

一种新型固体 Q 开关—— $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的实验研究

雷海容 刘宏发 严柏生 张国威

徐天华

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081) (西南技术物理所, 成都 610041)

摘 要 对一种适用于 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 激光系统的新型被动 Q 开关——掺铬钇铝石榴石 ($\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$) 进行了实验研究, 得到单脉冲能量为 145 mJ、脉宽为 30~40 ns、效率接近 1%、动静比达 40% 以上的结果。

关键词 被动 Q 开关, $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$, $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$.

四价铬离子在各种基质中的吸收特性预示了其作为固体 Q 开关的可能。最近, $\text{Cr}^{4+} : \text{GSGG} (\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12})$ 首次被用来作为红宝石激光器被动 Q 开关, 得到输出能量为 100 mJ 和脉宽 27 ns 的单脉冲, 动静比为 25~30%^[1]。Andrauskas 在灯泵和二极管泵浦的 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 激光器中成功地实现了用 $\text{Cr}^{4+} : \text{GSAG} (\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Al}_2\text{O}_{12})$ 和 $\text{Cr}^{4+} : \text{GIGG} (\text{Gd}_3\text{In}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12})$ 作被动 Q 开关的运转, 认为掺四价铬的单晶将是被动 Q 开关的极佳候选者^[2]。最近, 加拿大的 Miller 等用 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 在二极管泵浦的 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 系统中进行了一系列实验, 对其稳定性和破坏阈值进行了研究, 得到令人满意的结果^[3]。本文首次报道用 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 作被动 Q 开关获得单脉冲大于 100 mJ 的实验结果。实验表明 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的被动 Q 开关许多性能优于染料片。

1 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体特性

$\text{YAG} (\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12})$ 属于石榴石晶体家族, 具有立方晶格结构 $I_3d(O_h^2)$, 晶格常数为 1.201 nm。三个 Y^{3+} 在十二面体格位上 (222 对称), 二个 Al^{3+} 在八面体格位上 ($\bar{3}$ 对称, 占 Al^{3+} 的 40%), 另外三个 Al^{3+} 则在四面体格位上 ($\bar{4}$ 对称, 占 Al^{3+} 的 60%)。一般采用提拉法生长。掺 Cr^{4+} 的晶体暗褐色, 掺杂时 Cr^{4+} 将取代四面体格位上的 Al^{3+} , 熔料中 Cr 浓度为 0.04 at%, 为保证铬离子的 +4 价态, 掺 0.02 at% 的 Ca 或 Mg, 进行电荷补偿。

$\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的吸收谱如图 1 所示, 主要吸收带有 0.48 μm 、0.65 μm 和 1 μm , 其中 0.48 μm 的吸收带是由八面体格位上的 Cr^{4+} 电荷转移或色心等造成的, 其余吸收带是四面体格位上的 Cr^{4+} 所产生。其中 0.65 μm 为 $^3A_2 \rightarrow ^3T_1$ 的吸收跃迁, 1 μm 附近的红外吸收带 $^3A_2 \rightarrow ^3T_2$ 跃迁的结果^[4]。图 2 为 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 的能级图。

$\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 吸收截面的测定有一定难度, 主要因为 1) 晶体中同时存在 Cr^{3+} , 而 Cr^{4+} 和

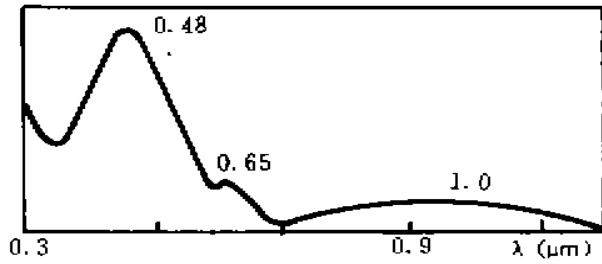


Fig. 1 Room temperature absorption spectra of Cr⁴⁺ : YAG

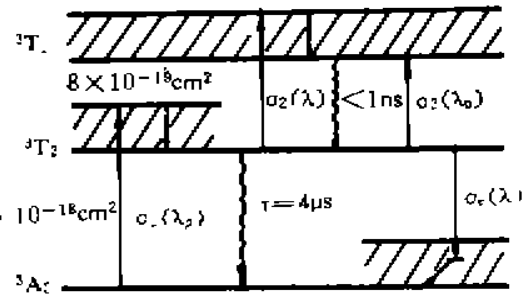


Fig. 2 Energy diagram level of Cr⁴⁺ : YAG

Cr³⁺ 的比例难于确定；2) 在 1 μm 附近存在受激态吸收。国外报道的吸收截面数值差异较大，本文采用美国乔治亚大学 Eilers 等提供的数据： $\sigma_1 = 5.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ， $\sigma_2 = 8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。从本实验所用的 Cr⁴⁺ : YAG 的吸收光谱可知，1.064 μm 处(扣除菲涅尔反射后)的小信号透过率为 $T_0 = 23\%$ ，估计 Cr⁴⁺ 浓度为 $1.7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 。

2 Cr⁴⁺ : YAG 的 Q 开关机理和实验装置

在腔内插入可饱和吸收体后，其损耗与腔中光强有强烈的非线性关系。泵浦初期，工作物质处于贮能阶段。腔内的光子数少，Q 开关的透过率为 $T \approx T_0$ ，吸收损耗为 $1 - T_0$ 。设此

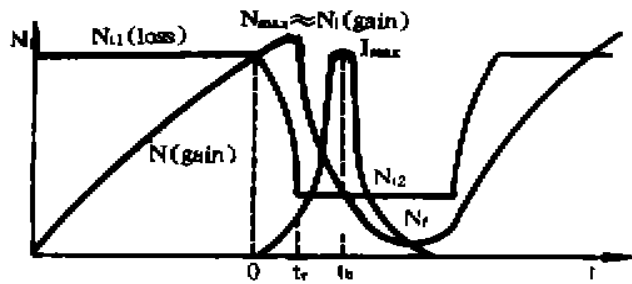


Fig. 3 Performance of Cr⁴⁺ : YAG Q-switch

时对应激光器阈值的粒子数反转密度为 N_{i1} 。当工作物质粒子数反转密度到达 N_{max} 时，谐振腔内激光振荡的增强使 Cr⁴⁺ : YAG 迅速饱和，晶体吸收损耗跃迁变为 $1 - T_s$ (实验测得 $T_s \approx 60 \sim 70\%$)，相当于振荡的阈值粒子数反转密度降为 N_{i2} ，而 N_{max} 便成为这个低振荡阈值条件下的初始粒子反转密度 N_i ， $N_i \gg N_{i2}$ ，于是激光器输出一个巨脉冲，如图 3 所示。形成巨脉冲后，若泵灯继续抽运，有可能形成第二、第三个脉冲……。

谐振腔为平-平腔。输出镜的透过率分别为 80% 和 60%，腔长为 26 cm，Nd³⁺ : YAG 为 $\varnothing 6 \times 90 \text{ mm}$ ，Cr⁴⁺ : YAG 为 $\varnothing 6.5 \times 15 \text{ mm}$ ，位于全反镜和激光介质之间，两端面镀增透膜。

3 Cr⁴⁺ : YAG 被动 Q 开关输出特性

图 4 所示为 Cr⁴⁺ : YAG 被动 Q 开关激光器能量输出特性，重复频率为 1.5 Hz。输出曲线为近似等高梯形。当 $T_s = 80\%$ 时，阈值为 15.125 J，单脉冲输出为 139 mJ，对应静态输出为 300 mJ，坪宽为 6.66 J，阈值处效率达 0.9%，动静比为 46%。在同样重复频率下， $T_s = 60\%$ 时，阈值降为 14.045 J，单脉冲输出为 114 mJ，对应静态能量为 250 mJ，阈值处效率、动静比略有降低，这是符合常理的。

在 $T_s = 60\%$ 、重复频率为 7.5 Hz 时，阈值与同样透过率，而重复频率为 1.5 Hz 时相比几乎没有变化，单脉冲能量提高到 145 mJ，对应静态输出 344 mJ，阈

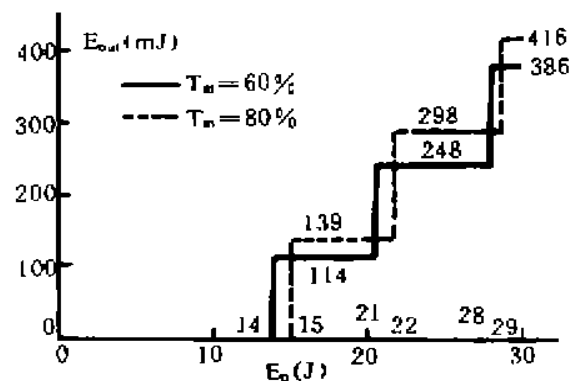


Fig. 4 Output energy performance of Cr⁴⁺ : YAG Q-switch

值处效率约 1%，输出动态能量波动为 6% 左右，与静态时波动相当。

图 5(a) 为 $T_m = 80\%$ 时的单脉冲输出波形，图 5(b) 为 $T_m = 60\%$ 的单脉冲输出波形。它们的脉宽无明显差别，约 $\tau = 30 \sim 40$ ns。

图 6(a) 为 $T_m = 80\%$ ，泵浦 22 J 时的双脉冲输出波形，腔长 $L = 52$ cm 时 $t_{1-2} = 70$ μ s。而在同样泵浦水平下，腔长 $L = 26$ cm， $t_{1-2} = 45$ μ s，如图 6(b) 所示。在实验中观察到，随着泵浦水平的提高， t_{1-2} 随之减小，这是由于在高泵浦水平下建立第二个脉冲所需时间少的缘故。



Fig. 5 Single output pulse

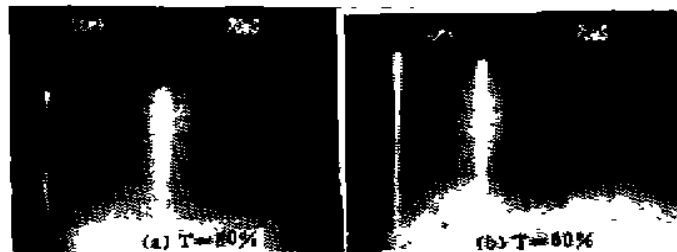


Fig. 6 Double output pulses

结 论 Cr⁴⁺:YAG 由于其物理性能和化学性能优良，在 Nd³⁺:YAG 被动 Q 开关的实验中显示出优越性，与染料片相比，具有较高阈值效率(染料为 0.3~0.5% 左右)，成本也不高，将是染料片的换代产品，尤其在军用激光及激光测距等应用和高重复率运转下，更显示其优越性，其主要性能已达到实用的要求。

参 考 文 献

- [1] W. Chen, K. Spariosu, R. Stultz *et al.*, Cr⁴⁺:GSGG saturable absorber Q-switch for the ruby laser. *Opt. Commun.*, 1993, 104(1,2,3): 71~74
- [2] D. M. Andrauskas, C. Kennedy, Tetravalent chromium solid-state passive Q-switch for Nd:YAG laser systems. *OSA Proceeding Series*, 1993, 10: 393~397
- [3] J. J. Miller, A. J. Alcock, J. E. Bernard, Experimental investigation of Cr⁴⁺:YAG as a passive Q-switch. *Technical Digest of Advanced Solid-State Lasers*, New Mexico, U. S. A., 1982: 239~241
- [4] M. G. Zverev, A. V. Shestakov, Spectroscopic properties of Cr⁴⁺:Y₃Al₅O₁₂ crystals. *OSA Proceeding Series*, 1989, 5: 66~71

Experimental Study on a Novel Solid-State Q-Switch —— Cr⁴⁺:YAG

Lei Hairong Liu Hongfa Yuan Baisheng Zhang Guowei

(Department of Opto-Electron Engineering Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Xu Tianhau

(Southwest Institute of Technical Physics, Chendu 610041)

(Received 8 July 1995)

Abstract The performance of Cr⁴⁺:YAG as a passive Q-switch for Nd³⁺:YAG laser has been studied experimently. The single pulse energy of 145 mJ, pulse width of 30~40 ns and the efficiency of 1% are obtained.

Key words passive Q-switch, Cr⁴⁺:YAG, Nd³⁺:YAG.