

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0030-03

Nd:YVO₄和 Nd:YAG 混合放大皮秒激光器

彭润伍^{1,2} 郭林² 张小富² 李芳琴² 崔前进² 薄勇² 彭钦军² 崔大复² 许祖彦² 唐立军¹

(¹长沙理工大学物理与电子科学学院, 湖南长沙 410076; ²中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

摘要 实验研制了端抽运 Nd:YVO₄ 放大器和侧抽运 Nd:YAG 放大器相结合的高功率高光束质量皮秒激光器。这一系统充分利用了 Nd:YVO₄ 晶体受激发射截面大和 Nd:YAG 晶体热导率大的优点。端面抽运 Nd:YVO₄ 放大器使振荡器输出的激光获得高增益而迅速放大, 随后的侧面抽运的 Nd:YAG 激光模块放大器有利于大功率抽运从而得到高功率激光输出。侧抽运 Nd:YAG 放大器采用了双程放大的方式设计, 利于提高放大器的效率。为保证光束质量和光束模式匹配, 在放大器之间设计了合适的空间滤波器。激光器输出平均功率 43.4 W, 光束质量因子 $M^2 < 1.7$ 的皮秒激光。

关键词 激光器; 皮秒激光; Nd:YVO₄ 放大器; Nd:YAG 放大器; 二极管抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0030

Picosecond Laser System Combined with Nd:YVO₄ and Nd:YAG Amplifiers

Peng Runwu^{1,2} Guo Lin² Zhang Xiaofu² Li Fangqin² Cui Qianjin² Bo Yong²

Peng Qinjun² Cui Dafu² Xu Zuyan² Tang Lijun¹

¹Department of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology,
Changsha, Hunan 410076, China

²Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract A high average power and high beam quality picosecond laser system combined with diode-end-pumped Nd:YVO₄ and laser diode-side-pumped Nd:YAG amplifier is described. The system combines the advantages of Nd:YVO₄ crystal having large stimulated-emission cross section and Nd:YAG crystal having good thermal conductivity. The diode-end-pumped Nd:YVO₄ amplifier allows the laser from the oscillator to obtain high gain so that the laser can amplify rapidly and the diode-side-pumped Nd:YAG amplifier benefits to obtain high output power. The Nd:YAG amplifier is designed as double-pass form to increase the efficiency of the amplifier. Spatial filters are adopted between amplifiers to ensure good beam quality and mode matching. Picosecond laser with average power of 43.4 W and good beam quality factor $M^2 < 1.7$ is generated from this laser system.

Key words lasers; picosecond laser; Nd:YVO₄ amplifier; Nd:YAG amplifier; laser diode pump

1 引言

被动锁模的全固态激光系统能够产生皮秒甚至飞秒量级的超短激光脉冲^[1~10]。这类全固态超短脉冲激光器结合了超短脉冲激光器脉冲持续时间短, 峰值功率高的特点和全固态激光器结构紧凑, 效率高, 使用寿命长等优点, 在各方面得到广泛应用。在这类激光器中如何获得更高功率的高光束质量超短脉冲一直是人们不断探索的问题, 常见的方法是采用多级放大器对振荡器产生的较低功率脉冲激光进行放大得到高功率激光输出^[2,6]。

众所周知, Nd:YVO₄ 晶体具有较大的受激发射

截面, 有阈值低、效率高和增益高的优点, 但热导率小, 输出功率受到限制。而 Nd:YAG 晶体则相反, 具有优良的热学性能, 在高功率激光系统中得到广泛应用。结合这两种晶体的优点, 本工作研制了由 Nd:YVO₄ 皮秒振荡器种子源、两级 Nd:YVO₄ 放大器和一级两个 Nd:YAG 激光模块双程放大器构成的皮秒激光系统。采用这一系统, 我们获得了 43.4 W 的高功率皮秒激光输出。

2 实验装置

激光系统种子源的性能对整个激光器的输出有

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJCX2. YW. H03)和湖南省自然科学基金(07JJ3112)资助课题。

作者简介: 彭润伍(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高功率激光技术和激光传输等方面的研究。

E-mail: pengrunwu@163.com

着重大影响。实验中的皮秒种子源是我们自行研制的平均功率为 3.1 W, 重复频率为 73 MHz, 脉冲宽度约为 20 ps 的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 被动锁模 Nd:YVO₄ 振荡器, 输出激光的光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 。振荡器结构类似于文献[7]中的激光系统, 如图 1 所示。激光晶体为掺杂浓度 0.3% 的 Nd:YVO₄, 振荡器总腔长约 2 m。振荡器抽运源为波长 808 nm, 光纤芯径 400 μm, 数值孔径 0.22 的半导体激光器。SESAM 参数为波长 1064 nm, 恢复时间 20 ps, 饱和能

量密度 $F_{sat,A} \sim 40 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 调制深度 $\Delta R \approx 0.01$, 非饱和和吸收损耗 0.2%, 破坏阈值 $> 1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。设计 SESAM 上光斑约 120 μm。为保证振荡器的稳定性, 在其后放置光隔离器防止放大器逆行激光进入振荡器。整个皮秒激光系统的光路设计如图 2 所示。图 2 中 OI 为隔离器, MMO 为模式匹配系统, LD 为半导体激光器, C1, C2 为 Nd:YVO₄ 晶体, SF 为空间滤波器, LH 为 Nd:YAG 激光模块, TFP 为薄膜偏振片, QWP 为四分之一波片, M 为光学镜片。

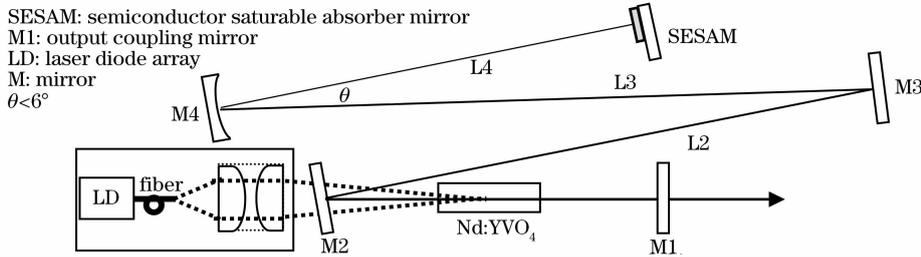


图1 振荡器腔形结构

Fig. 1 Schematic of oscillator

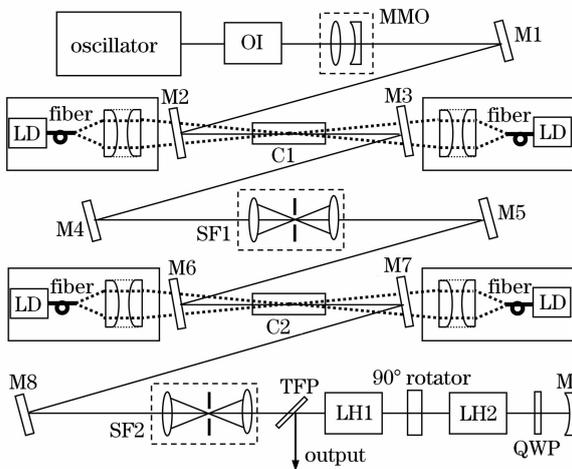


图2 高功率皮秒激光器光路设计图

Fig. 2 Schematic of the high-power picosecond laser system

为保证振荡器输出的皮秒激光得到迅速放大, 采用两级双端面抽运 Nd:YVO₄ 放大器。这两级放大器的抽运源选用 Limo 公司生产的光纤耦合半导体激光器。其光纤数值孔径 0.22, 芯径大小 400 μm, 抽运源波长 808 nm。半导体激光器采用水冷方式冷却, 水温控制在 25 °C, 控制精度为 0.1 °C。振荡器和前两级放大器的 Nd:YVO₄ 激光晶体放于自行设计的水冷套中进行冷却, 冷却水的温度设定在 18 °C, 控制精度为 0.1 °C。为了获得比较高的光束质量和实现光束模式匹配, 我们在放大器间加入了空间滤波器。

为获得高功率激光输出, 最后一级放大器使用了侧面抽运的 Nd:YAG 激光模块, 其结构如图 3 所示。

3 个约 1 cm 长的 20 W 巴条沿慢轴方向构成一个 LD 阵列, 3 个 LD 阵列均匀分布在直径 3 mm, 长 63 mm, 掺杂浓度 0.6% 的 Nd:YAG 激光棒周围。LD 的抽运光没有使用透镜而直接耦合进激光棒。为了提高提取效率, 使用两个激光模块采用双棒串接双程放大方式。在注入之前将种子光进行扩束准直, 使之变为大小合适的近平行光。然后入射到薄膜偏振片 (TFP) 上, 接着水平偏振光进入第一个激光模块进行放大, 然后再经过一个材料为石英的 90° 旋光片, 使得偏振光偏振方向变成与最初垂直, 这样利于热致双折射补偿^[11,12]。经过第二个激光模块之后, 激光在通过一个 1/4 波片后被变成 45° 圆偏光, 然后经 1064 nm 凹面反射镜返回。这里使用凹面镜是将激光模块热透镜效应导致的会聚光束变成近平行光, 保证返回的激光再进入激光模块时模式匹配。经凹面镜反射后的光束再次经过 1/4 波片, 变为水平偏振, 入射到第二个

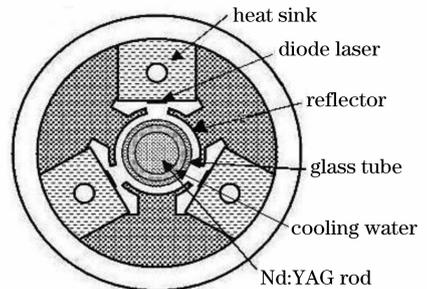


图3 侧抽运 Nd:YAG 激光模块结构图

Fig. 3 Schematic of the laser diode-side-pumped Nd:YAG laser head

激光模块中进行第二程放大;当第二次次经过 90° 旋光片之后,激光的偏振方向变为垂直偏振,最后经过第一个激光模块放大后由 TFP 检偏输出。在输入功率密度不是很大的情况下,双程放大有利于提取更多的功率,从而提高激光器效率。

3 实验结果和讨论

将振荡器 3.1 W 激光注入 Nd:YVO₄ 放大器第一级,在抽运光功率 40 W 时得到 15.6 W 激光输出,提取功率 12.5 W,效率 31.3%。第一级放大器输出的 15.6 W 激光经过空间滤波器后降为 14.4 W,注入 Nd:YVO₄ 放大器第二级放大,抽运光功率 40 W 得到 27.1 W 输出,提取功率 12.7 W,效率 31.8%。前两级放大器输出的 27.1 W 激光经过空间滤波器后减小为 24.2 W,注入随后的 Nd:YAG 激光模块放大器,得到最高 43.4 W 的皮秒激光输出,这一级放大器的输出特性如图 4 所示。

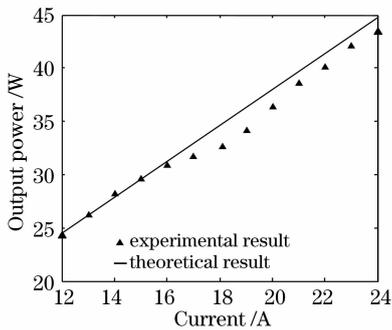


图 4 理论计算和实验测量输出功率随激光模块驱动电流的变化

Fig. 4 Theoretical and experimental output power versus input current of laser head

通过增加抽运密度可以获得更高的增益和更大的提取效率。但是,抽运密度过大带来的严重热问题将导致光束质量下降、晶体和晶体表面膜层损伤等一系列不利影响。并且,当抽运密度很大的情况下,晶体内部放大的受激发射(ASE)将显著增加^[12],也将严重限制放大器效率的进一步提高。我们测得在激光最大功率输出时光束质量因子 $M^2 < 1.7$,相对振荡器输出的光束而言,光束质量已有所下降。在图 4 中我们还用实线给出了理论计算得出的激光输出功率。在抽运功率较小时,理论计算值和实验测量结果吻合很好。但在抽运功率较大时,实验测量结果明显小于理论计算值。我们认为这主要是由于 ASE 所导致。

4 结 论

实验研制了输出平均功率 43.4 W 的高功率高光束质量皮秒激光器。这一系统采用 Nd:YVO₄ 作为振荡器和前两级放大器激光晶体,采用 Nd:YAG 作为后一级放大器晶体,充分利用了这两种激光晶体的各自优点。这一方法为获得高功率高光束质量的皮秒激光提供了一种有效途径,在一定程度上可以满足一些实际应用的需要。高功率高光束质量激光一直是激光技术最关心的问题,在保证光束质量的情况下如何进一步提高功率仍然是值得深入研究的内容。

参 考 文 献

- R. Fluck, G. Zhang, U. Keller *et al.*. Diode pumped passively mode-locked 1.3 μm Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers using semiconductor saturable absorbers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17): 1378~1380
- J. P. D. Michael, J. W. Kurt. Picosecond diode-pumped laser system with 9.3-W average power and 2.3-mJ pulse energy[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3042~3045
- E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner *et al.*. 60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 367~369
- Chen Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 646~648
陈 檬,张丙元,李 港 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 646~648
- P. K. Mukhopadhyay, M. B. Alsous, K. Ranganathan *et al.*. Characterization of laser-diode end-pumped intracavity frequency doubled, passively Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(2): 157~162
- T. Wang, H. Fujita, A. Mitra *et al.*. High power amplification of solid-state Nd:YAG laser with short pulses of 300 ps/5 kHz [J]. *CLEO/QELS Conference*, 2005, CTuI2
- L. Guo, W. Hou, H. B. Zhang *et al.*. Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd:YAG laser with a semiconductor saturable mirror [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4085~4089
- J. Y. Peng, J. G. Miao, Y. G. Wang *et al.*. High-average-power and high-conversion-efficiency continuous wave mode-locked Nd:YVO₄ laser with a semiconductor absorber mirror[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1135~1139
- Wang Jiaxian, Guo Xiangqun, Li Liwei *et al.*. Passive mode-locking in Nd:YAG laser using nanocrystalline silicon embedded in SiN_x film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1498~1501
王加贤,郭亨群,李立卫 等. Si 镶嵌 SiN_x 薄膜实现 Nd:YAG 激光器被动锁模[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1498~1501
- Li Xiao, Xu Xiaojun. Passively mode-locked side-pumped Nd:YAG laser with semiconductor saturable absorption mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 25~28
李 霄,许晓军. 用半导体可饱和吸收镜实现侧面抽运 Nd:YAG 被动锁模固体激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 25~28
- W. C. Scott, M. Dewit. Birefringence compensation and TEM₀₀ mode enhancement in a Nd:YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **18**(1): 3~4
- W. Koehner. *Solid State Lasers Engineering*[M]. New York: Springer Press, 2003