

文章编号: 0258-7025(2005)07-0878-03

# 激光二极管抽运的克尔透镜锁模 Yb:YAG 激光器

于海娟<sup>1</sup>, 李 港<sup>1</sup>, 陈 檬<sup>1</sup>, 张志刚<sup>1,2</sup>, 任 峰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022; <sup>2</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

**摘要** 为了实现激光二极管抽运的 Yb:YAG 晶体克尔透镜锁模运转, 采用波长在 930 nm 的激光二极管单向抽运 Yb:YAG 晶体, 利用五镜谐振腔, 在腔内没有插入硬光阑的情况下, 实现了 Yb:YAG 晶体的稳定克尔透镜锁模运转, 得到输出功率为 20 mW 的稳定锁模脉冲, 其中心波长在 1038 nm, 重复频率为 94 MHz, 谱线半宽度大于 9 nm, 理论上可以支持 124 fs 的锁模脉冲。

**关键词** 激光技术; Yb:YAG 晶体; 连续克尔透镜锁模; 激光二极管抽运; 五镜谐振腔; 光谱展宽

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## Diode End-Pumped Kerr-Lens Mode-Locked Yb:YAG Laser

YU Hai-juan<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, CHEN Meng<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-gang<sup>1,2</sup>, REN Feng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)  
(<sup>2</sup> Ultrafast Laser Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A diode end-pumped Kerr-lens mode-locking in Yb:YAG is got without using saturable absorber and hard diaphragm inside the cavity, instead five-mirror cavity is used. The mode-locking's power is 20 mW, and the wavelength centers at 1038 nm, the repetition is 94 MHz, and full width at half maximum of spectrum bandwidth is larger than 9 nm (FWHM), corresponding to a transform limited pulse width of <124 fs.

**Key words** laser technique; Yb:YAG crystal; Kerr-lens mode-locking; laser diode pumping; five-mirror cavity; spectrum broadening

## 1 引 言

随着 InGaAs 半导体激光器技术的日益成熟和吸收波段在 0.9~1.1  $\mu\text{m}$ , 具有宽的荧光谱线并能够支持飞秒脉冲的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光材料研究的不断发展, 激光二极管(LD)直接抽运掺 Yb<sup>3+</sup> 晶体的飞秒激光器越来越受到人们的关注。其中 Yb:YAG 晶体具有不可比拟的优势, 其优异的导热性能(11 W/mK<sup>-1</sup>)、高原子数分数掺杂(最高可达 30%)和成熟的生长工艺成为应用最广泛的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光晶体<sup>[1~4]</sup>。它在理论上可以支持小于 100 fs 的脉冲输出<sup>[5]</sup>, 并且具有高功率输出的潜力, 国际上对 Yb:YAG 晶体进行了大量的锁模脉冲输出实验研

究<sup>[6~8]</sup>, 目前可以测得的最窄脉冲宽度为 340 fs。在国内, 天津大学利用半导体饱和吸收镜进行了 Yb:YAG 晶体被动锁模的实验研究<sup>[9]</sup>。

用激光二极管直接抽运实现克尔透镜锁模难度很大。原因在于, 克尔透镜锁模时抽运光在晶体内部形成软光阑, 到达晶体内部的光斑小, 焦深长。而激光二极管输出光发散角很大, 所以需要抽运光严格整形。值得注意的是, 植村禎夫等<sup>[10]</sup>采用传统四镜谐振腔内插入硬光阑的方法实现了克尔透镜锁模。本文采用五镜腔, 在激光二极管直接抽运的条件下在 Yb:YAG 激光器中获得了克尔透镜锁模脉冲序列。我们认为五镜腔可能更有利于克尔透镜锁模的启动而且不需要用硬光阑。

收稿日期: 2004-09-07; 收到修改稿日期: 2004-12-08

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(Grant: 3021001)资助项目。

作者简介: 于海娟(1977—), 女, 山东省潍坊市人, 北京工业大学激光工程研究院博士研究生, 主要从事超短脉冲激光技术的研究。E-mail: haijuanyu@emails.bjut.edu.cn

## 2 实验装置

图 1 是激光二极管抽运 Yb:YAG 晶体克尔透镜锁模实验装置图。采用五镜谐振腔结构。Yb:YAG 晶体以布儒斯特角切割,晶体通光方向的长度为 3 mm,掺杂原子数分数为 10%。 $M_1$  和  $M_2$  是镀有对抽运光高透和对振荡光高反双色膜的凹面反射镜,其曲率半径分别为  $R_1=R_2=75$  mm。 $M_3$  是凹面全反镜,曲率半径  $R_3=50$  mm。 $M_4$  是 2% 耦合输出镜。 $M'_4$  和  $M_5$  是全反镜。 $P_1$  和  $P_2$  是布儒斯特角切割的重火石玻璃(ZF4)棱镜对,棱镜对间隔为 275 mm,对于中心波长 1038 nm,此时引入的二阶色散量和三阶色散量分别为  $-3028$  fs<sup>2</sup> 和  $-11000$  fs<sup>3</sup>,腔内晶体和棱镜对共同引入的二阶和三阶色散量分别为  $2989$  fs<sup>2</sup> 和  $8023$  fs<sup>3</sup>。总腔长为 160 cm,像散补偿角半角为  $8^\circ$ 。激光二极管是抽运源,波长为 930 nm,发光截面为  $1\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ ,最大输出功率为 3 W。抽运光经过整形系统,近似变为平行光,然后经过焦距为 45 mm 的会聚透镜  $L$  将抽运光聚焦到晶体上,到达晶体内部光斑尺寸约为  $50\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 。

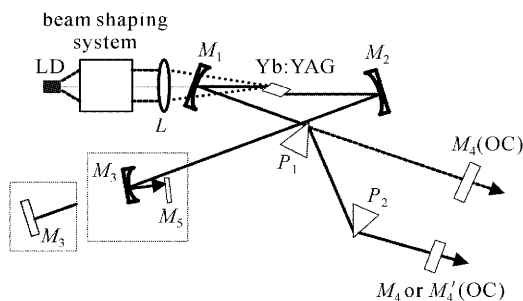


图1 Yb:YAG 晶体克尔透镜锁模腔型

Fig. 1 Schematic of the LD-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YAG laser

## 3 实验结果

### 3.1 连续光运转

为了比较,首先采用四镜 X 型谐振腔。在连续光运转时的阈值电流为 1.6 A,相当于抽运光功率 900 mW。加到最大电流 4.5 A,抽运光功率为 3 W,晶体吸收的功率为 2.5 W,采用 2% 耦合输出镜,最高可以得到连续光输出功率为 160 mW。图 2 给出了连续光运转时输出光功率随抽运电流的变化关系,图 3 是连续光输出时的光谱图。

### 3.2 调 Q 锁模运转

在四镜谐振腔中,连续光运转时调节谐振腔,用

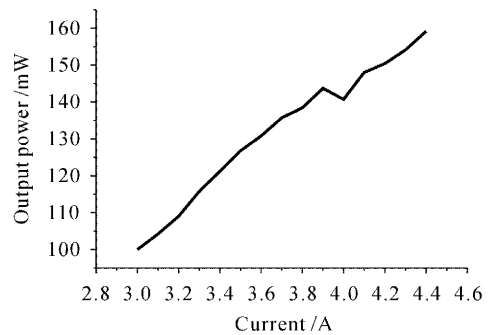


图 2 连续光输出功率随抽运光电流的变化关系

Fig. 2 Continuous output power as a function of current of the pump laser

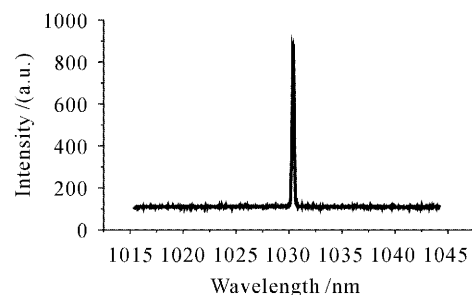


图 3 连续光输出光谱

Fig. 3 Spectrum of continuous operation

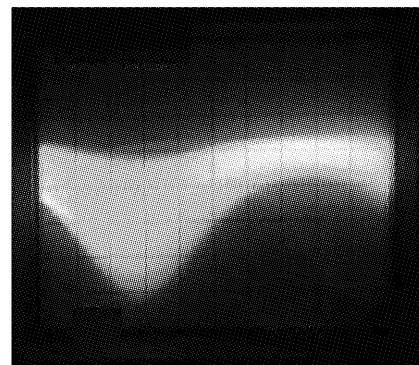


图 4 自调 Q 锁模运转时锁模脉冲情况

Fig. 4 Self-Q-switch mode-locking picture

示波器观察锁模情况,输出波形抖动很厉害,并且有调 Q 包络。从光谱仪观测输出光的光谱情况,发现输出光波长在 1031 nm 附近,并且调节腔参量的过程中没有明显的光谱展宽。

为了增加腔的稳定性,换成五镜腔,将  $M_3$  换成凹面镜, $M_5$  作为全反镜放到  $M_3$  的焦点附近,微调  $M_5$  的前后位置,锁模波形比原来稳定,仍然有明显的调 Q 包络,如图 4 所示。观察光谱情况,如图 5 所示,并没有明显展宽,这说明激光器没有完全实现连续克尔透镜锁模。由于 Yb:YAG 晶体具有长的上能级寿命(1.3 ms 左右),所以容易出现自调 Q 现

象,腔内振荡功率不足以达到连续克尔透镜锁模阈值,所以不能实现连续克尔透镜锁模。

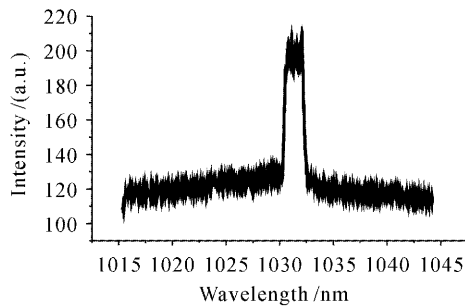


图 5 自调 Q 锁模运转时的输出光谱

Fig. 5 Spectrum of self-Q-switched mode-locking

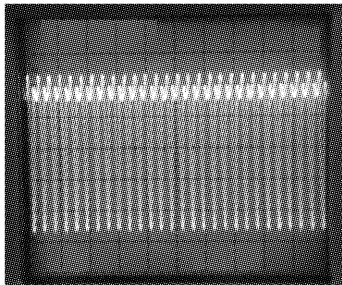


图 6 连续锁模时的光脉冲

Fig. 6 Mode-locked pulse train in different time scales

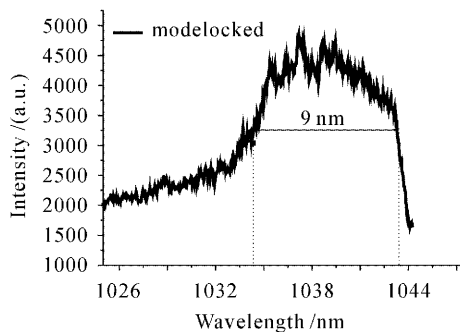


图 7 连续锁模时的光谱

Fig. 7 Pulse spectrum of the mode locked Yb:YAG laser

### 3.3 克尔透镜锁模运转

为了消除调 Q 包络,实现连续克尔透镜锁模运转,考虑增加腔内振荡光功率,将 2% 的耦合输出镜换成全反镜。微调  $M_2$ ,得到了克尔透镜锁模,如图 6 所示。

此时,光谱仪上的光谱突然变宽,如图 7 所示,半峰全宽(FWHM)为 9 nm(受光谱仪探测波长的限制,实际光谱宽度应大于 9 nm)。此时插入棱镜对,如果棱镜对完全补偿腔内的正色散,得到理想的双曲正割脉冲,可以得到 124 fs 最窄脉宽。优化耦合输出镜,经实验验证,采用 1% 耦合输出镜时,输

出功率最大。此时得到稳定锁模脉冲输出功率为 20 mW,稳定锁模脉冲序列如图 6 所示。此时腔长为 160 cm,脉冲重复频率为 94 MHz。

## 4 结 论

利用最大输出功率 3 W,930 nm 激光二极管作为抽运源,利用五镜腔在腔内没有插入硬光阑和被动锁模器件的情况下实现了 Yb:YAG 激光器的克尔透镜锁模运转。得到功率为 20 mW 的稳定锁模脉冲输出,脉冲中心波长为 1038 nm,重复频率为 94 MHz,脉冲的半峰全宽大于 9 nm,可以支持 124 fs 的脉冲宽度。

致谢 感谢天津大学精密仪器与光电子工程学院王清月教授和居桂方、薛迎红同学在实验中给予的指导和帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Yin Hongbing, Deng Peizhen, Zhang Junzhou *et al.*. Spectroscopy and laser performance of Yb<sup>3+</sup> doped YAG crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(2): 132~135  
尹红兵,邓佩珍,张俊洲等. Yb:YAG 晶体的制备与光谱特性 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(2): 132~135
- 2 Xu Xiaodong, Zhao Zhiwei, Song Pingxin *et al.*. Growth of high doping Yb:YAG crystal and its spectral performance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 955~958  
徐晓东,赵志伟,宋平新等. 高掺杂浓度 Yb:YAG 晶体的生长及光谱性能 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 955~958
- 3 Zhang Lizhe, Dai Jianming, Zhang Weili *et al.*. All solid state tunable Yb:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 873~876  
张丽哲,戴建明,张伟力等. 全固化可调谐 Yb:YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 873~876
- 4 Tian Zhaoshuo, Chen Weibiao, Hu Qiquan. Study on diode laser end-pumped Yb:YAG rod laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 48~51  
田兆硕,陈卫标,胡企铨. 激光二极管端面抽运的棒状 Yb:YAG 激光器 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 48~51
- 5 U. Brauch, A. Giessen, M. Karszewski *et al.*. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 713~715
- 6 C. Honninger, R. Paschotta, M. Graf *et al.*. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**:3~17
- 7 F. Brunner, R. Paschotta, J. Aus der Au *et al.*. Widely tunable pulse durations from a passively mode-locked thin-disk Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 379~381
- 8 E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner *et al.*. 60 W average power in picosecond pulses from a passively mode-locked Yb:YAG thin-disk laser [C]. *CLEO*, 2002. 152~153
- 9 Guifang Ju, Lu Chai, Qingyue Wang *et al.*. Stable mode-locking in an Yb:YAG laser with a fast SESAM [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 695~696
- 10 Taisuke Miura, Katsuyuki Kobayashi, Zhigang Zhang *et al.*. Stable mode-locking operation in a Cr:forsterite laser with a five-mirror cavity [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(8): 554~556