

激光二极管抽运的高效率 Yb:YGG 激光器的连续及锁模运转

张永东¹ 魏志义¹ 张治国¹ 钱德年² 吕 亮² 曾晓东² 张怀金³ 于浩海³ 王继扬³

¹ 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190
² 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071
³ 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 报道了激光二极管抽运下的高效率 Yb:YGG 连续及锁模激光器。实验中采用光学浮区法生长的高质量 Yb:YGG 激光晶体, 在 6.7 W 的人射抽运功率下得到了 1.95 W 的激光输出, 光-光转换效率为 29.1%, 最大斜率效率为 60%。用半导体可饱和吸收镜启动锁模, 在没有补偿色散的情况下得到了 1 W 的激光输出, 光-光转换效率为 18.2%, 脉冲宽度为 2.1 ps, 中心波长位于 1035 nm。

关键词 激光器; 全固态激光器; 激光二极管抽运; Yb:YGG 晶体; 皮秒

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0202005

Laser Diode Pumped Efficient Continuous Wave and Picoseconds Yb:YGG Laser

Zhang Yongdong¹ Wei Zhiyi¹ Zhang Zhiguo¹ Qian Denian² Lü Liang²
Zeng Xiaodong² Zhang Huaijin³ Yu Haohai³ Wang Jiyang³

¹ Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
² College of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China
³ State Key Laboratory of Crystal Material, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract An efficient laser diode-pumped Yb:YGG laser is demonstrated by using a high quality Yb:YGG crystal grown by optical floating zone method, output power up to 1.95 W has been obtained under incident pump power of 6.7 W, corresponding to optical-to-optical efficiency of 29.1% and maximum slop efficiency of 60%. By using a semiconductor saturable mirror absorber (SESAM) to start and sustain the mode-locking, stable laser pulses of 2.1 ps has been obtained without dispersion compensation. The central wavelength is 1035 nm and the output power is 1 W, corresponding to optical-to-optical efficiency of 18.2%.

Key words lasers; solid state laser; lasers diode pumped; Yb:YGG crystal; picoseconds

OCIS codes 140.0140; 140.3480; 140.3615; 140.4050

1 引 言

随着高功率、高亮度激光二极管(LD)性能的不

断改进和新型激光增益介质的相继问世, 近年来 LD 直接抽运的超快激光在输出功率以及脉冲宽度

收稿日期: 2010-08-06; 收到修改稿日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(10874237)和中国科学院知识创新方向性项目(KJCX2-YW-N36)资助课题。

作者简介: 张永东(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光二极管抽运新型全固态超快激光的产生及其放大方面的研究。E-mail: ydzhang@aphy. iphy. ac. cn

导师简介: 魏志义(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事超强短脉冲激光及新型全固态激光等方面的研究。E-mail: zywei@aphy. iphy. ac. cn(通信联系人)

等方面获得了巨大进展,已有望替代传统钛宝石激光器成为高效率、低成本和紧凑易用的新一代超快激光源。其中三价镱离子(Yb^{3+})掺杂的激光材料由于具有能级结构简单、荧光光谱宽、量子效率高和能级寿命长等显著优点,是最令人感兴趣的研究工作之一^[1,2]。目前在已有的 Yb^{3+} 掺杂的激光介质中, $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体具有最佳的综合性能,也是高功率大能量激光器的理想材料,成为人们的研究热点之一^[3~5]。但该晶体存在的一个固有缺点是它的主发射峰处的荧光光谱宽只有 6 nm^[6],这就大大限制了其可以获得的最短脉冲。因此如何利用 Yb^{3+} 材料获得既能支持超短脉冲产生又能承受高功率大能量的激光运转,仍是吸引人们不断探索的研究内容。

钇石榴石($\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, YGG)是钇铝石榴石(YAG)的同形体,和 YAG 一样具有硬度高、稳定性好和热导率高等特点,适合掺杂稀土族和铁族元素^[7]。作为荧光材料,人们已经研究了其光谱特性:实验测得激光上能级寿命约为 1.1 ms^[8],主发射峰处的荧光光谱宽度约为 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的 4 倍^[9]。但是 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 晶体的熔点很高,采用传统方式生长的晶体并不能满足激光实验的要求。2009 年,山东大学采用光学浮区法生长了高质量的 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 晶体^[10],该晶体不仅具有优良的热力学性能,其主发射峰处的荧光光谱宽约为 22 nm,理论上可以支持小于 100 fs 的超短脉冲产生。与此同时作者所在的实验室实现了 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 的飞秒运转^[11],在 1045 nm 处获得了 245 fs 的激光脉冲。作为第一次实验结果,激光的光-光转换效率小于 10%,并没有完美地展现 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 的激光特性。本文通过进一步优化抽

运参数,在 6.7 W 的入射功率下,获得了 1.95 W 的连续激光输出,转换效率为 29.1%,最大斜率效率为 60%。用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模元件,在腔内没有补偿色散的情况下得到了 1 W 的锁模激光,相应的光-光转换效率为 18.2%,脉冲宽度为 2.1 ps,中心波长位于 1035 nm。

2 实验装置

研究了晶体的连续输出性能,实验装置采用图 1(a)所示的 Z 型折叠腔结构。其中 M1 为双色输入镜,对抽运光的透射率大于 95%(800~980 nm 波段反射率 $R < 2\%$),对 1030 nm 处激光的反射率大于 99%(1020~1100 nm 波段 $R > 99.9\%$)。M2, M3 分别为曲率半径 200 mm 和 300 mm 的凹面反射镜。M4 为平面高反镜,OC 为输出镜,透射率为 2.5%。实验中所用的 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 晶体的掺杂原子数分数为 10%,尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm。晶体两端镀有激光波段和抽运光波段的宽带增透膜。为了有效冷却晶体,将晶体用铝箔包裹后夹持在紫铜热沉上。实验过程中使用循环水系统对紫铜晶体夹冷却,水温维持在 12 °C 左右。抽运源采用商用的光纤耦合输出的半导体激光器,实际测得的最大输出功率为 7.2 W,光纤芯径为 50 μm ,数值孔径 0.22。光纤输出的抽运光经过一个 1:0.8 的准直聚焦系统后成像到激光晶体上。考虑到像散等因素的影响,焦点处的有效光斑直径约为 50 μm 。用于锁模的激光光路如图 1(b)所示, M4^* 是曲率半径为 300 mm 的凹面反射镜,用来聚焦 SESAM 上的光斑。

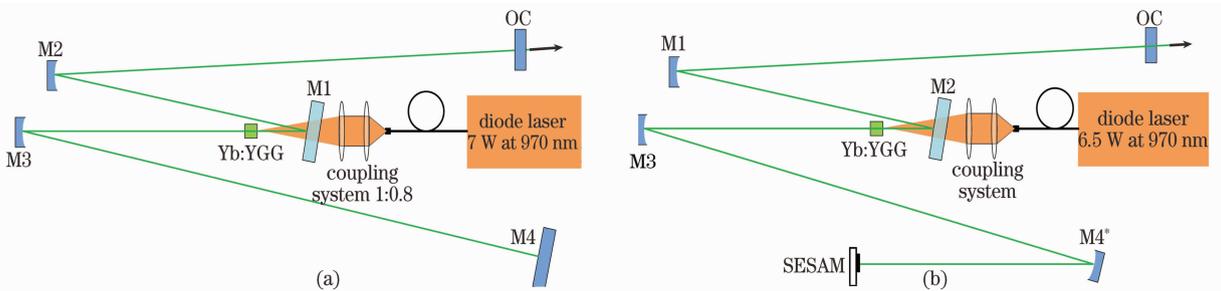


图 1 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 激光实验装置图。(a) 连续运转, (b) 锁模运转

Fig. 1 Experimental setup of $\text{Yb}:\text{YGG}$ laser. (a) continuous wave regime, (b) mode-locking operation

3 实验结果与讨论

考虑到耦合系统和 M1 的损耗,实际入射到激光晶体表面的最大抽运功率为 6.7 W。随着 LD 输出功率的增加,输出激光的波长会向长波方向漂移,

因此实验中将 LD 的温度控制在其下限 19 °C,最高功率运转时输出光谱的中心波长约为 971.5 nm,光谱宽度约为 5 nm。由于 $\text{Yb}:\text{YGG}$ 晶体在主吸收峰 970 nm 处的光谱半峰全宽只有 2 nm,因此导致晶

体对抽运光的平均吸收效率在 60% 左右。连续 (CW) 运转时的输入输出关系如图 2 所示, 实验测得激光的抽运阈值约为 1.6 W, 考虑到 LD 在低功率运转时波长仅为 965 nm, 此时只有 40% 的抽运光被吸收, 因此实际的抽运阈值小于 1 W。在最高 6.7 W 的入射功率下, 获得了 1.95 W 的输出功率, 光-光转换效率为 29.1%, 最大斜率效率 η_{\max} 为 60%。此时输出激光具有很好的光斑模式, 其中心波长为 1037 nm, 如图 2 中的插图所示。

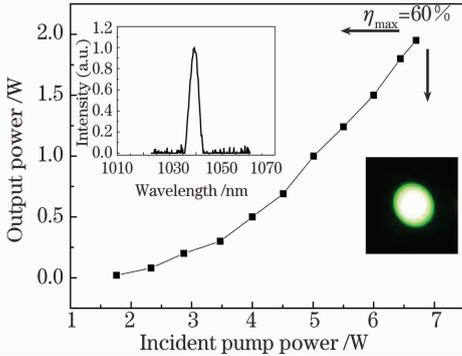


图 2 连续运转时的输入输出曲线。插图为最高功率时的光斑模式照片及光谱曲线

Fig. 2 Output power versus incident pump power under CW running. Inserts are spectrum and picture of beam pattern at the maximum output power

由于 Yb:YGG 激发态的上能级寿命长达 1.1 ms, 因此在锁模过程中很容易出现调 Q 锁模状态。要想克服这个不稳定的锁模状态, 需要使腔内脉冲满足判据^[12]

$$E_p^2 > E_{\text{sat},L} E_{\text{sat},A} \Delta R = F_{\text{sat},L} A_{\text{eff},L} F_{\text{sat},A} A_{\text{eff},A} \Delta R, \quad (1)$$

式中 E_p 为腔内的脉冲能量, $F_{\text{sat},L}$, $F_{\text{sat},A}$ 分别为激光晶体和 SESAM 的饱和通量, $A_{\text{eff},L}$, $A_{\text{eff},A}$ 分别为晶体和 SESAM 上的有效光斑面积, ΔR 是 SESAM 的调制深度。通常皮秒锁模振荡器的设计要考虑以下

两个方面: 1) 腔内的束腰分布, 使晶体上的光斑模式与抽运光的模式相匹配, 合理设计 SESAM 上的光斑面积, 使其工作于 10~20 倍的饱和能流, 并小于它的破坏阈值。实验中所采用的 SESAM 的调制深度为 0.5%, 饱和能流密度为 $120 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 非饱和吸收损失和弛豫时间分别为 0.5% 和 500 fs。2) 热稳定性, 谐振腔的设计要有效地补偿晶体上的热透镜效应, 即满足腔的稳定性不受热透镜的影响。为了获得高功率的锁模光, 将图 1 中的 M4 换成曲率半径为 300 mm 的凹面镜 (M4*) 来聚焦 SESAM 上的光斑。实际激光束腰半径约为 $85 \mu\text{m}$, 整个谐振腔的长度为 2.14 m, 对应重复频率为 70 MHz。仔细优化激光腔, 在抽运功率为 5.5 W 时得到了超过 1 W 的稳定锁模输出, 对应的光-光转换效率为 18.2%。此时, 用示波器监测到的锁模脉冲信号如图 3 所示, 单个脉冲的幅度抖动小于 2%。继续增加抽运功率时腔内会出现多脉冲现象, 严重地影响锁模的稳定性。用商用的脉冲强度自相关仪测量了稳定运行时的锁模激光的脉冲宽度, 结果如图 4 所示, 测得的自相关波形的脉冲宽度为 3.2 ps。假定所获取脉冲为双曲正割型, 则所得脉冲的宽度为 2.1 ps。用光谱仪测量到的锁模时的光谱曲线如图 5 所示, 中心波长为 1035 nm, 光谱的半峰全宽为 4 nm。Yb 掺杂激光器的输出波长依赖于谐振腔的损耗, 随着损耗的增加输出波长向短波方向移动^[13]。由于 SESAM 存在 0.5% 的非饱和损耗, 所以锁模时的输出光谱比连续运转时蓝移了 2 nm。

4 结 论

采用光学浮区法生长的高质量 Yb:YGG 激光晶体, 实现了高效率的连续激光输出。在 7 W 高亮度激光二极管抽运下, 获得了 1.95 W 的激光输

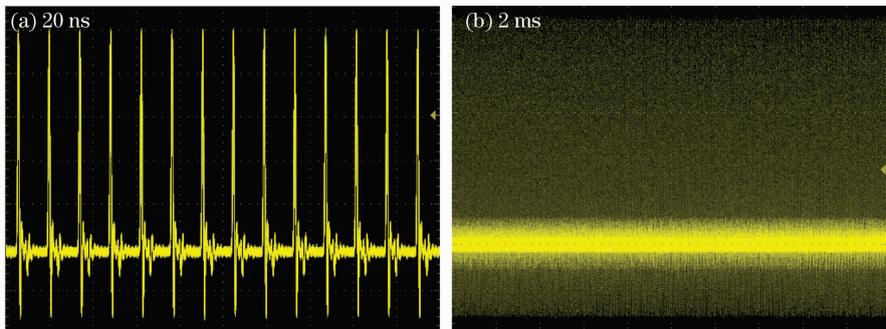


图 3 稳定锁模时的脉冲序列

Fig. 3 Pulse trains observed with two different time scales

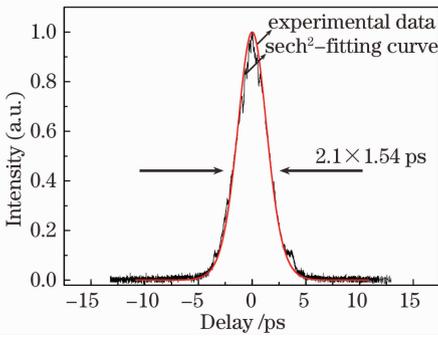


图 4 稳定锁模时的强度自相关曲线

Fig. 4 Intensity autocorrelation trace of the stable mode-locking laser pulse

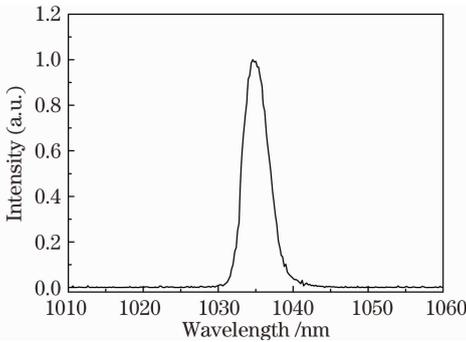


图 5 稳定锁模时的光谱曲线

Fig. 5 Laser spectrum of mode-locking operation

出,光-光转换效率为 29.1%,最大斜率效率为 60%。用 SESAM 作为被动锁模元件,在没有补偿色散的情况下,获得了 1 W 的连续锁模输出,脉冲宽度为 2.1 ps。从实验结果可以看出,Yb:YGG 晶体具有非常优良的激光性能,再加上它宽达 22 nm 的荧光谱宽,使其有望替代传统的 Yb:YAG 晶体,成为综合性能优良的一种新型超快激光增益介质。

参 考 文 献

1 Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua *et al.*. Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond Yb:LSO laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1806~1809

周斌斌, 邹育婉, 李德华 等. 连续锁模皮秒 Yb:LSO 激光实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1806~1809

2 Liu Chengcheng, Liu Jie, Zhao Yuefeng *et al.*. Characterization of laser diode-pumped passively mode-locked Yb:YSO laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2380~2383

刘成成, 刘杰, 赵 Yuefeng 等. 激光二极管抽运 Yb:YSO 被动锁模激光的特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2380~2383

3 Wang Jianlei, Shi Xiangchun, Zhu Xiaolei. Optimization design and modeling of high peak power Yb:YAG pulsed lasers with high efficiency[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2278~2283

王建磊, 施翔春, 朱小磊. 高效率大功率脉冲 Yb:YAG 片状激光器优化设计与模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2278~2283

4 Wu Wuming, Wu Huiyun, Xu Xiaojun *et al.*. Cryogenically cooled high average power Yb:YAG laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071403

吴武明, 吴慧云, 许晓军 等. 低温冷却高平均功率 Yb:YAG 激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 071403

5 Duan Wentao, Jiang Xinying, Jiang Dongbin *et al.*. 10 Hz joule-class laser diode end-pumped V-shaped water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 44~48

段文涛, 蒋新颖, 蒋东滨 等. 激光二极管端面抽运的焦耳级 10 Hz“V”型水冷 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 44~48

6 A. Giesen, J. Speiser. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 598~609

7 J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. van Uitert. Laser oscillation in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnet[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **4**: 182~184

8 S. Heer, M. Wermuth, K. Krämer *et al.*. Sharp ²E upconversion luminescence of Cr³⁺ in Y₃Ga₅O₁₂ codoped with Cr³⁺ and Yb³⁺ [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(12): 125112

9 I. A. Kamenskikh, N. Guerassimova, C. Dujardin *et al.*. Charge transfer fluorescence and f-f luminescence in ytterbium compounds[J]. *Opt. Mater.*, 2003, **24**(1-2): 267~274

10 Haohai Yu, Kui Wu, Bin Yao *et al.*. Growth and characteristics of Yb doped Y₃Ga₅O₁₂ laser crystal [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**(12): 1689~1695

11 Yongdong Zhang, Zhiyi Wei, Binbin Zhou *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked Yb:Y₃Ga₅O₁₂ laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3316~3318

12 C. Hönninger, R. Paschotta, M. Graf *et al.*. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(1): 3~17

13 Huaijin Zhang, Junhai Liu, Jiyang Wang *et al.*. Spectroscopic properties and continuous-wave laser operation of a new disordered crystal; Yb-doped CNGG[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9464~9469