

文章编号: 0258-7025(2001)03-0193-04

Cr, Yb: YAG 微片的自调 Q 激光特性*

董俊 邓佩珍 张影华 刘玉璞 徐军 陈伟 谢兴龙

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 用连续钛宝石激光器作为抽运源,在室温下实现了 Cr, Yb: YAG 晶体的自调 Q 激光输出。实验过程中,获得了在 1.03 μm 平均功率为 35 mW 和脉宽(FWHM)为 0.4 μs 的自调 Q 激光。实验表明 Cr, Yb: YAG 晶体确实把 Cr^{4+} 离子的可饱和吸收特性和 Yb^{3+} 的激光增益特性结合到了一起,实现了自调 Q 激光输出,使 Cr, Yb: YAG 晶体成为一种新型的全固化自调 Q 激光晶体。

关键词 Cr, Yb: YAG 晶体, 自调 Q 激光, 钛宝石激光器

中图分类号 TN 248.1+3 **文献标识码** A

Performance of Cr, Yb: YAG Self-Q-switched Laser

DONG Jun DENG Pei-zhen ZHANG Ying-hua LIU Yu-pu

XU Jun CHEN Wei XIE Xing-long

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

Abstract Using cw-Ti:sapphire laser as pumping source, the self-Q-switched Cr, Yb: YAG laser has been demonstrated at room temperature. An average output power as much as 35 mW at 1.03 μm with a pulse width (FWHM) as short as 0.4 μs was obtained. The laser experiment demonstrated that the Cr, Yb: YAG crystal exactly combines the Cr^{4+} saturable absorber and Yb^{3+} gain medium into one. And Cr, Yb: YAG crystal can be a most promising self-Q-switched laser crystal for compact, efficient solid-state lasers.

Key words Cr, Yb: YAG crystal, self-Q-switched, Ti:sapphire laser

1 引言

二极管抽运的被动调 Q 激光器是产生纳秒和亚纳秒范围内具有高峰值功率和高重复率脉冲的结构紧凑、经济、全固化的光源,可以广泛地应用于光雷达、测距、遥视、非线性光学处理和材料加工等方面。这种窄的脉冲有利于高精度测距,适用于三维成像、目标识别和机器人等方面。被动调 Q 固体激光器通常是由有机染料和无机色心晶体作为可饱和吸收体来实现的。然而,染料^[1]由于热稳定性差而容易老化,而且还需要一套复杂的冷却系统来保证其在连续抽运下的运转。色心晶体如 LiF 晶体^[2]通常表现出色心衰退的现象而不适合于长寿命的激光应用。近年来发展起来的掺 Cr^{4+} 离子晶体如 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}^{[3]}$, $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4^{[4]}$, $\text{Cr}^{4+}:\text{GSGG}^{[5]}$ 和 $\text{Cr}^{4+}:$

$\text{YSO}^{[6]}$ 等作为掺 Nd^{3+} 离子固体激光器的被动调 Q 开关引起了人们的极大兴趣。当在 YAG 和 GSGG 晶体中同时掺杂 Nd 和 Cr 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 运转^[7]。与 Nd^{3+} 离子相比, Yb^{3+} 离子由于能级结构简单而且具有优异的激光特性而更适合于二极管激光(LD)抽运。同时 Yb: YAG 晶体具有长的荧光寿命($951 \pm 15 \mu\text{s}$)^[8]和非常低的量子缺陷(8.6%),使得 Yb: YAG 晶体在激光运行过程中产生的热量比 Nd: YAG 低三倍^[9]。此外,在 940 nm 处宽的吸收带更适合于 InGaAs 二极管激光抽运^[10]。而且 Yb 离子在 YAG 晶体中可以实现高掺杂浓度而几乎没有浓度淬灭现象。因此我们生长了双掺 Cr 和 Yb 的 YAG 晶体并且报道了其吸收和荧光光谱特性^[11, 12]。这里进一步报道最新进行的钛宝石激光器抽运 Cr, Yb: YAG 的自调 Q 激光特性。

2 自调 Q 原理及实验

*国家自然科学基金(6998806)和 863-416 资助课题。

收稿日期 2000-07-20;收到修改稿日期 2000-10-10

在 Cr, Yb:YAG 晶体中掺入 Cr⁴⁺ 离子对 Yb³⁺: YAG 晶体的能级结构并未产生较大的影响。Cr, Yb: YAG 晶体的室温吸收光谱如图1(a)所示,在可见光范围内, Cr, Yb: YAG 的吸收光谱特性与 Cr: YAG 的吸收特性^[13]一样,都有两个很强很宽中心位于 440 nm 和 605 nm 的吸收带,它们分别对应于 Cr³⁺ 的 ⁴A₂ → ⁴T₁ 和 ⁴A₂ → ⁴T₂ 跃迁;中心位于 913 nm, 940 nm 和 968 nm 的吸收带对应于 Yb³⁺ 的 ²F_{7/2} → ²F_{5/2} 跃迁;中心位于 1030 nm 吸收带对应于 Cr⁴⁺ 的 ³A₂ → ³T₁ 跃迁,同时还有 Yb³⁺ 离子的吸收。在抽运波长 940 nm 处 Yb³⁺ 的吸收系数为 10.05 cm⁻¹, 在 1064 nm 处 Cr⁴⁺ 的吸收系数为 1.1 cm⁻¹。在激光发射波长 1.03 μm 处的吸收系数为 2.61 cm⁻¹, 此吸收系数高于 Cr⁴⁺ 在 1064 nm 处的吸收系数主要是由于 Yb³⁺ 离子在 1030 nm 处存在着自吸收。因此采用 940 nm 波长的激光作为抽运波长是合适的。用波长为 968 nm 的 LD 作为抽运源,测得的荧光光谱在 980~1055 nm 范围内(如图 1(b)所示),但强的发射峰位于 1.03 μm,对应于 Yb³⁺ 离子的 ²F_{5/2} 能级到 ²F_{7/2} 能级的跃迁, Cr, Yb: YAG 晶体的发射截面积比 Yb: YAG 晶体的有所增大,但其荧光寿命缩短(0.52 ms)。由于 Cr⁴⁺ 离子的掺入,在光强较强的长脉冲

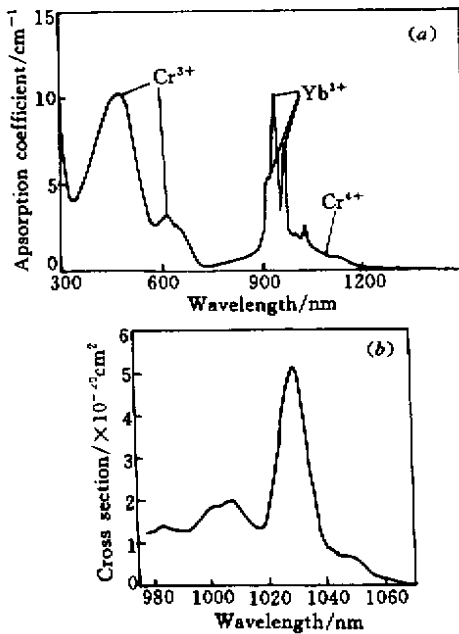


图1 0.025 at.-% Cr, 10 at.-% Yb:YAG 晶体在室温下的吸收光谱(a)和发射光谱(b)

Fig.1 Absorption spectrum (a) and emission spectrum (b) of 0.025 at.-% Cr, 10 at.-% Yb: YAG crystal at room temperature

作用下,可以发生可饱和吸收,使晶体的透过率在高光强下突然变大,腔内损耗减小,而 Q 值突然增大,从而产生被动调 Q 输出激光脉冲。随着腔内光子密度的减小,其透过率又重新恢复到小光强状态,停止脉冲输出,然后随光强在腔内的增大,重复被动调 Q 脉冲的输出。由于可饱和吸收体掺在激光增益介质中,因而双掺 Cr, Yb: YAG 晶体实现了自调 Q 激光脉冲的输出。

钛宝石激光器抽运 Cr, Yb: YAG 晶体的自调 Q 激光实验装置如图2所示,采用发射波长为 940 nm, 平均输出功率约为 1 W 的连续 Mira 钛宝石激光器作为抽运源。激光腔设计为折叠腔,抽运光经过一个焦距为 75 mm 的透镜和腔镜后,聚焦在 10 mm × 10 mm × 1 mm 的 Cr, Yb: YAG 晶体薄片上。抽运光经过聚焦后入射到晶体上的功率为 920 mW。激光腔是由曲率半径为 50 mm 的凹面镜 M₁ 和一个平面镜 M₂ 组成的。M₁ 面对入射光的平面镀 940 nm 增透膜,另一凹面镀 940 nm 增透膜和 1.03 μm 高反膜, M₁ 放置在 Cr, Yb: YAG 晶体入射面的前面作为激光腔的后腔镜。Cr, Yb: YAG 晶体抛光成平-平结构, Cr, Yb: YAG 晶体的一面镀 940 nm 和 1.03 μm 的增透膜,另一面镀 940 nm 和 1.03 μm 的高反膜。平面镜 M₂ 镀 940 nm 的高反膜和在 1.03 μm 处反射率为 97% 的反射膜作为输出耦合镜。整个激光腔的长度为 23 cm。激光实验是在 5℃ 的恒温条件下进行的,恒温是通过一个恒温水冷系统实现的。调 Q 脉冲用一个硅光电倍增管来探测,并且用一个 400 MHz 的 Tektronix TDS 380 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。钛宝石激光器输出的激光经焦距透镜整形后,得到的光斑半径为 50 μm。钛宝石激光器在连续模式下运行,经过透镜和

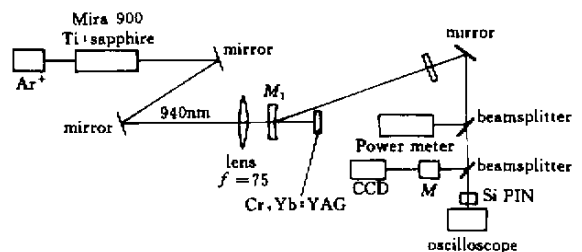


图2 钛宝石激光器抽运 Cr, Yb:YAG 晶体自调 Q 激光实验装置

Fig.2 Schematic of Ti: sapphire laser pumped Cr, Yb: YAG self- Q- switched laser experimental setup
M₁ and M₂ are cavity mirrors, M is monochromator, CCD is charge-coupled device array

腔镜 M_1 后的损失大约为 10%。

3 结果与讨论

用 0.1 at.-% Cr ,10 at.-% Yb:YAG 晶体作为激光增益介质 ,当 940 nm 的抽运功率达到 1.3 W 时并没有获得激光输出。分析其中的原因 ,主要是由于 0.1 at.-% Cr ,10 at.-% Yb:YAG 晶体中 Cr^{4+} 离子的浓度太高而导致其吸收的损耗比 Yb^{3+} 离子的增益大 ,使得 Yb^{3+} 离子不能形成激光振荡。从该实验中可看出降低 Cr^{4+} 离子的含量将有利于 Cr ,Yb:YAG 晶体的自调 Q 激光输出。鉴于前面激光实验的经验 ,生长了 0.025 at.-% Cr ,10 at.-% Yb:YAG 晶体 ,

的。典型的脉冲宽度(FWHM)为 $0.4 \mu s$ 的单个激光脉冲的波形如图 5 所示 ,脉冲能量为 $1.2 \mu J$,在重复率为 30 kHz 时其峰值功率大约为 3 W。图 6 为钛宝石激光器抽运 Cr ,Yb:YAG 晶体自调 Q 激光的输入与输出功率特性曲线 ,由图可见 ,抽运阈值功率约为 400 mW ,斜率效率为 10%。当入射到晶体上的功率为 750 mW 时 ,最大平均功率为 35 mW。

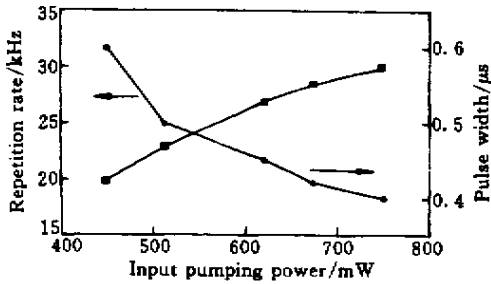


图 3 重复率和抽运功率以及脉冲宽度与抽运功率之间的实验结果

Fig.3 Rrlation between repetition rate , pulse width and input pump power

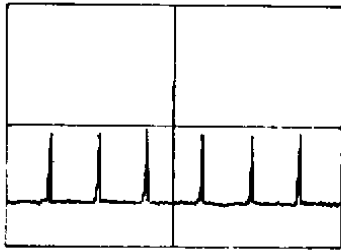


图 4 Cr ,Yb:YAG 掺杂浓度为 0.025 at.-% Cr , 10 at.-% Yb 自调 Q 激光的脉冲序列

Fig.4 Oscilloscope trace of a train of self- Q- switched pulses of Cr ,Yb:YAG laser

降低了 Cr ,Yb:YAG 晶体中 Cr^{4+} 离子的浓度。用 0.025 at.-% Cr ,10 at.-% Yb:YAG 晶体作为激光工作物质 ,输出了 $1.03 \mu m$ 的自调 Q 激光。当抽运光功率从 450 mW 增加到 750 mW 时 ,得到了脉冲宽度(FWHM)从 $0.6 \mu s$ 降到 $0.4 \mu s$ 以及重复率从 20 kHz 到 30 kHz 的一系列自调 Q 激光脉冲。典型的自调 Q 激光脉冲系列如图 4 所示 ,激光脉冲是非常稳定

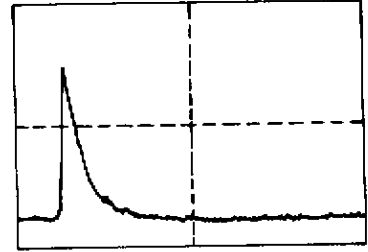


图 5 单个自调 Q 激光脉冲波形 (脉冲宽度(FWHM)为 $0.4 \mu s$)

Fig.5 Oscilloscope trace of single self- Q- switched pulse with a duration of $0.4 \mu s$

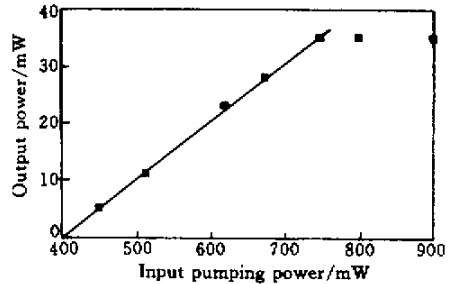


图 6 输入-输出功率的关系曲线

Fig.6 Output power vs the Ti : sapphire laser power (the solid line is the best fit of the data between 450 mW and 750 mW)

当入射功率大于 750 mW 时 ,进一步加大入射功率 ,输出的平均功率并不发生变化 ,这可能是由于 Cr ,Yb:YAG 晶体中 Cr 和 Yb 离子的配比并不是最好使得 Cr^{4+} 离子没有达到饱和吸收 , Cr^{4+} 离子在饱和与未饱和之间的吸收造成的损失比较严重 ;同时激光腔的设计不是最优化 ,以致于发生的散射、腔镜的吸收损失较为严重以及晶体在实验过程中的冷却效果并不是很好所造成的 ,加上钛宝石激光器在高功率下运转的模式失配导致入射到 Cr ,Yb:YAG 上的有效功率并没有变化 ,使输出的功率保持不变 ,因而输出的最大功率不是很大 ,而且斜率效率也较低。与掺相同浓度的 Yb:YAG 晶体相比 ,Cr ,Yb:YAG 晶体的抽运阈值较高是由于存在 Yb^{3+} 离子的自吸收

以及 Cr^{4+} 离子的吸收所造成的。

4 结 论

用钛宝石激光器作为抽运源,抽运 1 mm 厚的 Cr^{4+} , Yb^{3+} :YAG 晶体微片得到了脉冲幅度稳定的自调 Q 1.03 μm 激光输出。输出的最大平均功率为 35 mW,斜率效率为 10%,抽运阈值功率大约为 400 mW,脉冲宽度为 600 ~ 400 ns,最大重复率为 30 kHz。尽管斜率效率较低,但通过重新设计冷却系统更加有效地冷却试样,进一步改进激光腔的设计,采用二极管激光抽运源抽运 Cr , Yb :YAG 晶体,以及生长高质量, Cr/Yb 浓度配比合适的 Cr , Yb :YAG 晶体,将有可能提高激光的输出功率以及斜率效率,而且进一步压缩调 Q 激光的脉冲宽度,获得高的激光脉冲峰值输出功率。同时这一实验研究也证明了 Cr , Yb :YAG 晶体的确把 Cr^{4+} 的可饱和吸收特性和 Yb^{3+} 的激光增益特性结合到一起实现了自调 Q 激光输出。因此 Cr , Yb :YAG 晶体将是一种适合于二极管激光抽运的、新型的全固化自调 Q 激光晶体。

参 考 文 献

- 1 W. Kochner. Solid State Laser Engineering, 3rd ed. Berlin Germany: Springer-Verlag, 1992, Ch.8
- 2 J. A. Morris, C. R. Pollock. Passive Q -switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8):440 ~ 442
- 3 P. Yankov. Cr^{4+} :YAG Q -switching of Nd:host laser oscilla-

- tors. *J. Phys. D*, 1994, **27**(6):1118 ~ 1120
- 4 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively Q -switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18):1427 ~ 1429
- 5 W. Chen, K. Spariosu, R. Stultz. Cr^{4+} :GSGG saturable absorber Q -switch for the ruby laser. *Opt. Comm.*, 1993, **104**(1~3):71 ~ 74
- 6 Y. K. Kuo, M. F. Huang, M. Birnbaum. Tunable Cr^{4+} :YSO Q -switched Cr :LiCAF laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(4):657 ~ 663
- 7 S. Zhou, K. K. Lee, Y. C. Chen. Monolithic self- Q -switched Cr , Nd :YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7):511 ~ 512
- 8 D. S. Sumida, T. Y. Fan. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid state laser media. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17):1343 ~ 1345
- 9 T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6):1457 ~ 1459
- 10 H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder *et al.*. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers. *IEEE J. Sol. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**:105 ~ 116
- 11 Dong Jun, Deng Peizhen, Xu Jun. The growth of Cr^{4+} , Yb^{3+} :yttrium aluminum garnet (YAG) crystal and its absorption spectra properties. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**(1~2):163 ~ 167
- 12 Jun Dong, Peizhen Deng, Jun Xu. Study of the effects of Cr ions on Yb in Cr , Yb :YAG crystal. *Opt. Comm.*, 1999, **170**(4~6):255 ~ 258
- 13 N. B. Angert, N. I. Borodin, V. M. Garmash *et al.*. Lasing due to impurity color centers in yttrium aluminum garnet crystals at wavelengths in the range 1.35 ~ 1.45 μm . *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, **18**(1):73 ~ 74