

文章编号: 1000-5013(2007) 03-0256-04

532 nm 激光脉冲抽运的钛蓝宝石增益开关激光器

李立卫, 王加贤, 张凤娟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用 Nd: YAG 调 Q 倍频激光器抽运钛蓝宝石(Ti: Al₂O₃) 晶体, 实现钛蓝宝石激光器的增益开关运转. 当用脉宽为 32 ns, 能量为 21 mJ 的 532 nm 绿光脉冲抽运时, 在 5 cm 腔长情况下, 获得比抽运光脉冲窄的 15 ns 脉宽的激光脉冲, 脉冲能量为 0. 86 mJ, 激光中心波长为 780 nm. 理论上, 从速率方程组出发, 计算输出激光的脉冲宽度, 研究激光器抽运能量、腔长及腔结构对输出特性的影响.

关键词: Ti: Al₂O₃; 增益开关; 调 Q 激光器; 腔结构; 激光脉冲

中图分类号: TN 248. 1

文献标识码: A

掺钛蓝宝石(Ti: Al₂O₃) 晶体是掺有三价钛离子的氧化铝单晶, 其物理化学性质与红宝石类似, 热导率约为 Nd: YAG 的 3 倍, 稳定性好、熔点高、硬度大. 室温时, 掺钛蓝宝石具有大约 250 nm(400~ 650 nm) 宽带吸收光谱, 其荧光光谱为 600~ 1 200 nm, 目前已实现调谐范围 650~ 1 200 nm 的激光运转^[1], 其中 780 nm 激光在医学上得到了广泛的应用. 由于掺钛蓝宝石晶体荧光寿命短(约为 3. 2 μs), 采用闪光灯抽运很难实现运转, 所以需采用增益开关技术. 1993 年, 徐冰等^[2]对脉冲激光抽运钛蓝宝石做了理论和实验研究, 在绿光光脉冲能量 10 mJ, 脉宽为 22 ns 的抽运下, 得到 6 ns 的输出. 本实验采用增益开关技术, 在脉冲能量 21 mJ, 脉宽 32 ns 的绿光脉冲抽运下得到 15 ns 的输出光脉冲. 与抽运光脉冲相比, 其脉冲宽度压缩了近两倍.

1 理论分析

1. 1 Ti: Al₂O₃ 晶体的吸收光谱及荧光光谱

掺钛蓝宝石是目前最为广泛使用的一种可调谐固体激光器, 它由在 Al₂O₃ 晶体中掺入 Ti³⁺ 取代 Al³⁺ 而制成, Ti: Al₂O₃ 的掺杂质量分数约为 0. 1%. 钛宝石用提拉法或热交换生长, 它的激光上能级寿命较短. Ti: Al₂O₃ 晶体的吸收光谱及荧光光谱, 分别如图 1, 2 所示^[1]. 由图 1, 2 可知, 掺钛蓝宝石激光晶体的吸收光谱具有明显的偏振特性, π 吸收率远大于 σ 吸收率. π 吸收率表示晶体对于 C 轴平行的偏振光的吸收率, σ 吸收率表示晶体对于其 C 轴垂直偏振光的吸收率. 显然, 实验中注意采用 π 状态抽运是合理的, 并可得到较高的吸收效率. 图 1, 2 表明, 荧光光谱的短波端已与吸收光谱的长波端重叠, 因而能级间的受激吸收难以使短波端的激光振荡得以实现, 从而使波长小于 650 nm 的激光输出有较大的难度, 所以目前只能实现 650~ 1 200 nm 的激光输出.

1. 2 输出激光脉冲宽度的计算

引用文[1] 导出的激光脉冲宽度近似公式, 有

$$\delta t = \frac{\alpha}{\epsilon} F(\gamma) \tau_c \quad (1)$$

在式(1) 中, $F(\gamma) = \frac{\eta(\gamma)}{\Phi(\gamma)}$, $\eta(\gamma) = \frac{N_{\max} - N_f}{N_{\max}}$, $\gamma = \frac{N_{\max}}{N_{th}}$, $\Phi(\gamma) = \frac{\gamma - 1 - \ln \gamma}{\gamma}$; α 值一般取 1~ 2; ε 是介质的

收稿日期: 2006- 10- 25

作者简介: 李立卫(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光技术与器件的研究; 通信作者: 王加贤(1955-), 男, 教授, E mail: wangjx@ hqu. edu. cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0310022, A0610023); 国务院侨办科研基金资助项目(05QZR11)

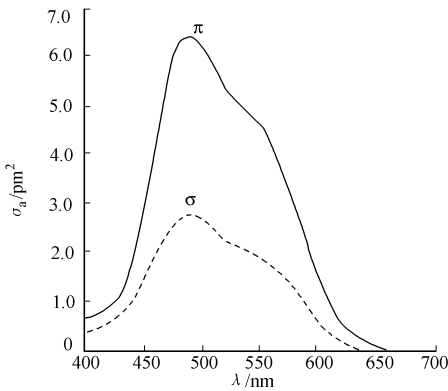


图 1 掺钛蓝宝石激光晶体的吸收光谱

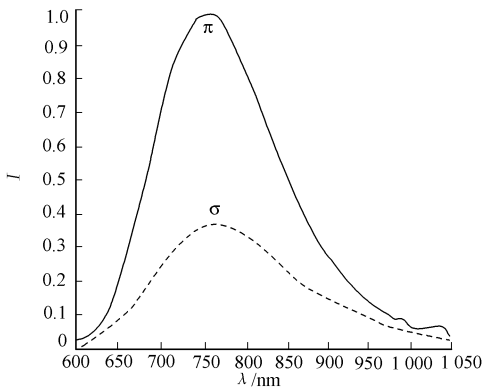


图 2 掺钛蓝宝石晶体的荧光光谱

Fig.1 Absorbed spectrum of Ti: Al₂O₃ laser crystal Fig.2 Emissive spectrum of Ti: Al₂O₃ laser crystal
激发态吸收因子, 对于 Ti: Al₂O₃ 这类无激发态吸收晶体, $\epsilon=1$; $\tau_c=2L/(c\cdot\delta_c)$ 为腔内光子寿命. 其中, L 为腔长, c 为光速, δ_c 为包括腔的耦合损耗、晶体的吸收损耗和散射损耗等在内的激光器的总损耗; N_{\max} , N_{th} , N_f 分别为 Ti: Al₂O₃ 中 Ti^{3+} 的最大反转粒子数密度、阈值反转粒子数密度和脉冲结束时的剩余反转粒子数密度.

对于 Ti: Al₂O₃ 晶体, 采用速率方程组可以得到 N_{\max} (对应 532 nm 抽运脉冲的峰值时刻) 和 N_{th} (对应 780 nm 激光脉冲峰值时刻) 分别为

$$N_{\max}=N_c\{1-\exp[\frac{\sigma_a(\nu_p)E_p}{A\cdot h\nu_p}]\},\quad N_{\text{th}}=\frac{1}{c\tau_cQ_c(\nu_p)}.\tag{2}$$

上式中, N_c 为晶体中的 Ti^{3+} 粒子数密度, 吸收截面 $\sigma_a(\nu_p)\approx4.9\text{ pm}^2$, 发射截面 $Q_c(\nu_p)\approx38\text{ pm}^2$, E_p 为 532 nm 抽运光脉冲能量, A 为晶体中抽运光的光束面积, $h\nu_p$ 为 532 nm 抽运光子能量.

为了计算 $\eta(\gamma)$, 采用调 Q 速率方程组导出的 N_{\max} , N_{th} , N_f 之间的关系式^[3], 有

$$\frac{N_f}{N_{\max}}=\exp(\frac{N_f-N_{\max}}{N_{\text{th}}}),\tag{3}$$

整理可得

$$\eta(\gamma)=\frac{1}{\gamma}\cdot\ln(\frac{1}{1-\eta}).\tag{4}$$

设谐振腔总的往返损耗约为 0.1, 腔长 $L=5\text{ cm}$, 由此得到腔内光子寿命 $\tau_c\approx3.33\text{ ns}$; 晶体中抽运光的光束面积 $A\approx0.03\text{ cm}^2$, 抽运光的光子能量 $h\nu_p=0.374\text{ aJ}$. 设抽运光脉冲能量 $E_p=20\text{ mJ}$, $N_c=1.2\times10^{18}\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$. 将上述数据代入式(2)可得到 $N_{\max}=1.0\times10^{17}\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, $N_{\text{th}}=2.63\times10^{16}\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 所以求得 $\gamma\approx3.8$, $Q(\gamma)=0.386$, 把 γ 带入式(4), 得到 $\eta(\gamma)=0.975$, 进而得到 $F(\gamma)\approx2.53$. 最后, 由式(1)得到脉冲宽度 $\delta t=12.6\text{ ns}$, 这里 α 取 1.5. 由以上计算可以看出, 输出激光脉冲宽度与抽运光脉冲宽度无关, 而与腔的损耗以及抽运能量有关.

2 实验装置

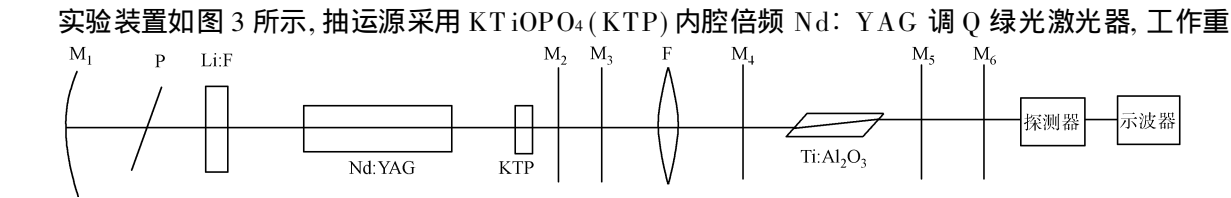


图 3 Ti: Al₂O₃ 激光器实验装置

Fig.3 Experimental setup of Ti: Al₂O₃ laser

复率为 1 Hz, 输出激光脉冲宽度为 32 ns. M_1 , M_2 构成抽运源谐振腔, M_4 , M_5 构成输出中心波长 780 nm 的平-平谐振腔. M_4 是对 532 nm 抽运光高透, 对中心波长 780 nm 高反的宽带平面反射镜; M_5 为对

532 nm 光高透, 对中心波长 780 nm 光透过率为 8% 的宽带平面反射镜. M_3 为对 1.06 μm 高反的平面镜, 用于滤除抽运源中少量的 1.06 μm 激光; M_6 为对 532 nm 高反的平面镜, 用于滤除出射的 532 nm 激光, 便于测量输出光. P 为偏振片, 用于改变光的偏振特性. 抽运光通过焦距为 225 mm 的凸透镜 F 聚焦到通光长度为 10 mm 的钛蓝宝石(上海光机所提供)后表面附近, $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 晶体端面以布儒斯特角切割. 激光器的输出脉冲由 Si 光电二极管(型)构成的探测器接收, 并输入到 300 MHz, TDS 3032B 型数字存储示波器)上存储和显示. 用 Molelectron 公司精度为 1.0 μJ 的激光能量计测量输出能量, 用 WGD 3002A 型多波段光栅单色仪测量激光光谱.

3 实验结果与分析

3.1 输出激光的波形和光谱曲线

在单脉冲能量为 21 mJ, 脉冲宽度为 32 ns 的绿光抽运下, 当腔长 $L = 5\text{ cm}$ 时, 测得激光脉冲波形,

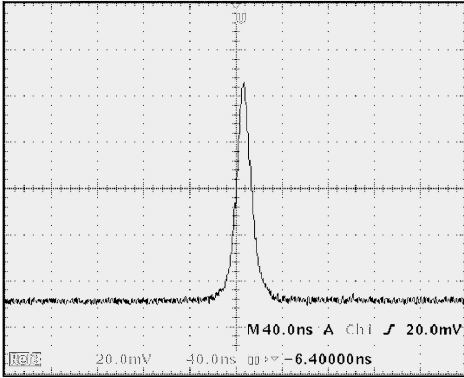


图 4 780 nm 输出激光脉冲

Fig. 4 Output laser pulse in 780 nm

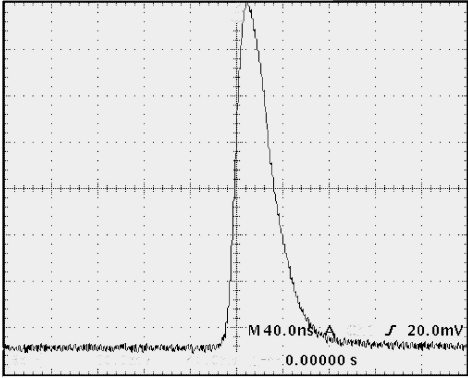


图 5 532 nm 抽运激光脉冲

Fig. 5 Pumping laser pulse in 532 nm

如图 4 所示. 当脉宽仅为 15 ns, 能量为 0.86 mJ, 与图 5 所示的抽运光脉冲波形相比, 脉冲宽度压缩 2 倍. 由多波段光栅单色仪测得 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器输出的激光光谱, 如图 6 所示, 从图 6 可以看出, 波长范围为 740~815 nm, 中心波长为 780 nm, 带宽(半峰全宽)为 40 nm. 由于本实验装置采用宽带反射镜, 所以输出激光线宽较大.

3.2 抽运条件对激光输出的影响

3.2.1 抽运能量 当抽运能量(E_i)在 2~21 mJ 变化时, 测得激光器输出脉冲能量 E_o 为 0~0.86 mJ, 阈值能量约为 2 mJ, 其输入-输出曲线如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 随着抽运能量的增加, 输出激光脉冲能量也相应增加. 出现这种现象的原因是, 由于短脉冲激光器输出激光脉冲能量与抽运能量成线性

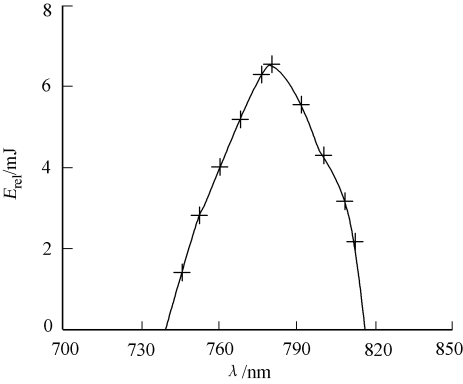


图 6 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器激光光谱曲线

Fig. 6 Spectrum of $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ laser

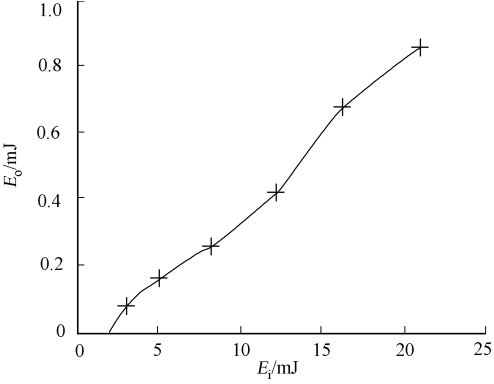


图 7 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器输入输出曲线

Fig. 7 Input energy versus output energy of $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ laser

关系^[4], 抽运能量的增加将使得输出能量变大. 由图 7 可以看出, 光-光转换效率大约为 4.1%. 由于采用

的输出镜透过率为 8%, 所以输出能量较小, 光-光转换效率较低.

3.2.2 腔长 在 21 mJ 的抽运下, 当腔长 $L = 8\text{ cm}$ 时, 测得输出能量为 0.78 mJ, 脉冲宽度为 18 ns. 与 $L = 5\text{ cm}$ 时相比, 输出能量减小, 脉冲宽度增加. 这种现象是由于腔长与腔内光子寿命 τ_r 成正比关系, 脉冲宽度又和腔内光子寿命 τ_r 成正比关系, 所以腔长的增加将使得 τ_r 变大, 从而脉冲宽度也变大. 另外, 对于平-平腔而言, 随着腔长的增加, $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 晶体内的模体积将会减小, 模体积小则对该振荡有贡献的激发态粒子数就少, 输出能量也就小.

3.2.3 腔结构 在 21 mJ 的抽运下, 当腔长 $L = 5\text{ cm}$ 时, 把 M_4 换成 $R = 200\text{ mm}$ (即腔结构变为平-凹腔), 测得输出能量为 0.72 mJ, 脉冲宽度为 17 ns. 与平-平腔相比, 输出能量减小, 脉冲宽度增加. 究其原因, 平-平腔与平-凹腔相比有两点不同: 其一是平-平腔具有更大的模体积; 其二是平-平腔是临界腔, 它的损耗 δ 较之平-凹腔更大, 所以, 平-平腔的输出激光脉冲能量更大. 因为腔内光子寿命 τ_r 与损耗 δ 成反比关系, 平-平腔与平-凹稳定腔比具有更高的损耗, 所以腔内光子寿命 τ_r 较小, 而脉冲宽度又和腔内光子寿命 τ_r 成正比关系, 所以平-平腔输出激光脉冲具有更窄的脉冲宽度.

4 结束语

本实验采用了 21 mJ 的 532 nm 调 Q 激光脉冲抽运 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 晶体, 获得了 15 ns 脉宽的 780 nm 激光脉冲, 脉冲能量为 0.86 mJ. 在实验中还研究了激光器输出激光脉冲特性受抽运能量、腔长及腔结构的影响. 如果能进一步优化腔参数(如抽运光的模斑半径, 输出镜的透过率等), 则有望使抽运光与振荡光能得到更好的模匹配, 从而提高转换效率^[5-7].

参考文献:

- [1] 张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 徐冰, 林礼煌, 欧阳斌, 等. 增益开关型 $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ 激光器的时间特性研究[J]. 光学学报, 1993, 13(5): 425-430.
- [3] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 71-78.
- [4] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 177.
- [5] 范安辅, 周昕, 黄援朝, 等. 关于 Nd: YAG 抽运掺铬镁橄榄石激光器的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 1999, 36(4): 768-770.
- [6] 王加贤. 掺 Cr^{4+} 离子的激光材料与器件[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2004, 25(3): 225-230.
- [7] 张国威. 增益开关型固体可调谐激光器的时间特性: 理论[J]. 激光技术, 1995, 19(3): 129-134.

Gain-Switching $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ Laser Pumped with 532 nm Light Pulse

LI Li-wei, WANG Jia-xian, ZHANG Feng-juan

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ crystal was pumped with 532 nm light pulse from a frequency doubled Q-switched Nd: YAG laser, the gain-switching operation of $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ laser was realized. If a green light pulse with the wavelength of 532 nm, energy of 21 mJ, and pulse duration of 32 ns was used as pumped source and cavity length of 5 cm was designed, the output laser pulse with energy of 0.86 mJ and pulse duration of 15 ns and the central wavelength near 780 nm was obtained, the pulse duration is narrower than the pumping pulse. The pulsewidth of the laser pulse was calculated theoretically from the rate equations. Furthermore, the influences of the pumping energy, the length of the cavity and the cavity structure on the output characters were investigated.

Keywords: $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$; gain switch; Q-switched laser; cavity structure; laser pulse

(责任编辑: 黄仲一)