

文章编号: 0258-7025(2005)06-0754-03

# Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG 复合型单晶光纤 及其被动调 Q 激光器

夏 洁, 胡海华, 何经雷, 沈永行  
(浙江大学物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 研究了被动调 Q 激光器选用激光加热基座法(LHPG)生长的 Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG 一体化复合型单晶光纤。初步实验结果表明该单晶光纤完全满足全固化被动调 Q 激光器的要求。对配置两种不同结构输出镜时分别对应的输出光束的特性进行了观测。已实现了脉宽 9 ns, 最大平均输出功率达 19 mW, 频率为 10 kHz 的调 Q 激光。

**关键词** 激光技术; 复合型单晶光纤; 被动调 Q 激光器; Cr<sup>4+</sup>:YAG 光纤

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## Passively Q-Switched Laser Operation of Composite Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG Crystal Fiber

XIA Jie, HU Hai-hua, HE Jing-lei, SHEN Yong-hang

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Monolithic composite Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG crystal fiber was grown by means of laser heated pedestal growth (LHPG) method. Preliminary results showed that the crystal fiber is well suited to a compact passively Q-switched laser operation. The output beam characteristics were observed with two kinds of cavity configuration with different output couplers. A Q-switched laser output with 9 ns pulse duration, 19 mW maximum average power and 10 kHz repetition rate was achieved.

**Key words** laser technique; composite crystal fiber; passively Q-switched laser; Cr<sup>4+</sup>:YAG fiber

### 1 引 言

运用激光加热基座法(LHPG)能生长出高质量的单晶光纤,如 YAG 光纤和蓝宝石光纤。并在 20 世纪 70 年代实现了掺钕离子 YAG 光纤的连续激光工作<sup>[1]</sup>。但由于单晶光纤激光器的工作效率相对较低,一直未得到广泛应用。

作为一种新型的自饱和吸收激光晶体, Cr<sup>4+</sup>:YAG 被广泛用作被动型自调 Q YAG 激光器的工作物质<sup>[2~4]</sup>。增益介质与饱和吸收体一体化的单晶光纤具有更高的稳定性并易于实现短脉宽,并且在激光器工作系统的设计和调节上具有独到的便利。到目前为止,主要用高温扩散粘接法<sup>[5]</sup>和液相外延法<sup>[6,7]</sup>生长。

本文用激光加热基座法生长了高质量的 Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG 和 Cr<sup>4+</sup>:YAG-Yb<sup>3+</sup>:YAG 一体化的单晶光纤<sup>[8,9]</sup>。用 3 W 半导体激光器作抽运源,实现了调 Q 激光输出。

### 2 复合型单晶光纤的制备和实验

实验中用激光加热基座法生长成了 Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG 和 Cr<sup>4+</sup>:YAG-Yb<sup>3+</sup>:YAG 复合型单晶光纤。如图 1 所示,分别用直径 0.6~1.0 mm 的 Nd<sup>3+</sup>:YAG 和 Yb<sup>3+</sup>:YAG 单晶光纤作籽晶, Cr<sup>4+</sup>:YAG 单晶光纤作源棒生长复合型单晶光纤。其中,单晶光纤的 Yb<sup>3+</sup>:YAG 和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 部分均用激光加热基座法进行二次生长<sup>[8,9]</sup>。在生长过

收稿日期: 2004-06-30; 收到修改稿日期: 2004-09-03

基金项目: 军用固体激光技术国防科技重点实验室联合资助项目。

作者简介: 夏 洁(1981—),女,浙江金华人,浙江大学物理系硕士研究生,主要从事激光与光电子材料方面的研究。E-mail: xiajie163@tom.com

程中,要确保保棒在缓慢地向上移动,这样  $\text{CO}_2$  激光器光束不会聚焦在熔区顶部。一旦籽晶下降至与熔区接触,该部分就与熔区的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  熔合。再缓慢提拉籽晶,长成复合型单晶光纤。为确保理想的光纤质量,提拉速度控制在  $0.1\sim 0.3\text{ mm/min}$  的范围内。在生长过程中,重复衔接过程可以提高光纤衔接处的质量,但同时会增大不同掺杂离子部分之间的过渡区。

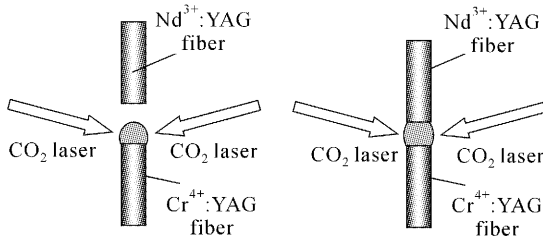


图1 复合型单晶光纤生长过程示意图

Fig. 1 Experimental procedure for the composite YAG crystal fiber growth

用激光加热基座法生长的十几根复合型光纤中,绝大多数的过渡区都是平滑的。长成的光纤长度范围为  $15\sim 35\text{ mm}$ ,其中掺  $\text{Cr}^{4+}$  部分为  $2\sim 5\text{ mm}$ ,直径  $0.6\sim 1.0\text{ mm}$ 。复合型单晶光纤的透射光谱是增益介质和饱和吸收体透射光谱的结合<sup>[8]</sup>。

激光加热基座法生长的单晶光纤在加工为激光介质之前在空气中以  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  的高温退火  $2\text{ h}$ <sup>[8]</sup>。由于生长过程中  $\text{Cr}^{4+}$  离子的挥发,使不同光纤  $\text{Cr}^{4+}$  浓度不完全相同。但未测量小直径、且长度有限的光纤中  $\text{Cr}^{4+}$  的掺杂浓度。

为证实光纤在被动调 Q 激光器中的适用性,用已生长的光纤作激光工作物质,进行了自调 Q 激光实验,实验装置如图 2 所示。

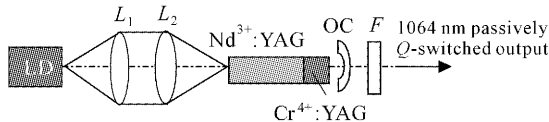


图2 复合型单晶光纤被动调 Q 激光器系统

Fig. 2 Experimental setup of LD end-pumped  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}-\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  composite crystal fiber laser

半导体激光器工作波长为  $808\text{ nm}$ ,出射面积  $2\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$ ,最大输出功率  $2.6\text{ W}$ 。透镜  $L_1, L_2$  聚焦光束进行尾端抽运。测量耦合进单晶光纤端面的光束能量,最大耦合效率仅为  $50\%$ 。此时光纤作

为增益介质和饱和吸收体。谐振腔入射镜的一端镀  $1064\text{ nm}$  高反膜和  $808\text{ nm}$  高透射膜;另一端镀  $808\text{ nm}$  反射率达  $90\%$  高反膜和  $1064\text{ nm}$  高透射薄膜;OC 为输出镜,  $1064\text{ nm}$  处透射率  $2\%\sim 4\%$ ;F 为滤光片,滤去  $808\text{ nm}$  抽运光,  $1064\text{ nm}$  波长的透射率为  $75\%$ ;总腔长约  $10\text{ mm}$ 。

已实现了 5 根光纤调 Q 激光的输出,其中一根  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  部分长  $3\text{ mm}$  的光纤,OC 在  $1064\text{ nm}$  处反射率达  $97\%$ ,在  $1.3\text{ W}$  抽运功率下,获得脉宽  $9\text{ ns}$ (如图 3),重复频率  $10\text{ kHz}$ (如图 4),最大平均输出功率为  $19\text{ mW}$  的激光输出。每个脉冲的能量约为  $1.9\text{ }\mu\text{J}$ 。

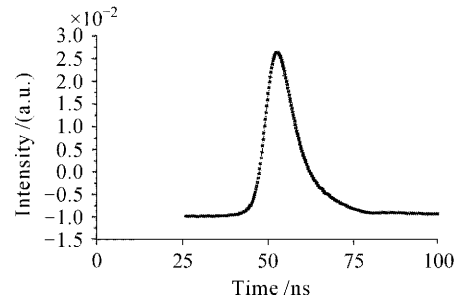


图3 脉宽  $9\text{ ns}$  的自调 Q 激光脉冲

Fig. 3 Q-switched pulse shape with FWHM duration of  $9\text{ ns}$

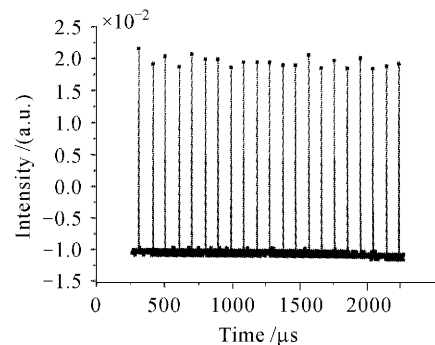


图4 重复频率  $10\text{ kHz}$  的调 Q 激光脉冲序列

Fig. 4 Q-switched laser pulse trains with repetition rate of  $10\text{ kHz}$

### 3 实验结果分析与结论

实验结果表明,复合型 YAG 单晶光纤适用于集增益介质和饱和吸收体为一体的全固化微型被动调 Q 激光器。现存的问题主要有两个:一方面,是其转换效率过低,原因在于:第一,所选光纤直径为  $0.8\sim 1.0\text{ mm}$ ,没有充分发挥光纤的导模作用;抽运光束与谐振腔共振的激光模式失谐;第二,光纤衍射损耗的存在<sup>[8]</sup>。实验中,仅当输出镜非常靠近

Cr<sup>4+</sup>:YAG端面,才能得到激光输出。当镜面离开端面一定距离(约3 mm)后,就不能得到激光输出,分析是因为光纤端面有很大的衍射损耗。另一方面,不同光纤Cr<sup>4+</sup>:YAG部分掺杂浓度不完全相同,得到的调Q激光脉冲也不同。因此,所生长光纤的一致性需要通过改进工艺以获得改善。

为提高激光器转换效率可以从以下几方面改进:第一,在保证谐振腔腔镜平行的前提下,在光纤两端镀膜直接形成激光器谐振腔,减小光纤端面衍射损耗,更好地运用光纤的导模性并充分利用耦合入光纤的抽运能量。第二,由于实验中的单晶光纤直径较大,可尝试用带尾纤的大功率半导体激光器抽运,增加起作用的增益介质的体积,从而获得更高的输出能量并提高转换效率。第三,在保证光纤质量的前提下,尽量减小所生长的复合型光纤的直径,发挥光纤激光器特有的导模作用。

#### 参 考 文 献

- 1 C. A. Burrus, J. Stone. Single-crystal fiber optical devices: A Nd:YAG fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(6): 318~320
- 2 Jeffrey A. Morris, Clifford R. Pollock. Passive Q switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8): 440~442
- 3 Y. Kalisky, A. Ben-Amer Baranga, Y. Shimony *et al.*. Cr<sup>4+</sup> doped garnets: novel laser materials and non-linear saturable absorbers [J]. *Opt. Mater.*, 1997, **8**: 129~134
- 4 Yang Chengwei, Huo Yujing, Ying Xiaodong *et al.*. Experimental study on LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 1~4  
杨成伟,霍玉晶,尹晓东等. 激光二极管抽运 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 1~4
- 5 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1427~1429
- 6 B. Ferrand, B. Chambaz, M. Couchaud. Liquid phase epitaxy: A versatile technique for the development of miniature optical components in single crystal dielectric media [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**: 101~114
- 7 Rao Haibo, Cheng Jianbo, Gao Tao *et al.*. Growth of Cr,Ca:YAG by liquid phase epitaxy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 107~109  
饶海波,成建波,高涛等. Cr,Ca:YAG 的液相外延生长 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 107~109
- 8 Yonghang Shen, Shuying Chen, Weizhong Zhao *et al.*. Composite Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG crystal fiber: growth characteristics and passively Q-switched laser operation [C]. *SPIE*, 2002, **4918**: 20~27
- 9 Yonghang Shen, Shuying Chen, Weizhong Zhao *et al.*. Growth characteristics and potential applications in optical sensors of composite Cr<sup>4+</sup>:yttrium-aluminum-garnet (YAG)-Nd<sup>3+</sup>:YAG crystal fiber[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1187~1191