, 测得输出激光功率与泵浦功率的曲线如图 4 所示。在晶体被冷却到 -10°C 的情况下, 泵浦功率为 40.43 W 时, 我们获得了波长为 1030 nm、功率为 16.37 W 的连续输出激光。此时, 激光器的光-光效率为 40.5%, 斜效率为 57%。

然后, 我们换用 $r=2$ m、对 1030 nm 透过率仍为 4% 的输出耦合镜, 其他参数不变, 同样在晶体温度分别为 -10°C 、 0°C 、 10°C 时, 测得输出激光功率与泵浦功率的曲线如图 5 所示。我们看到, 激光器的效率有所下降, 但光束质量却有较大提高, 这在实验中也得到了定性的验证。

4.2 讨论

激光器的输出效率与晶体温度的关系较大, 晶体温度越低, 则输出激光的光-光转换效率就越高, 图 6 的曲线说明了这一结论。这主要是因为晶体温度的升高导致激光下能级有少量粒子数占据, 从而导致光转换效率的降低。从上面这一结论可以看出, 将晶体冷却到很低的温度使得效率提升已成为可能。另外, 由于泵浦光是通过四面凹面反射镜及一面平面镜所构成的光学系统实现在晶体中穿梭八次, 因此, 光路的调节对整个激光器的效率影响较大。在实验过程中, 我们发现激光器的输出功率对光路的变化十分敏感, 而我们放置四面凹面反射镜的调节架在设计上也一定程度地制约了光路的调节。综合以上的分析, 我们觉得激光器输出

效率的提升潜力很大。

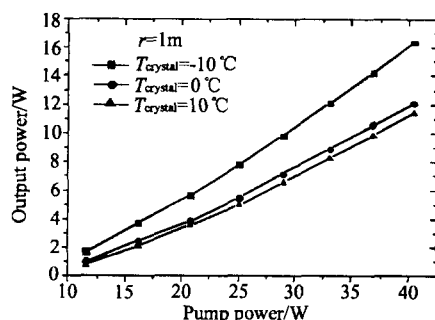


Fig.4 Output power versus pump power at various temperatures of the cooling crystal.

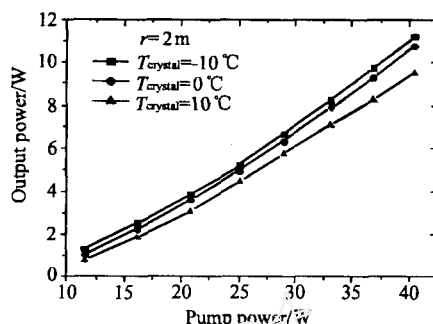


Fig.5 Output power versus pump power at various temperatures of the cooling crystal.

在实验过程中, 我们还对光束质量做了初步的研究。根据光纤直径我们可推算出泵浦光斑的直径最小可以达到 1.05 mm, 在采用 $r=2\text{ m}$ 的输出耦合镜的情况下, 当腔长大于 46 cm 时, 激光的光束质量有可能达到理想的 $M^2=1$ 情形, 但实际上由于调节光路上的困难, 加上总会存在一点热透镜效应影响, 所以, 在此条件下达不到理想的 $M^2=1$ 。图 7 是我们在腔长为 50 cm, 输出耦合镜 $r=2\text{ m}$ 的情况下得到的数据曲线。

在实验过程中, 激光器的运作十分稳定, 输出功率的涨落小于 1%。

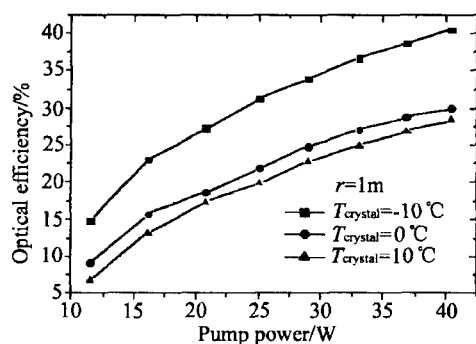


Fig.6 Optical efficiency versus pump power at various temperatures of the cooling crystal.

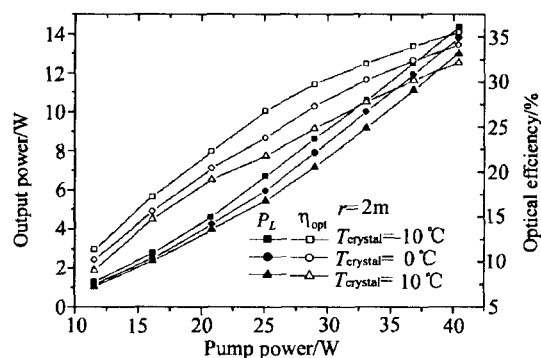


Fig.7 Output power and optical efficiency versus pump power at various temperature of the cooling crystal.

The cavity length is 0.5 meter.

参 考 文 献

- 1 Giesen A, Hügel H, Voss A *et al*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, 58: 365
- 2 Karszewski M, Brauch U, Contag K *et al*. 100W TEM₀₀ operation of Yb:YAG thin disk laser with high efficiency [C]. in *Advanced Solid-state Lasers*, W A Bosenberg, M M Fejer. eds., : Vol 19 of OSA Proceedings Series Trends in Optics and Photonics . Optical Society of America, Washington, D.C., 1998, 125
- 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 [C]. in *Advanced Solid-State Lasers*, M M Fejer. eds., : Vol. 26 of OSA Proceedings Series Trends in Optics and Photonics . Optical Society of America, Washington, D.C., 1999. 28
- 4 Fan T Y, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1987, QE-23: 605

- 5 Fan T Y, Sanchez A, DeFe W E. Scalable, end-pumped, diode-laser-pumped laser [J]. *Opt. Lett.*, 1989, 14: 1057
- 6 Krupke W F, Chase L L. [J]. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1989, 1040: 68

Diode Pumped Yb:YAG Thin Disk Laser Achieves 16 W CW Output

Li Chao, Xu Zhen, Li Junlin, Wu Nianle, Li Shiqun

(Key Laboratory for Quantum Information and Measurements, Ministry of Education,
Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Yao Guangtao, Zhang Shaoguang

(North China Institute of Electron-Optics, Beijing 100015)

Abstract In recent years, Yb:YAG has been regarded as a way of developing high power and high efficient diode pumped solid state laser(DPSSL). We briefly present the very promising properties of Yb:YAG as laser active material, most of them clearly superior to Nd:YAG in diode pumped applications. The thin disk laser concept was summarized. The experimental data and the diode pumped Yb:YAG thin disk laser setting which achieved 16 W CW output laser were demonstrated.

Key words diode pumped solid state laser(DPSSL); Yb:YAG; thin disk laser

李 超 (1975, 9 -), 男, 在清华大学物理系获得硕士学位.