

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0294-04

# Cr, Yb:YAG 晶体的自调 Q 激光性能

徐晓东<sup>1</sup>, 赵志伟<sup>1</sup>, 徐 军<sup>1</sup>, 邓佩珍<sup>1</sup>, 董 俊<sup>2</sup>, Ken-ichi UEDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup> Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Japan

**摘要** 用光纤耦合激光二极管抽运 Cr, Yb:YAG 晶体获得了 1.03  $\mu\text{m}$  的自调 Q 激光输出, 输出的调 Q 脉冲非常稳定, 抽运阈值功率为 680 mW, 脉冲宽度为 3.3 ns, 获得的平均功率为 156 mW, 斜率效率为 18.5%。随着抽运功率的增大, 重复频率成线性增长, 而脉宽略有减少, 单脉冲能量和峰值功率都始终呈增大趋势。光束质量因子  $M^2$  为 1.17。

**关键词** 材料; Cr, Yb:YAG 晶体; 自调 Q 激光; 固体激光器; 抽运

**中图分类号** O734 **文献标识码** A

## Self-Q-Switched Laser Properties of Cr, Yb:YAG Crystal

XU Xiao-dong<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-wei<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1</sup>, DENG Pei-zhen<sup>1</sup>, DONG Jun<sup>2</sup>, Ken-ichi UEDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Japan

**Abstract** Using a fiber-coupled laser diode as the pumping source, the 1.03  $\mu\text{m}$  self-Q-switched laser in the Cr, Yb:YAG crystal is demonstrated. The output Q-switched pulses are very stable, the threshold pumping power is 680 mW, the pulse duration is as short as 3.3 ns, the mean output power of 156 mW is obtained and the slope efficiency is about 18.5%. With the rise of the pump power, the repetition rate increases linearly, the pulse width decreases very slowly and the pulse energy and peak power increase slowly with absorbed pump power. The beam quality factor  $M^2$  is measured to be 1.17.

**Key words** materials; Cr, Yb:YAG crystal; self-Q-switched laser; solid-state laser; pumping

## 1 引 言

掺  $\text{Cr}^{4+}$  晶体材料在 0.9~1.2  $\mu\text{m}$  具有宽的吸收带和良好的饱和吸收性质, 可作为 Nd 激光器的被动 Q 开关材料<sup>[1]</sup>。与传统的有机染料和色心晶体相比, 掺  $\text{Cr}^{4+}$  晶体具有吸收截面大、饱和光强低、损伤阈值高、光化学性能稳定和使用方便等优点, 可以作为脉冲激光和连续激光的 Q 开关<sup>[2,3]</sup>。尤其是  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体, 特别适用于高功率和高重复频率激光器, 当 YAG 晶体中同时掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  和  $\text{Cr}^{4+}$  时, 增益介质和可饱和吸收体的特性被结合到一起, 从而实现了晶体的自调 Q 运行<sup>[4,5]</sup>。

近年来, 掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光晶体引起了人们很大的研究兴趣, 这主要是由于  $\text{Yb}^{3+}$  激活离子的能级结构简单, 量子效率高, 荧光寿命长, 能有效存储能量, 同时它的吸收带在 900~1100 nm, 能与 InGaAs 抽运源有效耦合, 且吸收峰较宽, 很适合作高功率固体激光增

益介质的激活中心<sup>[6,7]</sup>。同时,  $\text{Yb}^{3+}$  在 1.03  $\mu\text{m}$  附近宽的发射带能与  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 的可饱和吸收有效耦合。目前多次报道了用 Cr:YAG 被动调 Q 的 Yb:YAG 激光器<sup>[3,8]</sup>, 并且实现了 Cr, Yb:YAG 晶体的自调 Q 运行<sup>[9]</sup>。Cr, Yb:YAG 将  $\text{Yb}^{3+}$  的优点和  $\text{Cr}^{4+}$  的可饱和吸收特性结合起来, 成为一种比 Cr, Nd:YAG 晶体性能更好的自调 Q 激光晶体。

本文采用提拉法生长了原子数分数为 0.1 的 Yb 和 0.00025 的 Cr 的 Cr, Yb:YAG 晶体, 采用光纤耦合激光二极管抽运 Cr, Yb:YAG 晶体, 获得了 1.03  $\mu\text{m}$  的自调 Q 激光输出。

## 2 实 验

### 2.1 晶体生长

晶体生长所用的原料是纯度为 5 N 的  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaCO}_3$ 。采用中频感应提拉

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(2002AA311030)资助课题。

**作者简介:** 徐晓东(1979—), 男, 江苏人, 中国科学院上海光学精密机械研究所助理研究员, 主要从事激光晶体生长、光谱和激光性能的研究。E-mail: xdxu79@yahoo.com.cn

法,先将各高纯氧化物粉末在空气中适当地预干燥,然后按化学计量比严格称量,称量精度为 10 mg,并研磨均匀,加压成直径略小于坩埚内径的块体,在空气中 1350 °C 恒温预烧数小时后装入铱坩埚中开始生长晶体。晶体生长方向〈111〉,晶转速率 10~20 r/min,生长速率 1 mm/h,生长气氛为氮气。从炉中取出的晶体毛坯为蓝绿色,为了消除毛坯中的色心和应力,我们探索了晶体的退火工艺,理想的退火工艺如下:在氧气气氛中缓慢升温至 1400 °C,并保温 36 h,然后以 10 °C/h 的速率缓慢降至室温,晶体的颜色变为褐色。激光实验所用样品的尺寸为 8 mm×8 mm×1 mm,两面抛光,加工精度为三级。

## 2.2 激光实验

激光二极管抽运 Cr,Yb:YAG 自调 Q 激光实验装置如图 1 所示,抽运源是最大功率为 2 W 的多模光纤耦合二极管激光器,发射波长为 937.5 nm,纤芯直径为 102 μm,数值孔径为 0.15。在晶体的后表面镀 940 nm 增透,1030 nm 全反的介质膜,用此平-平结构直接来做谐振腔的后腔镜;晶体的前表面镀 1030 nm 高反射( $R=85\%$ ),940 nm 全反的膜作为输出镜,腔长为 1 mm。采用两个焦距为 8 mm 的聚焦镜头将抽运光经过特定的光学聚焦系统,在晶体表面附近聚焦成半径约为 100 μm 的光斑。激光实验在室温下进行,未采取水冷系统。调 Q 脉冲用一个上升时间为 1.5 ns 的硅 PIN 探测器来探测,并且用一个 500 MHz 的 Tektronix TDS 3052B 数字示波器记录调 Q 波形,用激光功率计测量激光输出功率,用 CCD 相机监控输出耦合镜附近的激光光束波形,光束直径可以估算。

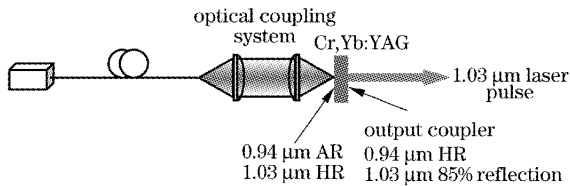


图 1 激光二极管抽运 Cr,Yb:YAG 自调 Q 激光实验装置图  
Fig. 1 Schematic diagram of the Cr,Yb:YAG self-Q-switched laser pumped by laser diode

## 3 结果与讨论

用原子数分数为 0.00025Cr,0.1Yb:YAG 晶体作为激光工作物质,获得了 1.03 μm 的自调 Q 激光输出。激光二极管阈值抽运功率为 680 mW。当抽运功率为 1520 mW 时,获得了平均功率为 156 mW,重复频率为 7.8 kHz 的激光输出。当抽

运光功率从 680 mW 增加到 1520 mW 时,得到了一系列自调 Q 激光脉冲。图 2 为抽运功率为 1520 mW 时自调 Q 激光脉冲序列,可以看出激光脉冲是非常稳定的。图 3 为脉宽为 3.3 ns 激光输出的脉冲形状,脉冲前沿比较陡,说明  $\text{Cr}^{4+}$  的开关速度比较快,而脉冲后沿相对比较平缓。

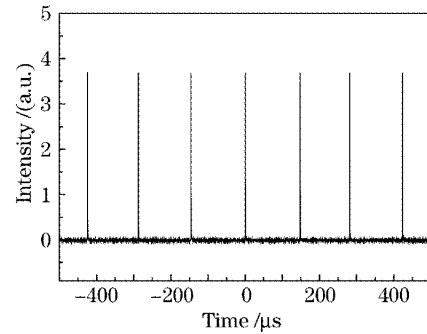


图 2 Cr,Yb:YAG 晶体自调 Q 激光脉冲序列  
Fig. 2 Oscilloscope trace of a train of self-Q-switched pulses

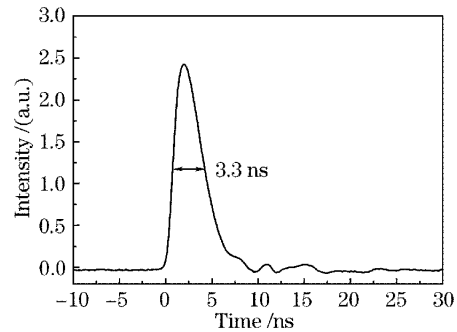


图 3 Cr,Yb:YAG 晶体单脉冲波形

Fig. 3 Laser pulse profile of self-Q-switched Cr,Yb:YAG laser with pulse width 3.3 ns

Cr,Yb:YAG 晶体自调 Q 激光的输入与输出功率特性曲线如图 4 所示。抽运阈值功率为 680 mW,

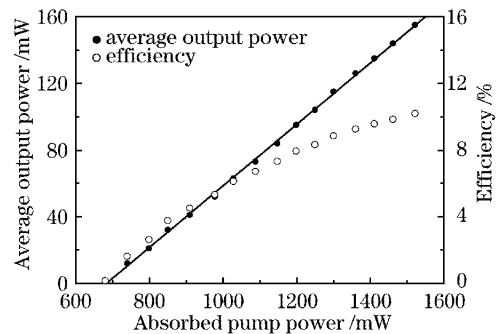


图 4 Cr,Yb:YAG 晶体自调 Q 激光平均输出功率、光-光转换效率与输入功率的关系曲线  
Fig. 4 Average output power and opto-opto conversion efficiency as functions of the absorbed pump power

在 680~1520 mW 间激光的斜率效率约为 18.5%。当入射到晶体上的功率为 1520 mW 时, Cr, Yb: YAG 晶体获得的最大平均输出功率为 156 mW, 在实验过程中没有出现饱和现象。从图 4 可以看出, 在输出平均功率为 156 mW 时, 光-光转换效率最大, 约为 10%。

图 5 为激光脉冲的重复频率、脉冲宽度、单脉冲能量以及峰值功率随入射抽运功率的变化关系。其中脉冲能量由平均输出功率和重复频率两者确定, 而峰值功率则由脉冲能量和脉冲宽度确定。随着抽

运功率的增大, 重复频率成线性增长, 而脉宽略有减小。对于单脉冲能量和峰值功率, 在整个抽运功率范围内都始终呈增大变化趋势的。在最大抽运功率 1520 mW 时, 获得了最高重复频率为 7.8 kHz, 最短脉冲宽度为 3.3 ns, 最大单脉冲能量为 20  $\mu$ J, 最高峰值功率为 6 kW 的自调 Q 激光脉冲输出。在被动调 Q 状态下, 激光脉宽主要和晶体中 Cr<sup>4+</sup> 的浓度有关。单纯地增加抽运功率只能促使调 Q 开关更迅速地开合、提高重复频率以及相应的平均输出功率, 而脉冲宽度、单脉冲能量和峰值功率趋于饱和。

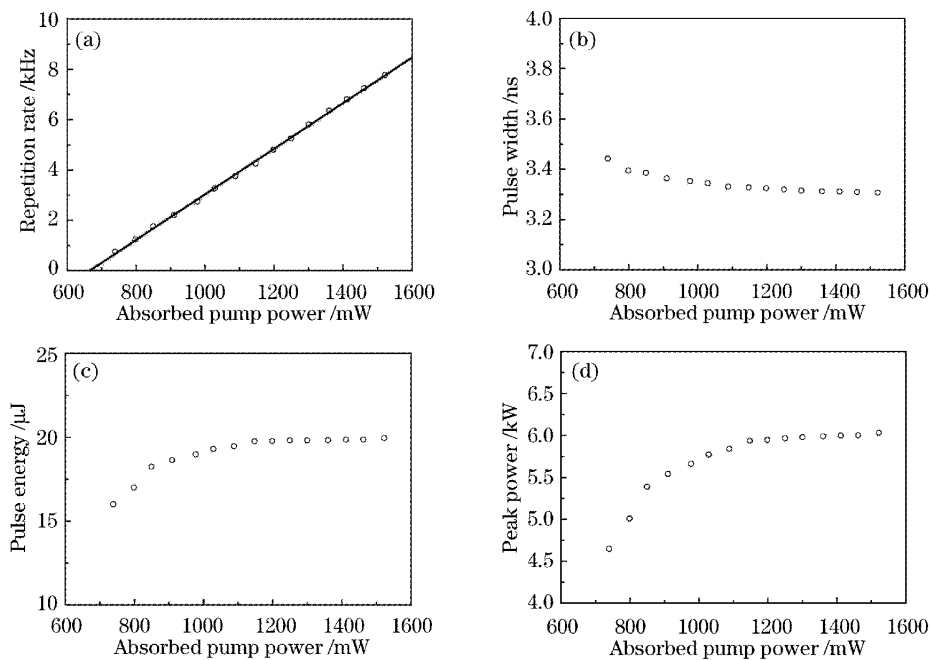


图 5 重复频率(a), 脉冲宽度(b), 单脉冲能量(c)和峰值功率(d)与输入功率的关系曲线

Fig. 5 Repetition rate (a), pulse width (b), pulse energy (c) and peak power (d) as functions of the absorbed pump power

输出激光的功率分布及通过光束中心一水平薄层内的分布如图 6 所示, 输出光束与高斯分布吻合

很好。测得光束质量因子  $M^2$  的值为 1.17。

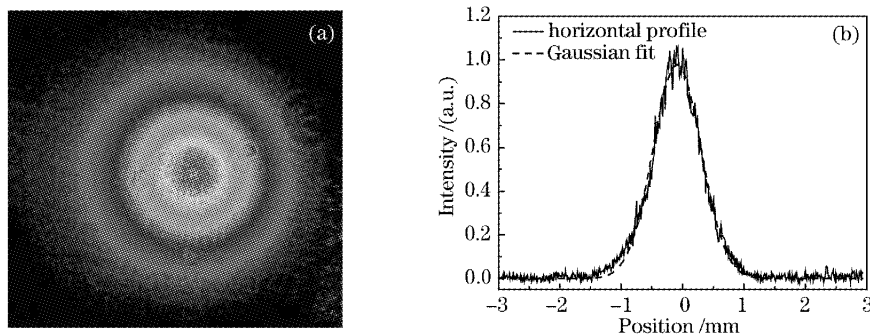


图 6 (a) CCD 测量的 Cr, Yb: YAG 晶体自调 Q 激光输出光束图; (b) 在通过光束中心一水平薄层内的功率分布与高斯分布图

Fig. 6 (a) Beam profile measured by a CCD camera of laser output; (b) horizontal slice through center of the beam profile with a Gaussian fit

## 4 结 论

采用 937.5 nm 光纤耦合二极管激光器作为抽运源,抽运 Cr, Yb: YAG 晶体,获得了 1.03  $\mu\text{m}$  的自调 Q 激光输出,输出的最大平均功率为 156 mW,光-光转换效率为 10%,斜率效率为 18.5%,自调 Q 脉冲对应的最高重复频率为 7.8 kHz,最短脉冲宽度为 3.3 ns,最大单脉冲能量为 20  $\mu\text{J}$ ,最高峰值功率为 6 kW。输出光束与高斯分布吻合得很好,测得光束质量因子  $M^2$  的值为 1.17。

## 参 考 文 献

- 1 M. I. Demchuk, V. P. Mikhailov, N. I. Zhavoronkov *et al.*. Chromium-doped forsterite as a solid-state saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(13): 929~930
- 2 Yingxin Bai, Nianle Wu, Jian Zhang *et al.*. Passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(12): 2468~2472
- 3 Jun Dong, Peizhen Deng, Yupu Liu *et al.*. Passively Q-switched Yb:YAG laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG as the saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4303~4307
- 4 Shiqun Li, Shouhuan Zhou, Pei Wang *et al.*. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr,Nd:YAG laser with polarized output [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 203~204
- 5 Jun Dong, Peizhen Zhen, Yutian Lu *et al.*. Laser-diode-pumped Cr<sup>4+</sup>,Nd<sup>3+</sup>:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1101~1103
- 6 W. K. Krupke. Ytterbium solid-state lasers-the first decade [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6): 1287~1297
- 7 Xiaodong Xu, Zhiwei Zhao, Pingxin Song *et al.*. Structural, thermal, and luminescent properties of Yb-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(3): 543~547
- 8 Y. Kalisky, C. Labbe, K. Waichman *et al.*. Passively Q-switched diode-pumped Yb:YAG laser using Cr<sup>4+</sup>-doped garnets [J]. *Opt. Mater.*, 2002, **19**(4): 403~413
- 9 Dong Jun, Deng Peizhen, Liu Yupu *et al.*. Performance of self-Q-switched Cr, Yb: YAG laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 342~344