

# 用半导体可饱和吸收镜进行 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器被动锁模研究\*

于海娟<sup>1</sup> 李 港<sup>1</sup> 陈 檬<sup>1</sup> 居桂方<sup>2</sup> 王勇刚<sup>2,3</sup> 张志刚<sup>2</sup>

(1 北京工业大学激光工程研究院,北京 100022)

(2 天津大学精仪学院,天津 300072)

(3 中国科学院半导体研究所,北京 100081)

**摘 要** 采用不同的半导体可饱和吸收镜,实现了 940 nm 半导体直接泵浦 Yb:YAG 激光器被动锁模,得到了输出中心波长分别在 1030 nm 和 1050 nm,光谱半宽(FWHM)分别为 1 nm 和 2 nm 的稳定锁模脉冲序列,其重复频率分别为 190.24 MHz 和 178.6 MHz. 泵浦光为 4W 时,两种波长的平均输出功率分别为 80 mW 和 60 mW.

**关键词** 半导体泵浦;被动锁模;半导体可饱和吸收镜(SESAM);布喇格反射谱

中图分类号 TN243 文献标识码 A

## 0 引言

随着 InGaAs 激光二极管技术的日益成熟,吸收波段在 0.9 ~ 1.1  $\mu\text{m}$  的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光材料研究的不断发展,LD 直接泵浦的全固化激光器成为发展趋势. 目前,国内外对掺 Yb<sup>3+</sup> + 激光材料进行了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>,Yb<sup>3+</sup> 离子由于其 4f<sup>13</sup> 电子具有大的自旋-轨道耦合系数导致较强的声子耦合,从而有宽的荧光宽度可以支持飞秒锁模激光的输出. 其中, Yb:YAG 由于其优异的导热性能(11 W/mK<sup>-1</sup>)、高浓度掺杂(最高可达 30%)和其成熟的生长工艺成为应用最广泛的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光晶体,在理论上可以支持 200 fs 的脉冲输出<sup>[5]</sup>,国际上对 Yb:YAG 的连续光输出和锁模脉冲输出进行了大量实验<sup>[6,7]</sup>. 本文用激光二极管直接泵浦 Yb:YAG 晶体,研究其连续光输出和被动锁模特性,并且采用不同的半导体饱和吸收体,得到了 1030 nm 和 1050 nm 两个波长的稳定锁模脉冲.

## 1 Yb:YAG 晶体的光谱特性

Yb:YAG 晶体中强晶场作用导致了 Yb<sup>3+</sup> 离子的斯塔克能级分裂,基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>分别分裂为四个和三个能级(如图 1),形成了准三能级激光系统,激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>最低子能级 10327 cm<sup>-1</sup>和基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>的 612 cm<sup>-1</sup>子能级间的激光波长为 1030 nm,激发态 10327 cm<sup>-1</sup>和基态 785 cm<sup>-1</sup>能级间的激光波长为 1048 nm. Yb:YAG 的吸收和发射谱线如图 2.

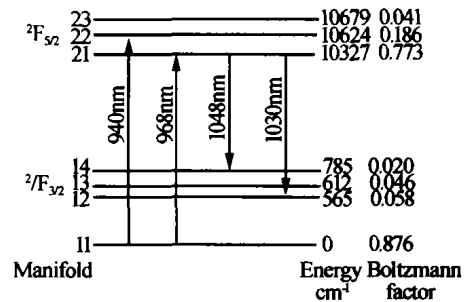


图 1 Yb:YAG 晶体中 Yb<sup>3+</sup> 离子能级分裂图  
Fig. 1 Energy level diagram of Yb<sup>3+</sup> ion in YAG crystal

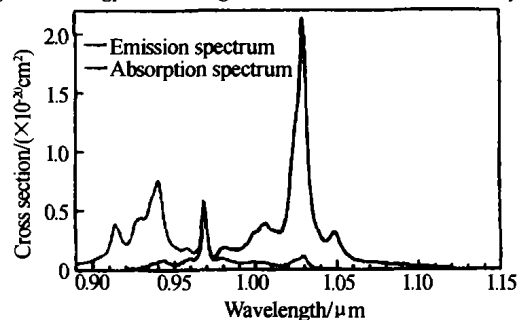


图 2 Yb:YAG 吸收和发射截面谱图  
Fig. 2 Yb:YAG absorption cross section and emission cross section

## 2 实验装置

实验中 LD 泵浦源输出功率为 4 W,选用从上海光机所购买的 Yb:YAG 晶体,晶体尺寸 3 mm × 3 mm × 3 mm,掺杂浓度为 10%,布儒斯特角切割. 采用 X 型折叠腔,如图 3,焦距 f 是为 45 mm 的聚焦透镜,折叠镜 M<sub>1</sub>M<sub>2</sub> 是双月形透镜,双月形透镜可以有效减小对泵浦光的发散度,M<sub>3</sub>为曲率半径 R = 30 mm 全反镜. 完全象散补偿时腔参数如下: L<sub>21</sub> = L<sub>22</sub> = 39 mm,两臂长度 L<sub>1</sub> = L<sub>3</sub> = 400 mm,此时子午面和弧矢面的光斑大小分别为:  $\omega_1 = 57.6 \mu\text{m}$ ,  $\omega_s = 58.4 \mu\text{m}$ . 折叠角为 6.8°.

\*北京市自然科学基金资助重点项目(No. 3021001)  
Tel:010-67396553 Email: haijuanyu@emails.bjut.edu.cn  
收稿日期:2004-04-16

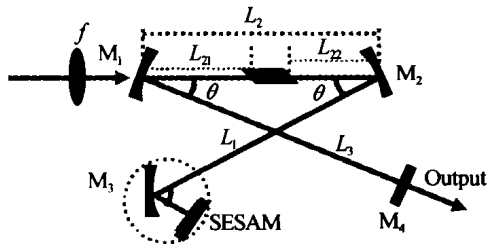


图 3 X 型折叠腔  
Fig. 3 Linear X shape folded

在最佳腔参数下,分别采用透射率为 0.2%, 1% 和 2% 的耦合输出镜进行连续运转实验,比较三者的功率输出,如图 4. 从图 4 中可以看出,1% 的耦合输出镜有最高斜效率.

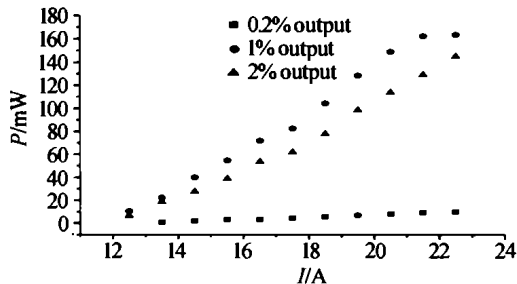


图 4 输出功率随电流变化图  
Fig. 4 Output power change according with current

此外,用于被动锁模的半导体饱和吸收镜 SESAM 1#和 SESAM 2#由中国科学院半导体所提供,

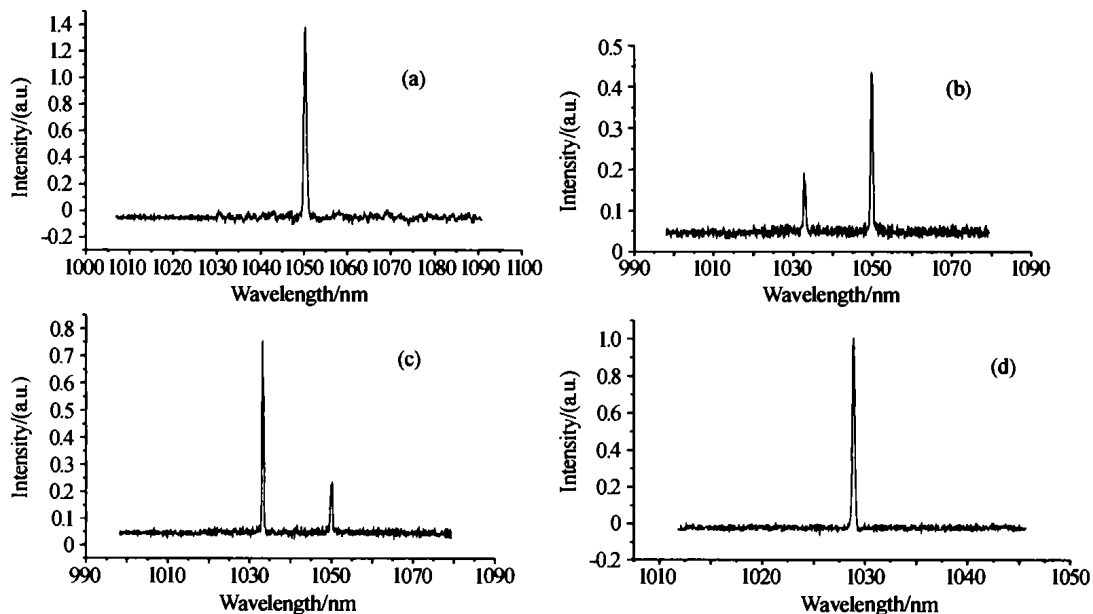


图 5 CW 输出时光谱随泵浦光功率变化  
Fig. 5 Diode pump Yb:YAG CW spectrum changing according with the pump light power

激光输出,如图 5(c),(d).

### 3.2 1030 nm 波长被动锁模脉冲输出

插入 SESAM1#, 没有锁模时,观察到输出光谱在 1030 nm 和 1050 nm 之间抖动,两个波长之间并没有其他波长光的存在. 但是稳定锁模时观察到只

且设计是相同的.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 连续光输出

实验发现,连续运转时输出波长并不是固定的,而是随着泵浦光功率发生变化. 图 5 表明当泵浦光功率从 1 W 变化到 4 W 时,激光输出波长从 1050 nm 逐渐过渡到 1030 nm. 就是说,弱泵浦时 1050 nm 波长在模式竞争中处于优势地位,而强泵浦时 1030 nm 波长在竞争中处于优势地位. 原因在于,图 2 中, Yb:YAG 的发射谱中心波长位于 1030 nm 处,但由于吸收谱在该波长处与发射谱有重叠,存在自吸收效应,低泵浦功率时,自吸收效应影响明显,并不容易形成该波长的激光振荡. 尽管 1050 nm 波长处发射截面明显小于 1030 nm,但是这个波长几乎不存在自吸收效应,所以低功率泵浦时 1050 nm 波长更容易形成激光振荡,如图 5(a),(b). 随着泵浦光功率不断增加,1030 nm 波长处增益变大,相比较而言自吸收效应影响变弱,所以增加泵浦光功率,具有大发射截面的 1030 nm 波长激光形成振荡而抑制了 1050 nm 波长的激光输出,最后得到 1030 nm 波长

有 1030 nm 光的输出,图 6 中给出连续运转同稳定锁模时的光谱对比. 此时泵浦光功率 4 W,锁模平均输出功率为 80 mW,脉冲重复频率为 178.6 MHz,用示波器监测的锁模状态如图 7,时间间隔分别为 5 μs 和 5 ns.

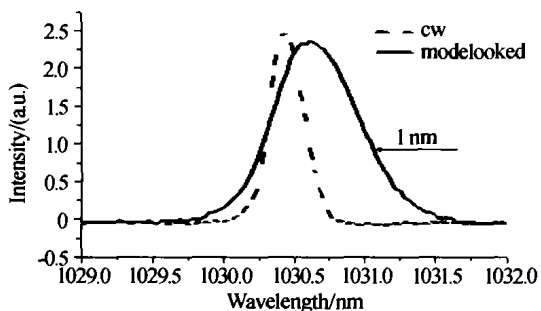


图6 1030 nm 波长处 CW 输出和稳定锁模时的光谱图  
Fig. 6 CW spectrum and mode-locked spectrum at 1030 nm

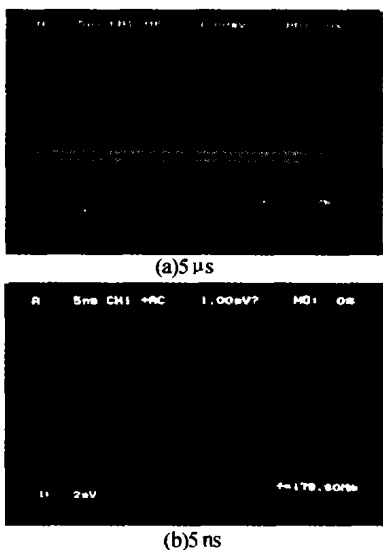


图7 波长在 1030 nm 处的稳定锁模图  
Fig. 7 Mode-locked pictures at 1030 nm

3.3 1050 nm 波长被动锁模脉冲输出

用 SESAM2# 替换 SESAM1#, 调节至稳定锁模状态, 用光谱仪观察其光谱情况, 发现用 SESAM2# 稳定锁模时波长在 1050 nm 处, 连续运转同稳定锁模时的光谱比较如图 8. 图 9 给出锁模状态图, 稳定锁模时重复频率为 190.24 MHz, 平均输出功率为 60 mW.

也就是说, 实验中泵浦光功率为 4 W 时, 采用同样的谐振腔, 分别得到两种波长的稳定锁模脉冲. 我们认为, 由于插入的两片 SESAM 在实际生长的过程中, 其布喇格反射谱偏离中心波长, SESAM1# 反射谱偏向于短波长, 而 SESAM2# 反谱偏向于长波长, 所以实验中采用不同的 SESAM 时, 可以分别得到 1030 nm 和 1050 nm 两种波长的锁模脉冲.

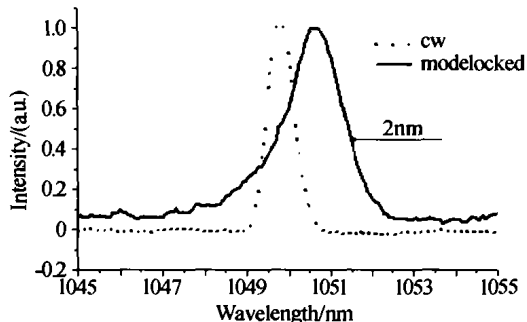


图8 1050 nm 波长处 CW 输出和稳定锁模时的光谱图  
图8 CW spectrum and mode-locked spectrum at 1050 nm

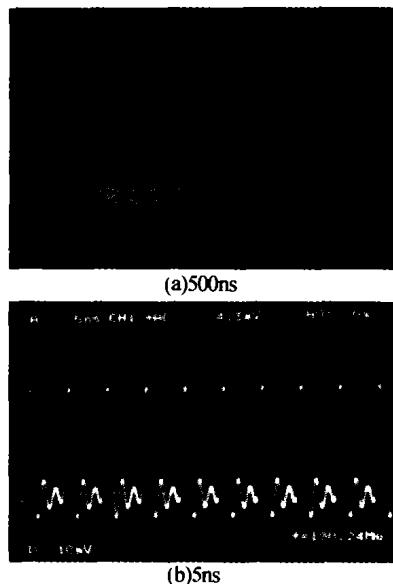


图9 波长 1050 nm 处的稳定锁模图  
Fig. 9 Mode-locked pictures at 1050 nm

此外, 在实验过程中我们还可以看到调 Q 现象, 这是因为 Yb:YAG 具有长的上能级寿命 (1.3 ms 左右), 容易实现自调 Q, 相关文献中已有报道<sup>[8,9]</sup>, 此处不再赘述.

4 结论

在 LD 直接泵浦 Yb:YAG 激光器中, 由于在 1030 nm 波长处存在自吸收效应的影响, 而 1050 nm 波长处几乎不存在自吸收效应, 所以泵浦功率增加的过程中, 出现了 1050 nm 和 1030 nm 两个波长的竞争. 利用 SESAM 锁模时, 由于实际生长过程中两片 SESAM 布喇格反射谱的偏移, 我们分别得到 1030 nm 和 1050 nm 两个波长稳定锁模激光输出, 输出功率分别为 80 mW 和 60 mW, 重复频率为 178.6 MHz 和 190.24 MHz.

参考文献

- 1 杨鸿儒, 左铁川. 全固体小型 Yb:YAG 激光器热效应及输出特性研究. 光子学报, 2003, 32(8): 907-910  
Yang H R, Zuo T C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 907-910
- 2 徐晓东, 赵志伟, 宋平新, 等. Yb:YAG 晶体的晶胞参量及 Yb<sup>3+</sup> 分凝系数的研究. 光子学报, 2004, 33(5): 567-569  
Xu X D, Zhao Z W, Song P X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 567-569
- 3 徐晓东, 赵志伟, 宋平新, 等. Yb:YAG 晶体的荧光特性研究. 光子学报, 2004, 33(6): 697-699  
Xu X D, Zhao Z W, Song P X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6): 697-699
- 4 柳强, 巩马理, 闫平, 等. LD 泵浦 Yb:YAG 激光器最新进展. 激光与红外, 2002, 32(11): 3-6  
Liu Q, Gong M L, Yan P, et al. *Laser and Infrared*, 2002, 32(11): 3-6

- 5 Brauch U, Giessen A, Karszewski M, *et al.* Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 nm and 1053 nm. *Opt Lett*, 1995, **27**(7): 713 ~ 715
- 6 Sudmeyer T, Brunner F, Haring R, *et al.* 60 W average power in picosecond pulses from a passively mode-locked Yb:YAG thin-disk laser, Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest, 2002, 152 ~ 153
- 7 Taira T, Tulloch M W, Byer L R. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of CW Yb:YAG lasers. *J Appl Opt*, 1997, **36**(9): 1867 ~ 1874
- 8 Keller U, Weingarten K J, Kartner F X, *et al.* Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SSAM'S) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *IEEE J Quantum Electron*, Sep. 2, 435, 1996
- 9 Ju Guifang, Chai Lu, Wang Qingyue. Stable Modelocking in an Yb:YAG Laser with a Fast SESAM. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(12): 695 ~ 696

## LD Pumped Yb:YAG Mode-locked Laser with SESAM

Li Gang<sup>1</sup>, Chen Meng<sup>1</sup>, Ju Guifang<sup>2</sup>, Wang Yonggang<sup>2,3</sup>, Zhang Zhigang<sup>2</sup>

1 College of Laser Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100022

2 College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering Tianjin University, Tianjin 30072

3 Institute of Semiconductors. CAS, Beijing 100081

Received date: 2004-04-16

**Abstract** In the 940 nm LD pumped Yb:YAG laser, the stable mode-locked trains wavelength at 1030 nm and 1050 nm is obtained by use of two pieces SESAM. The spectrum FWHM are 1 nm and 2 nm. The repetition rates are 190.24 MHz and 178.6 MHz. The average power of output is 80 mW and 60 mW when the pump power is 4W.

**Keywords** LD pumped, Passive mode-locked, Semiconductor saturable absorb mirror (SESAM), Bragg reflective spectrum



**Yu Haijuan** received the bachelor's degree of Yantai Normal University in 2000. From 2000 to 2002 as a master student she studied in the Beijing University of Technology. From 2002 to now, she is doing research in Beijing University of Technology as a doctor student. The major is femtosecond laser technology.