

文章编号: 0258-7025(2006)10-1297-04

# 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb:LSO 激光器

宋晏蓉<sup>1</sup>, 胡江海<sup>1</sup>, 周劲峰<sup>1</sup>, 赵广军<sup>2</sup>, 严成锋<sup>2</sup>, 苏良碧<sup>2</sup>, 徐 军<sup>2</sup>, 郭 凯<sup>1</sup>, 张志刚<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学应用数理学院, 北京 100022  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>3</sup> 北京大学量子电子学中心, 北京 100871)

**摘要** 报道了一个激光二极管(LD)抽运多波长连续输出的激光器和一个被动调 Q 的固体激光器。该激光器的增益材料是一种新型掺 Yb<sup>3+</sup> 的晶体 Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Yb:LSO)。当吸收的抽运功率为 2.57 W 时,连续输出的最大功率为 490 mW,斜率效率为 22.2%,光-光转换效率为 14.2%,激光阈值为 299 mW,输出激光波长为 1084 nm。多波长输出时,波长调谐范围为 1034~1085 nm。利用 InGaAs 可饱和吸收镜实现调 Q 输出时,斜率效率为 3.0%,激光波长为 1058 nm。脉冲重复频率为 25~39 kHz,重复频率随着抽运功率的增加而增加。

**关键词** 激光器;半导体可饱和吸收镜调 Q;激光材料;半导体抽运

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Laser Diode-Pumped Q-Switched Yb:LSO laser with a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

SONG Yan-rong<sup>1</sup>, HU Jiang-hai<sup>1</sup>, ZHOU Jin-feng<sup>1</sup>, ZHAO Guang-jun<sup>2</sup>,  
YAN Cheng-feng<sup>2</sup>, SU Liang-bi<sup>2</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-gang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>3</sup> Institute of Quantum Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** New Yb-doped crystal Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Yb:LSO) lasers pumped by diode-laser at 976 nm with passively Q-switched and multi-wavelength continuous-wave (CW) output were demonstrated. The maximum CW output power was 490 mW with the absorbed pump power of 2.57 W. The slope efficiency and optical-optical conversion efficiency were 22.2% and 14.2% respectively. The threshold was 299 mW, and the laser wavelength was 1084 nm. The wavelength could be tunable from 1034 to 1085 nm with a prism. For the Q-switched output, the laser operated at 1058 nm with an InGaAs semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). The Q-switched output slope efficiency of 3.0% with the maximum absorbed pump power of 1.73 W was also obtained. The pulse repetition rate was 25~39 kHz and was increased with the pump power increased.

**Key words** lasers; semiconductor saturable absorber mirror Q-switched; laser materials; laser diode-pumped

## 1 引 言

掺 Yb<sup>3+</sup> 晶体的吸收波长主要位于 900~1100 nm,这个波段恰好是已经发展得很成熟的 InGaAs 半导体激光器的发射波段,所以掺 Yb<sup>3+</sup> 晶体非常适合高效率的 InGaAs 半导体激光器抽

运<sup>[1]</sup>。这一类晶体的发射波长为 1000~1100 nm,激光振荡的中心波长在 1060 nm 附近。由于它们只有很少的量子缺陷,没有浓度猝灭和受激态吸收,所以激光效率很高。在 Yb:YAG 晶体<sup>[1]</sup>出现之后人们又研制出许多新的晶体,比如 Yb:YAB<sup>[2]</sup>, Yb:KYW 和 Yb:KGW<sup>[3,4]</sup>, Yb:GdVO<sub>4</sub><sup>[5]</sup>, 硼酸盐类

收稿日期:2006-03-13;收到修改稿日期:2006-05-08

基金项目:北京市优秀人才基金(20041D0501511)、北京市教委基金(KM200610005004)、国家杰出青年基金(60425516)、国家重点基础研究项目(G1999075201-2)资助课题。

作者简介:宋晏蓉(1964—),女,北京工业大学教授,硕士生导师,主要从事超快激光与超快过程、新型激光器方面的研究。  
E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

Yb:GdCOB<sup>[6]</sup>, Yb:BOYS<sup>[7]</sup> 和氟化物类 Yb:CaF<sub>2</sub><sup>[8]</sup>, 由于它们都具有比较宽的荧光光谱, 因此可得到可调谐激光输出及产生超短脉冲<sup>[9,10]</sup>。尽管如此, 要制成既有较高热导率又有较宽荧光光谱的晶体还是有一定的难度, 例如, Yb:YAG 具有良好的热导性但是荧光光谱较窄; 另一方面, 像 GdCOB 和 BOYS 这些晶体虽具有宽荧光光谱但却受它们低热导率的限制, 在大功率激光系统中散热问题成了最大的障碍。

本文报道了一种新的 Yb 掺杂的晶体 Yb<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (Yb:LSO), 这种晶体既有高热导率又具有宽的荧光光谱<sup>[11]</sup>, 实验中用这种晶体输出的激光具有非常宽的调谐范围, 利用 InGaAs 可饱和吸收镜实现了 1058 nm 处的调 Q 输出。

## 2 掺 Yb 的 Yb:LSO 的光谱和热传导特性

Yb:LSO 与已知的 Yb:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (Yb:YSO) 晶体相似, 它属于正单斜双轴晶体。本实验用的晶体是由中国科学院上海光学精密机械研究所徐军小组采用提拉法生长的。图 1 是用 976 nm 的半导体激光抽运的 Yb:LSO (原子数分数为 5% Yb<sup>3+</sup>-doped) 的荧光光谱, 用型号为 USB2000 (Ocean Optics Inc.) 的光谱仪探测。由图可看出, 晶体具有非常宽的荧光光谱 (1000~1110 nm), 因此可用于波长调谐及超短脉冲的产生。976 nm 处的峰值发射波长和 Jacquemet 等<sup>[11]</sup> 报道的不一样, 原因是我们测得的光谱是被一个 976 nm 处镀增透膜的双色镜反射的。从图 1 可以看到有四个峰值波长分别位于 1003 nm, 1032 nm, 1056 nm 和 1082 nm。尽管在 1003 nm 处的发射强度很大, 但是由于激光在 1003 nm 处有很强的再吸收损耗, 所以在 1003 nm 处

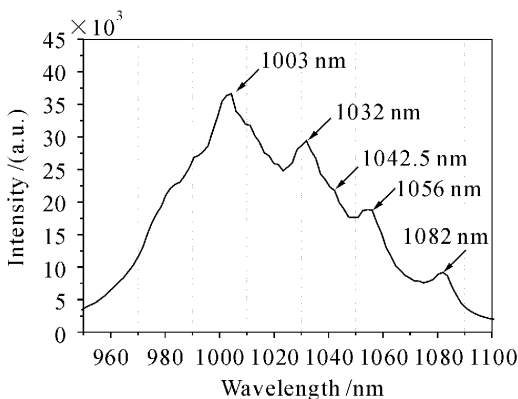


图1 Yb:LSO 晶体的荧光光谱

Fig. 1 Emission spectrum of the crystal Yb:LSO

的激光振荡效率不会太高。

增益介质的散热问题是发展高效率、高功率激光系统所遇到的最主要问题。首先想到的办法是用 978 nm 附近的光抽运来降低量子缺陷, 从而减少掺 Yb 晶体的热积累。另外, 为了使热量有效地散除, 增益介质的热传导率必须越大越好。一般来说, 热传导率随着掺杂浓度的增加而减小, 这最主要是因为 Yb 和它所代替的元素的摩尔质量不同。摩尔质量越接近, 当掺杂浓度升高时, 热传导率减小得越少<sup>[12]</sup>。Jacquemet 等<sup>[11]</sup> 利用 Gaumé 等给出的模型<sup>[12]</sup> 计算了一些掺 Yb 晶体的热导率并给出了其中三种晶体的实验数据, 如图 2 所示。

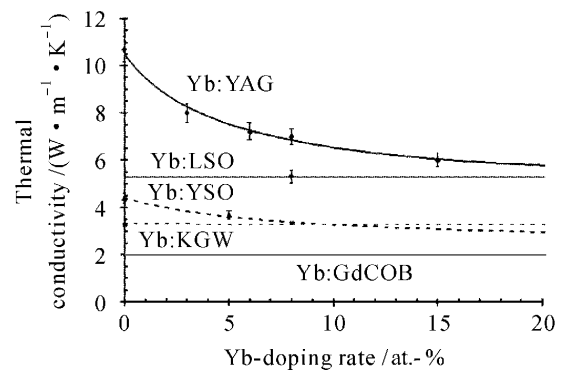


图2 Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:GdCOB, Yb:LSO 和 Yb:YSO 的理论计算(实线)和实验测量(点)的热导率与 Yb 掺杂原子数分数之间的关系

Fig. 2 Calculated (lines) and experimental thermal conductivity values (dots) for Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:GdCOB, Yb:LSO, and Yb:YSO versus Yb-doping rate

Yb:LSO 的热导率为  $5.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 尽管还不如 Yb:YAG, 但当掺杂原子数分数增加时, Yb:LSO 仍能保持它的最高热导率。未掺杂的 LSO 的热导率为  $5.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 掺 Yb<sup>3+</sup> 原子数分数为 8% 的晶体热导率为  $5.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。而 Yb:YAG 和 Yb:YSO 的热导率却随着掺杂原子数分数的增加有较大的下降。由此可见 Yb:LSO 可以有很高的掺杂原子数分数, 不用担心热导率会下降。现在用的 Yb:LSO 晶体掺杂原子数分数仅为 5%, 掺杂原子数分数还有很大的提升空间, 激光输出功率还可以大大增加。

## 3 实验结果

连续输出激光器是典型的平凹腔, 腔长 1.5 cm, 如图 3(a) 所示。抽运源是光纤耦合输出的

InGaAs 半导体激光器 (Unique Mode, GmbH), 纤芯直径为  $50\ \mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22。在  $976\ \text{nm}$  处光纤输出的功率为  $2.2\ \text{W}$ 。抽运光束被一对耦合透镜组准直聚焦到晶体上, 两个透镜 (lens1, lens2) 的焦距都为  $18\ \text{mm}$ 。本实验用的  $3\ \text{mm}$  长的晶体没有镀增透膜, 被安置在一个铜座上用水冷却, 晶体的温度保持在  $22\ ^\circ\text{C}$ 。输入镜为双色平面镜 ( $M_1$ ), 双色镜镀膜高透为  $\text{HT} = 96\% @ 976\ \text{nm}$ , 高反为  $\text{HR} = 99.7\% @ 1060\ \text{nm}$ ; 输出镜 ( $M_2$ ) 是曲率半径为  $50\ \text{mm}$  的凹面镜, 镀膜透射率为  $T = 1\% @ 1060\ \text{nm}$ 。图 4 是输出功率随吸收功率变化的曲线, 当吸收的抽运功率为  $2.57\ \text{W}$  时, 输出最大功率为  $490\ \text{mW}$ , 斜率效率为  $22.2\%$ , 光-光转换效率为  $14.2\%$ 。连续输出激光波长为  $1084\ \text{nm}$ 。

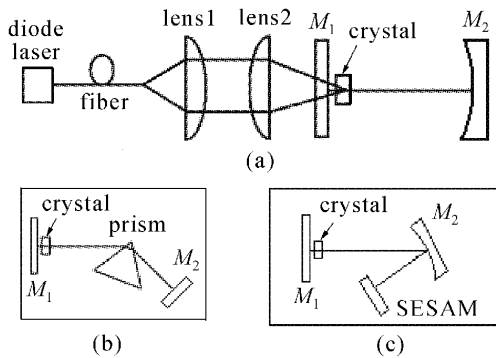


图 3 (a) 连续输出激光器的结构图; (b) 波长调谐激光器的结构图; (c) 调 Q 激光器的结构图

Fig. 3 Structures of the CW output laser (a), tuned laser (b) and the Q-switched laser (c)

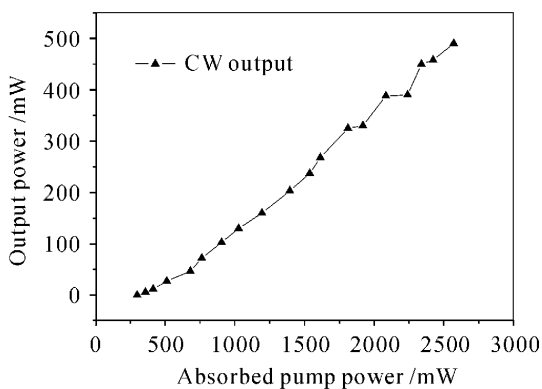


图 4 连续输出时的输入输出曲线  
(连续输出的斜率效率为  $22.2\%$ )

Fig. 4 Output power versus input power with the CW laser

(slope efficiency of CW laser was  $22.2\%$ )

图 3(b) 是波长可调谐激光器的结构图, 总腔长为  $8.4\ \text{cm}$ 。一个棱镜 (熔融石英) 插入到平凹腔中,

旋转棱镜以调节输出波长。晶体和双色输入平面镜与连续激光器中的参数相同, 输出镜是一个平面镜, 在  $1060\ \text{nm}$  处的透过率为  $0.3\%$ 。实验中得到的输出波长调谐范围为  $1034\sim 1085\ \text{nm}$ 。

最后利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 做 Yb:LSO 晶体的调 Q 实验。实验装置如图 3(c) 所示。激光腔为  $4.5\ \text{cm}$  的三镜腔, 半导体可饱和吸收镜既作调 Q 元件又作端镜, 其底部反射镜是一个  $27.5$  对的 GaAs/AlAs 层, 吸收层是  $8\ \text{nm}$  厚的 InGaAs 量子阱, 被贴在一块铜片上冷却。晶体和输入镜与上面用到的相同, 输出镜镀膜为  $T = 0.3\% @ 1060\ \text{nm}$ , 曲率半径为  $50\ \text{mm}$ 。

图 5 是脉冲输出时的输入输出功率曲线, 输出功率随抽运功率的增加而增加, 调 Q 时斜率效率为  $3.0\%$ , 输出波长为  $1058\ \text{nm}$ 。

图 6 是抽运功率为  $1.83\ \text{W}$  时测得的调 Q 脉冲波形。重复频率为  $25\ \text{kHz}$ , 脉宽为  $2.9\ \mu\text{s}$ 。实验中观察到脉冲重复频率随抽运功率的增加而增加, 如图 7 所示。当抽运功率从  $1.83\ \text{W}$  上升到  $2.2\ \text{W}$  时, 重复频率也从  $25\ \text{kHz}$  上升到  $39\ \text{kHz}$ 。

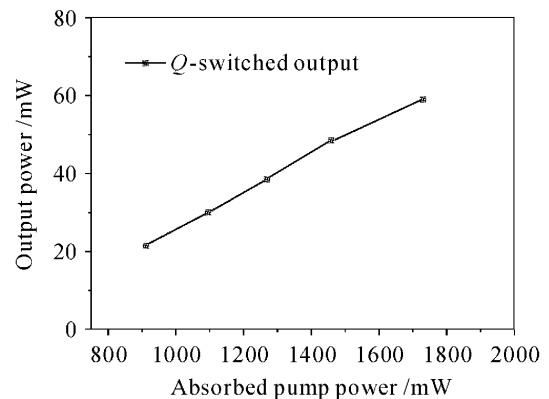


图 5 调 Q 输出时的输入输出曲线  
(调 Q 输出时的斜率效率为  $3.0\%$ )

Fig. 5 Output power versus input power with the Q-switched laser

(slope efficiency of the Q-switched laser was  $3.0\%$ )

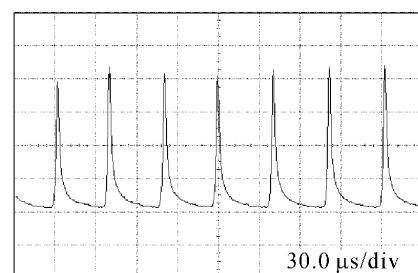


图 6 调 Q 激光器的输出脉冲波形

Fig. 6 Output pulse trains of the Q-switched laser

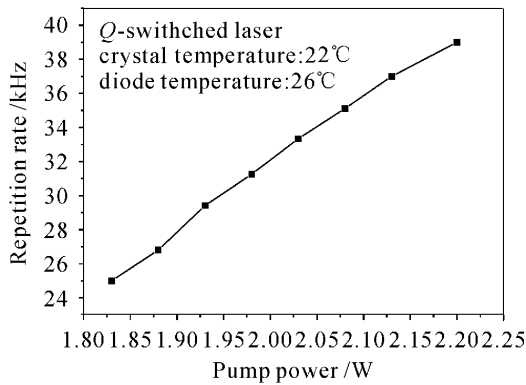


图 7 调 Q 激光器的重复频率随抽运功率的变化曲线

Fig. 7 Repetition rates of the Q-switched laser with the different pump powers

## 4 结 论

报道了一种新晶体材料 Yb:LSO 激光器,用 976 nm 的半导体激光抽运,分别得到了连续输出、波长可调谐输出及调 Q 输出的固体激光器。当抽运功率从 1.83 W 上升到 2.2 W 时,脉冲重复频率为 25~39 kHz,调 Q 元件为半导体可饱和吸收镜。连续光输出和调 Q 输出的斜率效率分别为 22.2% 和 3.0%,输出波长分别为 1084 nm 和 1058 nm,可调谐输出的波长范围为 1034~1085 nm。

### 参 考 文 献

1 P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang *et al.*. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14):1089~1091

2 Yanrong Song, Qingyue Wang. Polarized operation of Yb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> CW and mode-locked lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):339~341

3 H. Liu, J. Nees, G. Mourou. Diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21):1723~1725

4 F. Brunner, G. J. Spuhler, J. Aus der Au *et al.*. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser with 1.1-W average power [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15):1119~1121

5 J. Petit, B. Viana, P. Goldner *et al.*. Laser oscillation with low quantum defect in Yb:GdVO<sub>4</sub>, a crystal with high thermal conductivity [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8):833~835

6 F. Druon, F. Balembois, P. Georges *et al.*. Generation of 90-fs pulses from a mode-locked diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6):423~425

7 F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut *et al.*. Diode-pumped Yb:Sr<sub>3</sub>Y(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3):197~199

8 Xue Yinghong, Wang Qingyue, Chai Lu *et al.*. Characterization of laser-diode-pumped self-Q-switched laser operation of a Na, Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub> single crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1313~1316

薛迎红,王清月,柴路等.激光二极管抽运 Na, Yb 共掺 CaF<sub>2</sub> 晶体自调 Q 激光特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1313~1316

9 P. A. Burns, J. M. Dawes, P. Dekker *et al.*. Coupled-cavity, single-frequency, tunable cw Yb:YAB yellow microchip laser [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**:315~320

10 S. C. Zeller, L. Krainer, G. J. Spuhler *et al.*. Passively mode-locked 40-GHz Er:Yb:glass laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(7):787~788

11 M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel *et al.*. Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **80**(2):171~176

12 R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien *et al.*. A simple model for the prediction of thermal conductivity in pure and doped insulating crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(7):1355~1357