

Ti³⁺ 离子浓度对掺钛蓝宝石激光器 输出特性的影响*

杨晓东 徐 冰 李传东 林礼煌 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 首次从理论上研究了掺钛蓝宝石晶体中 Ti³⁺ 离子浓度对脉冲式激光泵浦的掺钛蓝宝石激光器的输出特性的影响。并用五种不同 Ti³⁺ 离子浓度的掺钛蓝宝石晶体进行了实验研究, 实验结果与理论计算符合得较好。

关键词 Ti³⁺ 离子浓度, 掺钛蓝宝石激光器, 斜率效率, 吸收系数 α_r 。

1 引 言

自 1982 年掺钛蓝宝石晶体问世以来^[1], 掺钛蓝宝石激光器的发展十分迅速。极宽的激光可调谐范围(660~1100 nm), 超短脉冲的产生, 高的输出功率, 使其成为目前在红外到可见光波段性能最好的固体可调谐激光器。采用非线性技术进行波段扩展^[2,3], 掺钛蓝宝石激光器可实现从近紫外到近红外的全波段可调谐。由于掺钛蓝宝石中 Ti³⁺ 离子浓度的变化引起晶体的品质因素的变化, 从而影响掺钛蓝宝石激光器的输出性能。Alfrey 对连续泵浦的掺钛蓝宝石激光器的输出功率与掺钛蓝宝石晶体对泵浦光的吸收系数 α_r 和晶体长度 L 值间的关系进行了研究^[4], 但脉冲式激光泵浦的掺钛蓝宝石激光器的输出能量与掺钛蓝宝石晶体的 α_r 的关系尚未见有过报道。本文首次从理论及实验上研究了不同掺 Ti³⁺ 离子浓度的增益开关型掺钛蓝宝石激光器的输出特性, 理论计算与实验结果符合得较好。

2 理论分析

在掺钛蓝宝石晶体中, Ti³⁺ 离子的浓度可以按 Lacovara 等提出的理论模型进行估算^[5]:

$$[Ti^{3+}] = K^2 C_0 (1 - W_s/W_1) - 1, \quad (1)$$

其中 C_0 是熔体中 Ti³⁺ 的初始浓度; W_s 是晶体的重量, W_1 是总重量, K 是分凝系数。本文提到的 $[Ti^{3+}]$ 都是指 Ti³⁺ 在晶体中的重量百分比浓度。

也可采用 Aggrarwal 等提出的计算式^[6]进行估算:

$$[Ti^{3+}] = 2ba_r \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1994年2月1日; 收到修改稿日期: 1994年4月11日

α_r 为晶体对泵浦光的吸收系数, b 为比例常数, 对不同的泵浦光, 对应有不同的 b 值(如对 490 nm 泵浦光, b 的值为 0.032), 利用(2)式只需测出 α_r , 便可估算出 $[Ti^{3+}]$, α_r 表征了 Ti^{3+} 离子在晶体中的浓度, 本文便从掺钛蓝宝石晶体对泵浦光的吸收系数 α_r 的角度来进行研究。

掺钛蓝宝石激光器为四能级系统, 其速率方程为:

$$dN/dt = (n_3 - g_3 n_2/g_2) \delta_{32} \nu NL/d - N/\tau_R \quad (3)$$

$$dn_4/dt = n_1 W_{14} - n_4 S_{43}/\eta_1 \quad (4)$$

$$dn_3/dt = - (n_3 - g_3 n_2/g_2) \sigma_{32} \nu N - n_3 A_{32}/\eta_2 + n_4 S_{43} \quad (5)$$

$$dn_1/dt = n_2 S_{21} - n_1 W_{14} \quad (6)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n \quad (7)$$

其中, N 为光子数密度总和, n_m 是单位体积内处于 E_m 能级的原子数, n 是总粒子数, A_{32} 为 E_3 能态到 E_2 能态的自发辐射爱因斯坦系数, S_r 为 E_r 能态到 E_r 能态的无辐射跃迁几率, W_{14} 是受激吸收跃迁几率, g_m 是 E_m 能态的简并度, σ_{32} 为中心频率处的发射截面, ν 为钛宝石中的光速, L 为掺钛蓝宝石晶体的长度, d 为腔长, τ_R 是光腔内的光子寿命。当用短脉冲(泵浦时间 $t_0 \ll$ 自发辐射寿命 τ) 对掺钛蓝宝石晶体进行泵浦时, 由于 $n_2 \approx 0$, 所以由速率方程组中(4)、(5)、(6)、(7) 可解得晶体需吸收的光泵能量阈值为:

$$E_{\mu} = h\nu_{14} \Delta n_1 V / \eta_1 \quad (8)$$

V 为掺钛蓝宝石棒的体积(假设泵浦光充满整个介质); ν_{14} 是 E_1 到 E_4 能级的跃迁频率; η_1 为 E_4 能级向 E_3 能级无辐射跃迁的量子效率; Δn_1 为 E_3 能级集居数密度阈值:

$$\Delta n_1 = \delta / \sigma_{32} L \quad (9)$$

代入(8)式得到:

$$E_{\mu} = h\nu_{14} \delta V / \eta_1 \sigma_{32} L = h\nu_{14} \delta A / \eta_1 \sigma_{32} \quad (10)$$

其中 A 为掺钛蓝宝石棒的横截面积; $\delta = -T \ln(1-T)$ 为单程损耗, T 为激光腔的输出镜透过率。

当泵浦能量为 E_r 时, 掺钛蓝宝石棒吸收的能量为 ηE_r , 其中 $\eta = 1 - \exp(-\alpha_r L)$ 为棒对泵浦光的吸收几率, α_r 为晶体对泵浦光的吸收系数。

由激光阈值条件, 可得到掺钛蓝宝石激光器腔内激光的能量为:

$$E = h \nu_{32} \left(\frac{E_r \eta_1}{h\nu_{14}} - \Delta n_1 V \right) \quad (11)$$

ν_{32} 是掺钛蓝宝石激光器的激光频率。

将(9)、(10)式代入(11)式, 并考虑激光器输出反射镜的透过率 T , 得到激光器的输出能量为:

$$E_{out} = \frac{\nu_{32}}{\nu_{14}} \eta_0 \eta_1 E_{\mu} \left(\frac{\eta E_r}{E_{\mu}} - 1 \right) \quad (12)$$

$\eta_0 = T/2\delta$ 是谐振腔效率。

取 $T = 50\%$, $\sigma_{32} = 3.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $E_r = 5 \text{ mJ}$, $\eta_1 = 95\%$, 假设采用平行光对晶体进行泵浦, 由于实际泵浦光的光斑面积比晶体的横截面积要小得多, 因此晶体横截面积的变化对实验结果的影响可以忽略, 所以取 A 为泵浦光在垂直于光轴方向的横截面积, $A = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 。晶体沿泵浦光方向长度取 $L = 2 \text{ cm}$ 。泵浦光用波长为 532 nm 的绿光, 激光输出波长为 780

nm, 以 α_p 为变量, 由公式(10)、(12) 得到掺钛蓝宝石激光器的输出能量与 α_p 值间的关系曲线, 如图 1 所示。在图 1 中 K 点的左侧(α_p 较小), 随 α_p 值的增大, 激光器输出能量迅速提高, 激光器的斜率效率也迅速增加; 在 K 点的右侧(α_p 较大), 随 α_p 增大, 激光器的输出能量和斜率效率的增加变得很缓慢。

由于掺钛蓝宝石晶体在生长过程中, 基质材料 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是高温难熔化合物, 而且 Ti^{3+} 离子在晶体中的分凝系数很小, 故难以生长高掺 Ti^{3+} 离子的晶体。而高掺钛离子浓度的蓝宝石激光晶体是实现超短脉冲、制作可调谐 TW(10^{12} W) 系统能量放大器所必需的。作者用上海光机所生长的五种不同 α_{532} (泵浦光为 532 nm 绿光, $\alpha_p = \alpha_{532}$) 的掺钛蓝宝石晶体, 对脉冲式泵浦的掺钛蓝宝石激光器的输出能量进行了实验研究。

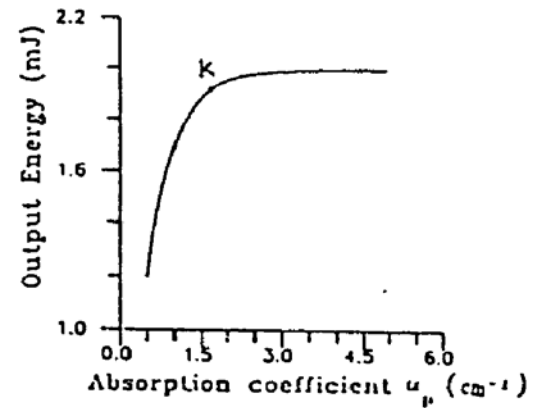


Fig. 1 The dependence of the output energy on the absorption coefficient α_p

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。I 为泵浦源, 是一台脉冲式的、用 LiF:F_2^- 色心晶体进行被动调 Q 的 Nd:YAG 激光器, 其中 M_1 对 1064 nm 光全反射($r = \infty$), M_2 对 1064 nm 光透过率为 80%

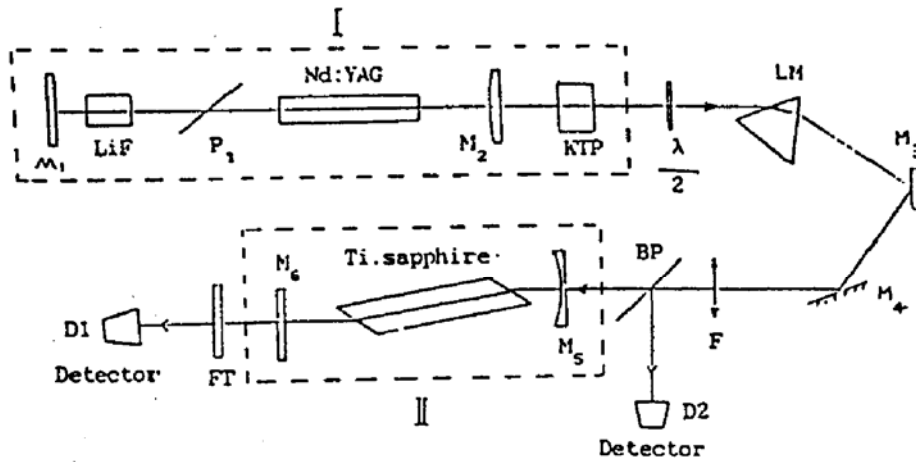


Fig. 2 The experimental setup

($r = 2669.7$ mm), P_1 为起偏器, 调 Q 激光脉冲经 KTP 倍频后, 用半波片调整倍频光的偏振方向, 经棱镜 LM 将基频光去掉, 反射镜 M_3 对 532 nm 光为 45° 全反, 用凸透镜 F 将倍频光会聚后作为掺钛蓝宝石晶体的纵向泵浦光。II 为掺钛蓝宝石激光器, 采用平凹腔结构, 由双色镜 M_5 ($r = 500$ mm, 对 780 nm 光全反射, 对 532 nm 光透过率约为 90%)、输出耦合镜 M_6 ($r = \infty$, 对 780 nm 光的透过率为 50%) 和掺钛蓝宝石棒组成, 腔长为 50 mm。FT 为滤光片, 对 780 nm 光的透过率约为 76%, 对 532 nm 成分几乎全部吸收。为了提高泵浦效率, 同时又避免掺钛蓝宝石晶体被破坏, 泵浦光的光腰位于掺钛蓝宝石晶体后表面约 2 mm 左右。用能量计 D_1 测量掺钛蓝宝石激光器的输出能量, 能量计 D_2 用于测量泵浦光能量。

4 结果及讨论

实验测量了五种样品的输出能量和泵浦能量的关系,结果如图3所示,图中曲线1,3,4,5对应的晶体的长度 L (沿泵浦光方向)均相同,但 α_{532} 值不同,即掺 Ti^{3+} 离子浓度不同,因此激光器的斜率效率也不同。在相同泵浦能量下,随着 α_{532} 的增加,激光器的输出能量增大,激光器的斜率效率也增大。当 α_{532} 值比较小(如样品1,2,3)时,这种变化较快,而当 α_{532} 值较大(如样品4,5)时,斜率效率的变化就很缓慢,这和图1理论曲线是符合的。另外图中样品2和3有相同的 α_{532} 值,但它们的 L 值不同,得到激光器的斜率效率也不同。表1给出了每一种晶体对应的激光器的斜率效率。

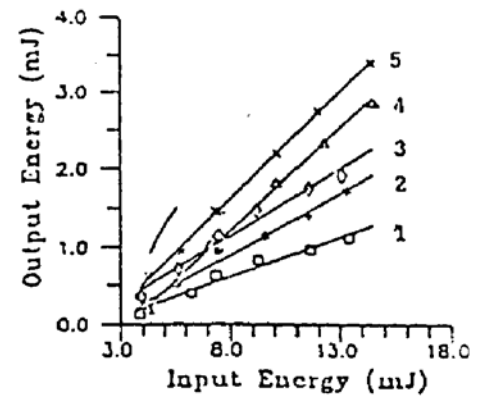


Fig. 3 The dependence of the output energy on the input energy

□: sample 1, * : sample 2, ◇: sample 3, △: sample 4, ×: sample 5

Table 1. Slop efficiency of the five samples

sample No.	absorption coefficient (α , cm^{-1})	crystal size (mm^3)	slop efficiency (%)
sample 1	1.34	$6 \times 6 \times 20$	10.24
sample 2	1.90	$\Phi 9 \times 15$	15.84
sample 3	1.90	$\Phi 6 \times 20$	17.17
sample 4	2.47	$5.2 \times 5.2 \times 20$	26.34
sample 5	3.20	$\Phi 6.4 \times 20$	27.75

可见,当掺钛蓝宝石激光器用脉冲式激光进行泵浦时,在一定范围内,适当增大晶体对泵浦光的吸收系数 α_{532} ,有利于得到掺钛蓝宝石激光器高的能量输出。实验还表明,晶体的长度也对激光器的斜率效率产生影响,由于在引入长度的变化时,要考虑诸多因素,比较复杂,将在以后的文章中给出。

感谢上海光机所邓佩珍研究员提供掺钛蓝宝石晶体,感谢欧阳斌副研究员在实验及理论研究中的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] P. F. Moulton, *Solid State Research Report*. DTIC AD-A124305/4 (1982, 3). M. I. T. Lincoln Lab, Lexington, 1982, pp. 15~21
- [2] G. A. Rines, P. F. Moulton, Performance of gain switched $Ti:Al_2O_3$ unstable resonator lasers. *CLEO' 90*, Anaheim, May 21~25, 1990, Paper CTUN3, pp. 206~208
- [3] B. W. Peuse *et al.*, Single frequency stabilized doubled titanium ring laser. *CLEO' 90*, Anaheim, May 21~25, 1990, Paper CTUN2, pp. 206
- [4] A. J. Alfrey, Modeling of longitudinally pumped CW Ti :sapphire laser oscillators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, QE-25(4): 760~766
- [5] P. Lacovara, L. Esterowitz, M. kokta, Growth, spectroscopy, and lasing of titanium-doped sapphire. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, QE-21(10): 1614~1618

- [6] R. L. Aggarwal, A. Sanchez, R. E. Fahey *et al.*, Magnetic and optical measurements on $Ti:Al_2O_3$ crystals for laser applications: Concentration and absorption cross section of Ti^{3+} ions. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(20): 1345~1347

Effect of Ti^{3+} Concentration on the Performance of a $Ti:Sapphire$ Laser

Yang Xiaodong Xu Bing Li Chuandong Lin Lihuang Xu Zhizhan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 1 February 1994; revised 11 April 1994)

Abstract The effect of Ti^{3+} concentration on the performance of $Ti:sapphire$ laser, pumped by a pulsed laser, is analysed theoretically. With five different concentration Ti^{3+} -doped $Ti:sapphire$ crystals, experimental study on the performance of $Ti:sapphire$ laser is conducted. The results coincide fairly well with the theoretical analysis.

Key words Ti^{3+} concentration, $Ti:sapphire$ laser, slop efficiency, absorption coefficient α .