

文章编号: 0258-7025(2001)10-0873-04

# 全固化可调谐 Yb:YAG 激光器\*

张丽哲 戴建明 张伟力 路鑫超 王 勇 赵江山 柴 路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部 光电信息技术科学重点实验室 天津 300072)

邓佩珍 陈 伟

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 实现了半导体激光器抽运的全固化 Yb:YAG 激光器的可调谐运转,当吸收抽运功率为 900 mW 时,在中心波长 1049.5 nm 处得到 66 mW 的连续激光输出。采用 1% 的输出耦合镜时单侧抽运阈值为 410 mW,双侧抽运阈值为 380 mW,斜率效率为 12.7%。对该激光器的可调谐特性进行了详细的研究,得到 1030.5 ~ 1055.5 nm 范围内的连续可调谐。同时得到自调 Q 脉冲序列。

**关键词** 半导体激光器,全固化 Yb:YAG 激光器,可调谐

**中图分类号** TN 248.1+3 **文献标识码** A

## All-solid-state Tunable Yb:YAG Laser

ZHANG Li-zhe DAI Jian-ming ZHANG Wei-li LU Xin-chao

WANG Yong ZHAO Jiang-shan CHAI Lu WANG Qing-yue

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, EMC, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

DENG Pei-zhen CHEN Wei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** An all-solid-state, tunable Yb:YAG laser pumped by two laser diodes was realized. A CW output of 66mW at 1049.5 nm was obtained with an absorbed pump power of 900 mW. The slope efficiency was 12.7% with output coupling of 1%, and the threshold was 410 mW. The tunability of the laser was studied in detail, and a tuning range from 1030.5 nm to 1055.5 nm was achieved. Self-Q switched pulse train was observed.

**Key words** laser diode, all-solid-state, Yb:YAG laser, tunability

## 1 引 言

随着 InGaAs 半导体激光器的发展日益成熟,对吸收峰位于这一波段(0.9 ~ 1.1  $\mu\text{m}$ )的掺 Yb<sup>3+</sup> 激光材料的研究也不断发展起来。目前,国内外对掺 Yb<sup>3+</sup> 激光介质已进行了广泛研究<sup>[1-7]</sup>。

Yb:YAG 晶体具有量子缺陷小、吸收带和发射带

较宽、热力学性能好等优良特性,成为掺 Yb<sup>3+</sup> 材料中的佼佼者。尤其是 Yb<sup>3+</sup> 电子构型十分简单,为准三能级的激光运转机制,在激光上能级之上不存在其他的激发能级,理论上不存在激发态吸收、上转换、浓度淬灭等有害过程,可进行高浓度掺杂,从而提高了激光的效率。

## 2 Yb:YAG 晶体的光谱特性

Yb<sup>3+</sup> 离子的电子构型为 4f<sup>13</sup>,如图 1 所示,仅有两个电子态——基态<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和激发态<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>,在激光上能级之上不存在更高的激发能级。在晶场作用下,能级发生分裂,激光过程发生在上、下能级的子能级之间,

\* 高等学校优秀青年教师教学与科研奖励基金、天津市光电子联合研究中心基金、国家自然科学基金(69978016, 6998806)惯性约束聚变青年科学基金(98-03)和国家重点基础研究项目特别基金(G1999075201-2)资助项目。

收稿日期 2000-07-06;收到修改稿日期 2000-10-20

形成准三能级的激光运行机制<sup>[1]</sup>。

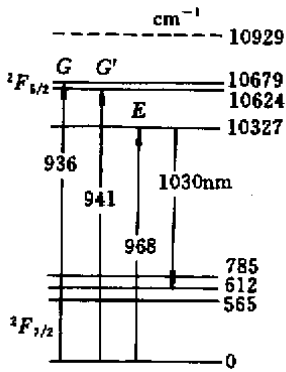


图 1 Yb<sup>3+</sup> 的能级结构

Fig. 1 Energy level structure of Yb<sup>3+</sup>

从图 2 中可以看到, Yb:YAG 的主吸收峰有两个, 中心波长分别位于 941 nm 和 970 nm。941 nm 的波长非常适合用激光二极管抽运, 并且由于该处的吸收带宽达 18 nm, 使得激光二极管不需要复杂的温度控制系统。图 2(b) 中, Yb:YAG 的发射谱中心波长位于 1029 nm 处, 但由于吸收谱和发射谱在该波长处有较大重叠, 存在较严重的自吸收效应, 而在 1050 nm 处, 虽然增益较低, 但自吸收效应也很微弱, 因此更易形成激光输出。由图可见, Yb:YAG 晶体的吸收和发射谱较宽, 这使得激光器的实用化以及宽调谐范围和锁模脉冲的形成成为可能。

本文中, 我们采用相干公司生产的单管半导体激光器(中心波长 942 nm)双向抽运 Yb:YAG 晶体

(厚 3 mm, 掺杂浓度 10%) , 得到连续可调谐的激光输出。

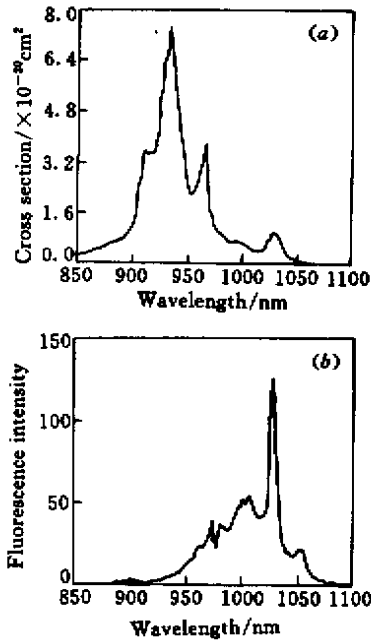


图 2 Yb:YAG 晶体的光谱特性

Fig. 2 Spectral properties of Yb:YAG

### 3 实验

#### 3.1 实验装置

考虑到将要进行的自锁模实验, 采用了传统的四镜 X 型像散补偿腔, 腔结构示意图见图 3。

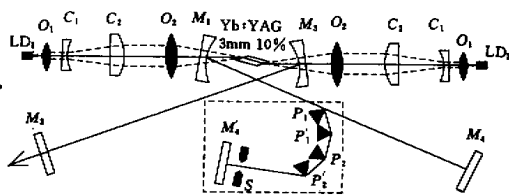


图 3 全固化 Yb:YAG 激光器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of all-solid-state Yb:YAG laser

半导体激光器 LD<sub>1</sub> 和 LD<sub>2</sub> 的输出光束像散非常严重, 需采用光束耦合系统进行整形和准直。如图 3 所示, O<sub>1</sub> 是焦距为 8 mm 的显微物镜, 用来收集半导体激光器的输出光。C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 是两个柱透镜 (f<sub>C1</sub> = -100 mm, f<sub>C2</sub> = 150 mm), 组成倒置的望远镜系统, 在子午面内压缩光束发散角。准直后的抽运光经过焦距为 60

mm 的抽运镜 O<sub>2</sub> 聚焦到 Yb:YAG 晶体上。M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 是两个双色镜, 曲率半径为 75 mm, 对抽运光(940 nm)高透, 对激光(1049.5 nm)高反。M<sub>3</sub> 是输出耦合镜, M<sub>4</sub> 为平面全反镜, 实验中采用了透过率分别为 1% 和 0.25% 的输出镜。所用 Yb:YAG 样品的掺杂浓度为 10%, 晶体通光方向的厚度为 3 mm, 两面均按布儒斯

特角切割,安装在黄铜套中并通以循环水冷却。

### 3.2 实验结果与讨论

当仅用一台半导体激光器抽运时, Yb:YAG 晶体的吸收功率为 450 mW,采用 1% 的输出镜,得到 8 mW 的输出光,阈值为 410 mW。两台半导体激光器同时抽运,总的吸收功率为 900 mW,输出耦合为 1% 时,阈值 380 mW,输出功率 66 mW,斜率效率 12.7%;输出耦合为 0.25% 时阈值 330 mW,输出功率 20 mW,斜率效率为 3.5%。由于实验中所用的光束耦合系统不是为 940 nm 波长设计制作的,因此在该波长处存在较大的损耗,如果进一步优化这些参数,并提高抽运功率,有望进一步提高输出功率和斜率效率。图 4 给出了输出耦合分别为 1% 和 0.25%, 双端抽运时全固化 Yb:YAG 激光器的输出特性曲线。

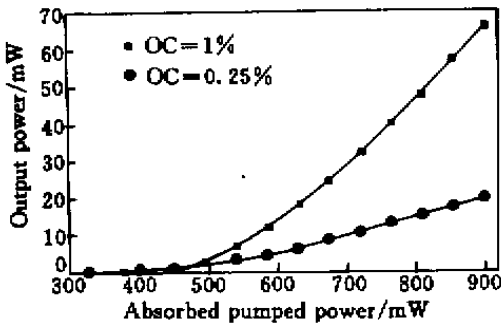


图 4 Yb:YAG 激光器的输出特性曲线

Fig.4 Output properties of Yb:YAG

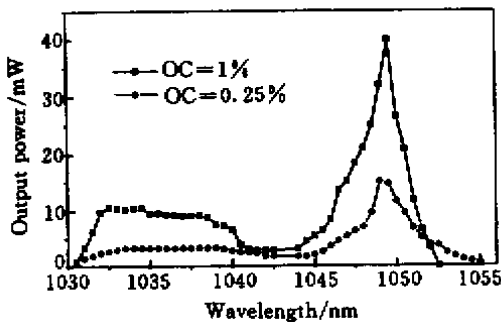


图 5 Yb:YAG 激光器的调谐曲线

Fig.5 Tuning range of Yb:YAG laser

对该激光器的可调谐特性进行了详细的研究。如图 3 中虚框内所示,在平面全反镜  $M_4$  的一臂加入两对双石英棱镜对及全反镜  $M_4'$ ,并在  $M_4'$  的前面插入单边刀口  $S$ ,通过轻微调节  $M_4'$  及平移  $S$  可以实现激光器从 1030.5 nm 到 1055.5 nm 的连续可调谐。图 5 给出

输出耦合分别为 1% 和 0.25% 时的调谐曲线。可以看到,调谐曲线并不平滑,存在着尖峰,这与图 2 所示的 Yb:YAG 的增益曲线是吻合的。实验中所用镜片的镀膜范围为 1030 ~ 1080 nm,限制了调谐范围向短波方向的扩展;同时,所用石英棱镜中心波长为 800 nm,在长波长(1  $\mu\text{m}$  以上)处已严重偏离布儒斯特角,损耗很大,使得调谐范围无法向更长的波长延伸。

实验过程中,在 1034 nm 到 1049 nm 的波长范围内存在着十分严重的模式竞争,不加单边刀口  $S$ ,只调节全反镜  $M_4'$ ,运转波长从 1034 nm 直接跳变到 1049 nm 或二者同时存在的状态,只有加入  $S$  限制其中一个波长的振荡,才能得到连续的调谐。这种现象可以从 Yb:YAG 的增益和吸收曲线得到解释。由图 2 可以看到,虽然 1034 nm 处的增益比 1049 nm 处大得多,但 1034 nm 波长处的吸收也比后者大。因此激光器运转于 1034 nm 时存在较强的自吸收,最终导致两个波长的净增益十分接近,只有强制限制其中一个模式的增益,另一模式才能稳定运转。

与此同时,在对该激光器进行 CW 运转的实验研究中,观察到了 CW 自调  $Q$  现象,原因是 Yb:YAG 晶体具有较长的上能级粒子寿命(1 ms 左右)较容易出现

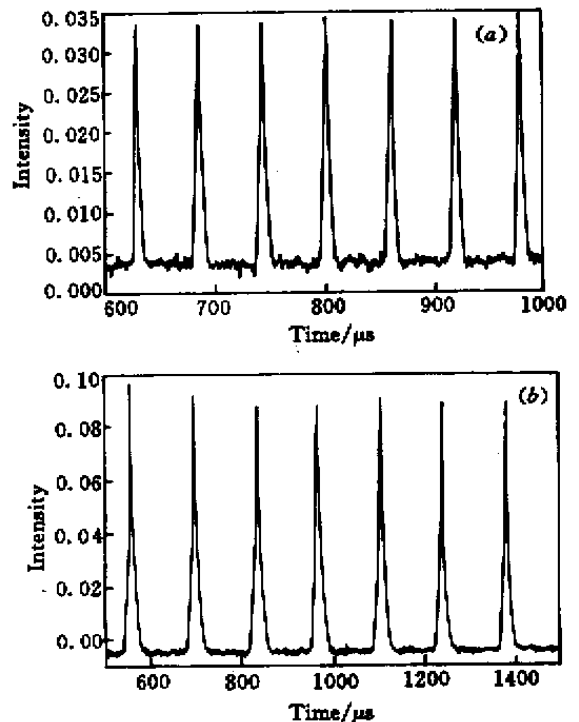


图 6 Yb:YAG 激光器的自调  $Q$  脉冲

Fig.6 Self  $Q$ -switched pulse train of the Yb:YAG laser

(a)  $T = 52 \mu\text{s}$ ; (b)  $T = 130 \mu\text{s}$

自调  $Q$  现象<sup>[8]</sup>。当激光器处于自调  $Q$  状态时,其输出的平均功率比其在出现自调  $Q$  现象之前的相应的输出平均功率要高出三分之一左右,这是因为激光器在自调  $Q$  脉冲状态下其峰值功率比连续光状态高得多,在增益介质内形成一定的自聚焦效应,使得腔内激光束腰收缩,更接近增益光束的中心,相当于增强了抽运。图 6 所示是实验中观察到的两种不同的自调  $Q$  状态对应的脉冲序列。在不同状态下自调  $Q$  脉冲序列的重复频率不同,而且在同一自调  $Q$  状态下,脉冲序列的重复频率也是在小范围内不断变化的。出现上述自调  $Q$  脉冲重复频率变化的主要原因是激光器的损耗的改变,这与参考文献 [8] 中,在掺钛蓝宝石激光器中观察到的自调  $Q$  现象相类似。需要指出的是,当激光器处于 CW 输出功率最高的状态时,自调  $Q$  现象不会出现。只有当激光器略微失谐时(例如稍稍调偏激光器中的一个端镜时)才会出现自调  $Q$  现象。

## 4 结 论

实现了单管半导体激光器抽运的全固化 Yb:YAG 激光器。吸收抽运功率为 900 mW 时,得到 66 mW 的连续光输出,斜率效率 12.7%。详细研究了激光器的可调谐特性,得到 1030.5 ~ 1055.5 nm 的调谐范围。并在

实验中观察到了 CW 自调  $Q$  现象。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Xu Jun *et al.*. Spectroscopy and laser performance of Yb<sup>3+</sup> doped YAG crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(1):132 ~ 135 (in Chinese)
- 2 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Liu Yupu *et al.*. Efficient output of a Ti:sapphire laser-pumped Yb:YAG thin chip CW laser at 1.053  $\mu\text{m}$ . *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **26**(10):865 ~ 868 (in Chinese)
- 3 P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1089 ~ 1091
- 4 S. R. Henion, P. A. Schulz. Yb:YAG laser: mode-locking and high-power operation. *CLEO '92*, 1992. 540
- 5 U. Brauch, A. Giesen, M. Karszewski *et al.*. Mutiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):713 ~ 715
- 6 R. Allen, L. Esterowitz. CW tunable ytterbium YAG laser pumped by titanium sapphire. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(8):639 ~ 641
- 7 Hans Bruesselbach, David S. Sumida. 69-W-average-power Yb:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7):480 ~ 482
- 8 Qirong Xing, Weili Zhang, K. M. Yoo, Self- $Q$  switched self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Comm.*, 1995, **119**(1,2):113 ~ 116