

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0447-04

自调 Q 激光晶体 Cr⁴⁺, Yb³⁺:YAG 光谱及其 激光特性研究*

董俊 邓佩珍

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 用连续的钛宝石激光器作为抽运源, 在室温下首次实现了 Cr, Yb:YAG 晶体的自调 Q 激光输出。在激光实验过程中, 获得了在 1.03 μm 平均功率为 75 mW 和脉宽(FWHM)为 0.4 μs 的自调 Q 激光。激光实验表明了 Cr, Yb:YAG 晶体的确把 Cr⁴⁺ 离子的可饱和吸收特性和 Yb³⁺ 的激光增益特性结合到了一起, 实现了自调 Q 激光输出, 使得 Cr, Yb:YAG 晶体将成为一种新型的有发展前景的全固化的自调 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 TN248.1 文献标识码 A

Study on the Spectral and Laser Performance of Cr, Yb:YAG Self-Q-switched Laser Crystal

DONG Jun DENG Pei-zhen

(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 75 mW at 1.03 μm with a pulse width (FWHM) as short as 0.4 μs was attained. The laser experiment demonstrated that the Cr, Yb:YAG crystal exactly combines the Cr⁴⁺ saturable absorber and Yb³⁺ 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的脉冲结构紧凑、经济、全固化的光源, 可广泛应用于光雷达、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]由于其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运行。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 Cr⁴⁺ 离子的晶体如 Cr⁴⁺:YAG^[3]、Cr⁴⁺:Mg₂SiO₄^[4]、Cr⁴⁺:GSGG^[5] 和 Cr⁴⁺:YSO^[6] 等作为掺 Nd³⁺ 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 运行^[7]。与 Nd³⁺ 离子相比, Yb³⁺ 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抽运。同时 Yb:YAG 晶体具有长的荧光寿命(951 ± 15 μs)^[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

*国家自然科学基金(6998806)、国家科委 863-416 资助课题。

光光谱特性^[11,12]。在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 原理及实验过程

在 Yb:YAG 晶体中掺入 Cr⁴⁺ 离子对晶体的能级结构并未产生较大的影响。对 Cr, Yb:YAG 晶体进行了吸收和荧光光谱的测试。Cr, Yb:YAG 晶体的室温吸收光谱如图 1 所示,在可见光范围内,其特性与 Cr:YAG 的吸收光谱特性^[13]一样,都有两个很强很宽的吸收带,中心位于 440 nm 和 605 nm,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} 的跃迁;中心位于 1030 nm 的吸收带对应于 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 1030 nm 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 nm ~ 1055 nm 范围内(如图 2 所示), 但强的发射峰位于 1030 nm, 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, 这样双掺 Cr, Yb:YAG 晶体实现了自调 Q 激光脉冲输出。

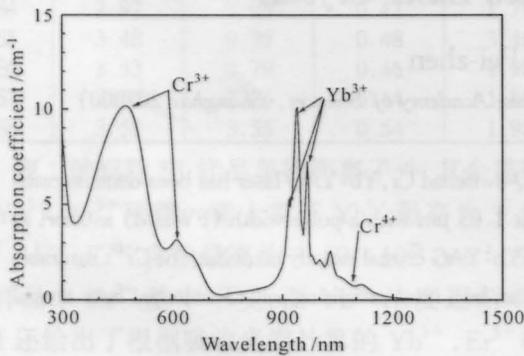


图1 0.025at.-% Cr, 10 at. % Yb:YAG 晶体在室温下的吸收光谱

Fig. 1 The absorption spectrum of 0.025at.-%Cr, 10at.-% Yb:YAG crystal at room temperature

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 3 所示, 采用发射波长为 940 nm、

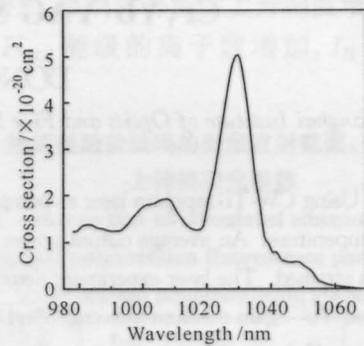


图2 0.025at.-% Cr, 10 at.-% Yb:YAG 晶体在室温下的发射光谱

Fig. 2 The emission spectrum of 0.025at.-% Cr, 10at.-% Yb:YAG crystal at room temperature

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

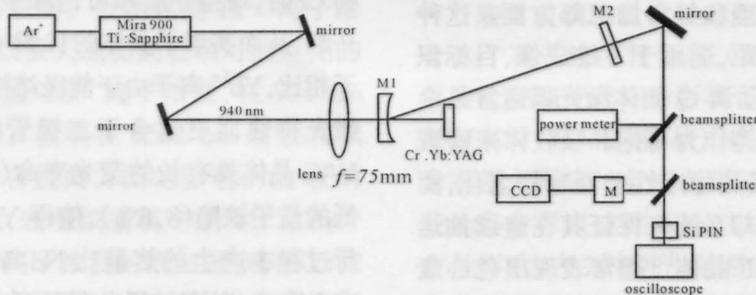


图3 钛宝石激光器抽运 Cr, Yb:YAG 晶体自调 Q 激光试验装置. M₁, M₂ 为腔镜, M 为单色仪

Fig. 3 The 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

$\times 1 \text{ mm}$ 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 M_1 和平面镜 M_2 组成。凹面镜 M_1 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 1030 nm 的高反膜, M_1 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, 晶体的一面镀 940 nm 和 1030 nm 的增透膜, 另一面镀 940 nm 和 1030 nm 的高反膜。平面镜 M_2 镀 940 nm 的高反膜和在 1030 nm 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 。激光实验在通过恒温水冷系统实现的 5°C 恒温条件下进行硅光电倍增管探测调 Q 脉冲, 并且用 400 MHz 的 Tektronix TDS 380 数字示波器来记录调 Q 波形。用激光功率计来测量激光输出功率。钛宝石激光器输出的激光经透镜整形后, 得到的光斑半径为 $50 \mu\text{m}$ 。钛宝石激光器是在连续的模式下运行, 经过透镜和腔镜 M_1 后的损失大约为 10% 。

3 结果与讨论

用 $0.1 \text{ at. \% Cr, } 10 \text{ at. \% Yb: YAG}$ 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, 我们认为这主要是由于 $0.1 \text{ at. \% Cr, } 10 \text{ at. \% Yb: YAG}$ 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。从该实验中我们得出降低 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, 我们生长了 0.025 at. \% Cr,

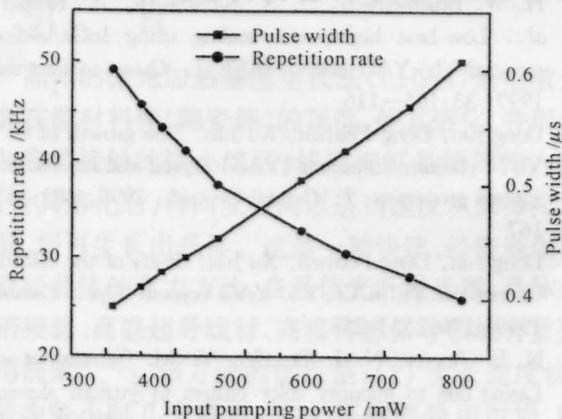


图4 重复率和抽运功率以及脉冲宽度与抽运功率之间的实验结果

Fig. 4 The relation between repetition rate, pulse width and input pump power, respectively

$10 \text{ at. \% Yb: YAG}$ 晶体, 降低了 Cr, Yb: YAG 晶体中 Cr^{4+} 离子的浓度。用该晶体作为激光工作物质, 输出了 1030 nm 的自调 Q 激光, 当抽运光功率从 300 mW 增加到 810 mW 时, 得到了脉冲宽度 (FWHM) 从 $0.6 \mu\text{s}$ 降到 $0.4 \mu\text{s}$ 以及重复率从 25 kHz 到 50 kHz 的一系列自调 Q 激光脉冲 (如图 4 所示)。典型的自调 Q 激光脉冲系列如图 5 所示。从图 5 可以看到激光脉冲是非常稳定的。典型的脉冲宽度 (FWHM) 为 $0.4 \mu\text{s}$ 的单个激光脉冲的波形如图 6 所示, 脉冲的能量为 $1.5 \mu\text{J}$, 在重复率为 50 kHz 时其峰值功率大约为 3.75 W 。图 7 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。从图 7 可以看到, 抽运的阈值功率约为 300 mW , 斜率效率为 15% 。当入射到晶体上的功率为 810 mW 时, 最大的平均功率为 75 mW 。

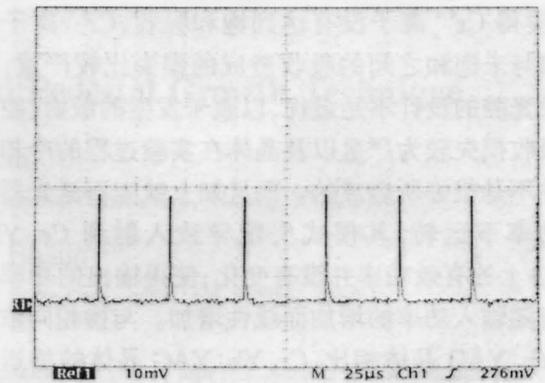


图5 Cr, Yb: YAG (掺杂浓度为 $0.025 \text{ at. \% Cr, } 10 \text{ at. \% Yb}$) 自调 Q 激光的脉冲序列

Fig. 5 The oscilloscope trace of a train of self-Q-switched pulses of Cr, Yb: YAG laser

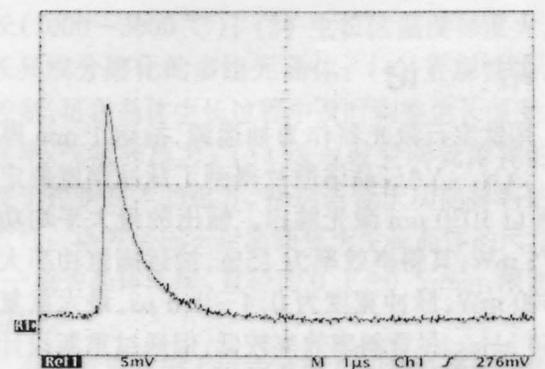


图6 单个自调 Q 激光脉冲波形 (脉冲宽度 FWHM 为 $0.4 \mu\text{s}$)

Fig. 6 The oscilloscope trace of single self-Q-switched pulse with a duration of $0.4 \mu\text{s}$

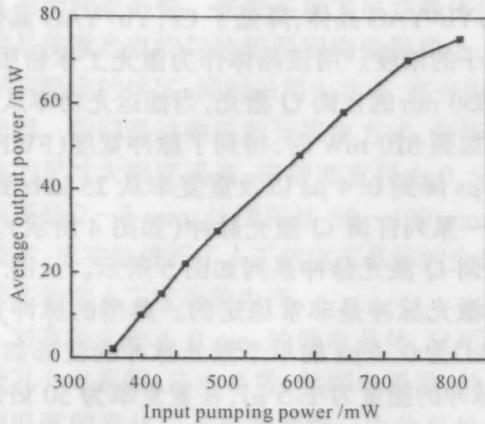


图7 输入输出功率的关系曲线

Fig. 7 The output power vs the Ti:sapphire laser power

同时当入射功率大于750 mW时,进一步加大入射功率,输出的平均功率增加缓慢,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,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的冷却效果并不是很好所造成的。而且加上钛宝石激光器在高功率下运转,其模式失配导致入射到Cr, Yb:YAG上的有效功率并没有变化,使得输出的功率并没有随输入功率的增加而线性增加。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;同时激光斜率效率比同样浓度的Yb:YAG晶体的低是由于存在 Cr^{4+} 离子的吸收以及Cr, Yb:YAG晶体中的Cr/Yb浓度比并不是最合适所造成的。

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 1030 μm 激光输出。输出的最大平均功率为75 mW,其斜率效率为15%,抽运阈值功率大约为300 mW,脉冲宽度为0.4~0.6 μs ,最大重复率为50 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晶体,以及生长高质量,Cr/Yb浓度配比合适的晶体,将有可能提高激

光的输出功率以及斜率效率,并进一步压缩调Q激光的脉冲宽度,获得高的激光脉冲峰值输出功率。同时这一激光实验研究也证明了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(LD)抽运的新型、结构紧凑、全固化、有发展潜力的自调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 oscillators. *J. Phys. D*, 1994, **27**(6):1118~1120
- 4 J. J. Zayhowski, C. Dill. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**:1427~1429
- 5 W. Chen, K. Spariosu, R. Stultz. Cr^{4+} :GSGG saturable absorber Q-switched for the ruby laser. *Opt. Comm.*, 1993, **104**: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**:657~663
- 7 S. Zhou, K. K. Lee, Y. C. Chen. Monolithic self-Q-switched Cr,Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**: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**:1343~1345
- 9 T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**: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. Quant. Electron.*, 1997, **33**:105~116
- 11 Dong Jun, Deng Peizhen, Xu Jun. The growth of Cr^{4+} , Yb^{3+} :yttrium aluminum (YAG) crystal and its absorption spectra properties. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**:163~167
- 12 Dong Jun, Deng Peizhen, Xu Jun. Study of the effects of Cr ions on Yb in Cr, Yb:YAG crystal. *Opt. Comm.*, 1999, **170**: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