

# 掺钛蓝宝石晶体激光放大实验研究

徐冰 吴建光 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 报道了掺钛蓝宝石晶体激光放大实验研究, 实验中得到最大的单程放大和双程放大增益分别为 14.76 和 26.31, 对应双程放大的增益系数为  $1.81 \text{ cm}^{-1}$ , 并由此推算出掺钛蓝宝石晶体的增益截面为  $2.74 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 饱和能量密度为  $0.93 \text{ J/cm}^2$ , 并给出不同的泵浦能量密度所对应的最佳放大介质长度。实验表明小信号近似下, 放大增益只与泵浦功率密度有关, 与注入种子能量无关。实验还测量了掺钛蓝宝石晶体对不同波长种子光的放大增益。

**关键词** 掺钛蓝宝石晶体激光放大器, 增益, 增益系数, 饱和能量密度

## 1 引言

掺钛蓝宝石晶体具有宽增益带(660~1100 nm)、低的泵浦阈值、高转换效率和宽吸收带的特点<sup>[1]</sup>, 因此自 1986 年以来, 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), 纳秒、皮秒直至小于 10 飞秒级的超短脉冲的产生<sup>[2]</sup>, 使其成为目前在可见到红外光波段性能最好的固体可调谐激光器。同时掺钛蓝宝石晶体大的增益截面( $\sim 3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ), 使得它十分适合与自锁模掺钛蓝宝石振荡器匹配, 采用啁啾脉冲放大(CPA)技术, 作为 Table-top-terawatt( $T^3$ )激光系统的放大介质。国外已对此进行了多年的研究, 并已实现脉宽 18 fs、输出功率 4.4 TW 的  $T^3$  激光系统<sup>[3]</sup>。而我国在这方面的研究还处于起步阶段, 为此我们首先进行了掺钛蓝宝石晶体激光放大实验, 并测量了它的增益系数, 计算了饱和能量密度和其他相关参数。实验结果将对建立高功率掺钛蓝宝石激光系统有重要的现实意义。

## 2 实验

增益是放大器最基本的参数, 它和多种因素有关, 对于掺钛蓝宝石激光放大器主要有以下两个方面: (1) 掺钛蓝宝石晶体的性能: 上能级寿命约为  $3.15 \mu\text{s}$ , 增益截面  $\sigma \sim 3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ; (2) 工作条件: 如掺钛蓝宝石晶体的长度、掺杂浓度、泵浦强度、泵浦脉宽及泵浦光相对种子光的最佳延迟时间。

掺钛蓝宝石晶体单程和双程放大实验装置的主要部分如图 1 所示, 虚线部分为双程放大所用。掺钛蓝宝石晶体的上能级寿命只有  $3.15 \mu\text{s}$ , 适合用激光直接泵浦。一台调 Q、倍频的 Nd:YAG 激光器的输出光经滤去基频光、分光后, 分别用来泵浦振荡器和放大器。532 nm 的泵

浦光重复频率为 10 Hz, 脉宽为 14 ns, 最大可输出能量为 1 J。种子源为一可调谐增益开关型掺钛蓝宝石激光振荡器<sup>[4]</sup>。它的重复频率为 10 Hz, 脉宽为 20 ns。图 2 显示了泵浦光脉冲和种子脉冲的时间特性, 图中左边为 Nd : YAG 输出光, 右边为掺钛蓝宝石激光振荡器输出光, 种子脉冲相对泵浦光约有 65 ns 的延迟。种子源最大的输出能量为 0.2 mJ, 能量起伏小于 1% (实验中所有能量值, 都是由 LP-3A 型功率计先测得功率后, 换算而来), 其强度的时间和空间分布呈近高斯型。

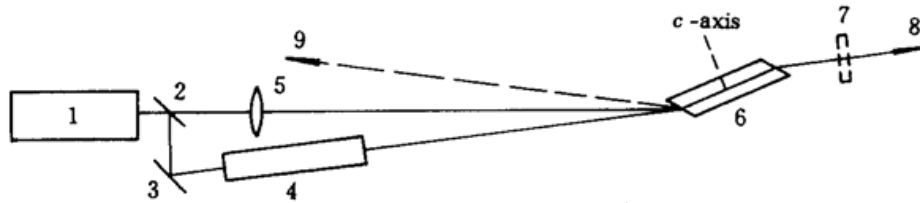


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

1: Nd : YAG laser; 2, 3: dichroic mirrors; 4: Ti : sapphire oscillator; 5: convex lens; 6: Ti : sapphire amplifier; 7: total reflector at 750~850 nm; 8: single-pass amplified light; 9: double-pass amplified light

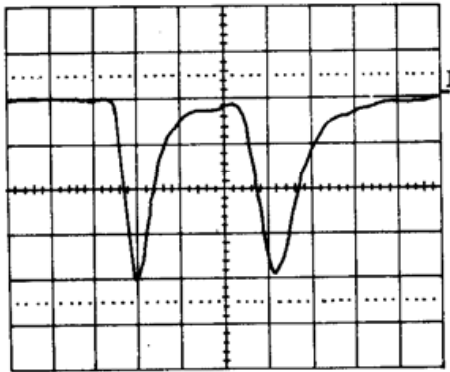


Fig. 2 Temporal profile of the 532 nm pump light (left) and the output laser from the Ti : sapphire oscillator (right). (20 ns/div.)

实验中由于掺钛蓝宝石振荡器和放大器的泵浦来自同一台 Nd : YAG 激光器, 种子脉冲相对泵浦光的 65 ns 延迟, 远小于掺钛蓝宝石晶体的上能级寿命 3.15  $\mu$ s, 因此振荡器和放大器能很好地同步。

作为放大介质的掺钛蓝宝石晶体长 18.0 mm, 品质因素(FOM)约为 80, 掺  $Ti^{3+}$  离子浓度为 0.08 wt.-%, 晶体对 532 nm 的泵浦光的吸收系数  $\alpha_p = 1.22 \text{ cm}^{-1}$ , 寄生吸收系数  $\alpha_L = 0.015 \text{ cm}^{-1}$ 。晶体端面按布儒斯特角切割, 其  $c$  轴垂直于光的传播方向。泵浦光和种子光, 相对于晶体

为  $p$  波以近布儒斯特角非共线入射。泵浦光经过焦距为 1 m 的凸透镜后, 在晶体表面的光斑直径约为 2 mm。晶体置于泵浦光的焦点之前, 以避免受到损伤, 实验中的泵浦能量为 22~140 mJ, 对应的最大泵浦能量密度为 4.46  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 接近掺钛蓝宝石晶体的损伤阈值。放大器所用的掺钛蓝宝石晶体置于一铜制的冷却器中, 若不置于冷却器中, 放大效率极低, 且容易损伤晶体。

## 2.1 不同能量的种子脉冲的单程放大实验

在小信号近似下, 输入种子光强  $E_{in}$  与输出放大光强  $E_{out}$  关系为<sup>[5]</sup>:

$$E_{out} = GE_{in} \quad (1)$$

式中  $G$  为小信号增益, 并可表达为:

$$G = e^{gL} \quad (2)$$

其中  $gL$  为指数增益,  $L$  为掺钛蓝宝石晶体长度,  $g$  为小信号增益系数(为整个  $L$  长度的平均值)。因此只要通过测量输入种子能量和输出能量即可得到小信号增益  $G$ 、指数增益  $gL$  和小信号增益系数  $g$ 。

实验中种子脉冲的波长为 782 nm。表 1 给出不同能量的注入种子对应的单程放大特性。注入的种子能量  $E_{in}$  分别为 0.21 mJ 和 0.08 mJ, 泵浦光能量  $E$  为 20~140 mJ, 对应的泵浦能量

密度  $E_p$  为  $0.71 \sim 4.46 \text{ J/cm}^2$ , 单程放大后的能量和增益分别用  $E_{\text{out}}$  和  $G$  表示,  $E_{\text{out1}}$ ,  $E_{\text{out2}}$  和  $G_1$ ,  $G_2$  分别对应  $0.21 \text{ mJ}$  和  $0.08 \text{ mJ}$  能量的种子脉冲。

Table 1 Small-signal single-pass gain ( $G$ ) and output energy versus pump energies density for different seeding energies

$E$ (mJ)	22	48	70	98	110	140
$E_p$ ( $\text{J/cm}^2$ )	0.71	1.53	2.23	3.12	3.50	4.46
$E_{\text{out1}}$ (mJ)	0.34	0.51	0.74	1.32	1.61	3.10
$E_{\text{out2}}$ (mJ)	0.12	0.20	0.27	0.42	0.51	1.08
$G_1$	1.62	2.43	3.52	6.30	7.67	14.76
$G_2$	1.52	2.52	3.41	5.29	6.36	13.54

从表 1 可看出, 相同泵浦能量条件下, 输入的种子能量不同, 放大后能量有很大差异, 而增益  $G_1$  和  $G_2$  却相差无几。

由小信号近似, 纵向泵浦的掺钛蓝宝石放大器的理论分析可知<sup>[5]</sup>, 在放大介质不同位置处的增益系数  $g(l)$  被表达为:

$$g(l) = \sigma \alpha_p E_p \lambda_p \exp(-\alpha_p l) / hc \quad (3)$$

式中  $\lambda_p$  为泵浦光波长,  $l$  为放大介质中的位置。(1), (2) 和 (3) 式表明在小信号近似下, 增益系数  $g$ 、增益  $G$  与输入的种子能量大小无关, 增益系数  $g$  与增益  $G$  完全由泵浦条件和掺钛蓝宝石晶体的本身性能决定。因此实验与理论相符。

## 2.2 单程和双程放大实验

我们还研究了相同泵浦条件下, 单程和双程放大的增益  $G$  对泵浦能量密度  $E_p$  的依赖关系。实验结果见图 3 所示, 这时种子脉冲能量为  $0.21 \text{ mJ}$ , 泵浦能量密度  $E_p$  为  $0.71 \sim 4.46 \text{ J/cm}^2$ 。图 3 中的曲线  $a$  和  $b$  分别代表单程放大和双程放大过程, 当泵浦能量为  $140 \text{ mJ}$  时, 得到最大的单程放大和双程放大增益分别为  $14.76$  和  $26.31$ 。曲线  $a$  和  $b$  都由  $e$  指数函数拟合, 曲线  $a$  中,  $G = 0.996e^{0.59E_p}$ , 曲线  $b$  中,  $G = 1.002e^{0.74E_p}$ 。

图 4 给出种子脉冲为  $0.21 \text{ mJ}$  时, 指数增益  $gL$  与泵浦能量密度  $E_p$  的实验曲线, 曲线  $a$  和  $b$  分别为单程放大和双程放大过程。曲线  $a$  和  $b$  都由线性函数拟合, 拟合函数分别为: 曲线  $a$  中,  $gL = 0.590E_p + 0.004$ ; 曲线  $b$  中,  $gL = 0.735E_p - 0.005$ 。

从图 3、图 4 的拟合函数曲线来看, 实验结果与 (1), (2) 式吻合。

## 2.3 对不同波长的种子光放大实验

实验中只改变注入的种子脉冲的波长, 研究波长对单程放大增益的影响。实验中种子光的波长变化范围为  $755 \sim 821 \text{ nm}$ 。保持种子脉冲能量  $0.21 \text{ mJ}$ ; 泵浦能量  $98 \text{ mJ}$  (对应的能量密度为  $3.12 \text{ J/cm}^2$ ) 不变, 实验结果见图 5。实验中注意到振荡器的输出波长改变, 引起注入种子光能量和方向的变化, 此时必须改变对种子源的泵浦能量以使种子脉冲的能量不变; 同时需重新调整对放大介质泵浦光的方向, 以达到泵浦光与种子脉冲在掺钛蓝宝石晶体中的最佳耦合, 获得最大增益。

图 5 显示掺钛蓝宝石晶体的单程放大增益在其中心波长  $780 \text{ nm}$  处为最大, 偏离中心波长越远, 增益越小。在  $782 \text{ nm}$  处曲线有小凹陷, 我们认为是由测量时的误差带来的。

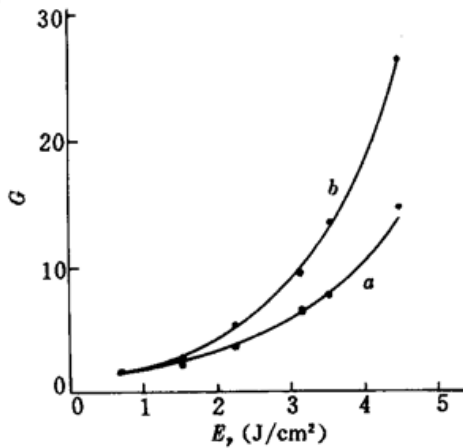


Fig. 3 Small-signal single-pass (a) and double-pass (b) gain as a function of the incident pump energy density

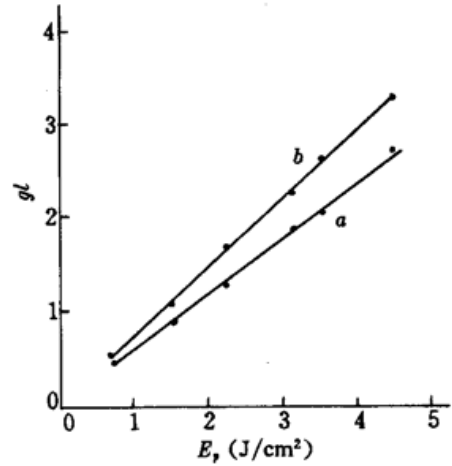


Fig. 4 Small-signal single-pass (a) and double-pass (b) exponential gain ( $gl$ ) as a function of the incident pump energy density

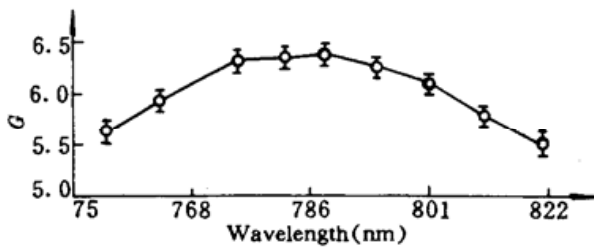


Fig. 5 Small-signal single-pass gain ( $G$ ) versus wavelength

### 3 饱和能量密度 $E_s$ 和放大介质的最佳长度 $L_0$

从表 1 和图 3 的实验结果来看,放大过程并未达到饱和。但通过简明的理论分析和实验获得的数据可计算出掺钛蓝宝石晶体的饱和能量密度。

首先增益截面  $\sigma$  表达为<sup>[6]</sup>:

$$\sigma = (h\nu_p/E_p)gL \quad (4)$$

其中  $h$  为普朗克常数,  $\nu_p$  为泵浦光频率。实验中当泵浦能量密度  $E_p$  为  $4.46 \text{ J/cm}^2$  时,指数增益  $gL = 3.27$ ,增益系数  $g = 1.81 \text{ cm}^{-1}$ ,以此算出增益截面  $\sigma$  为  $2.74 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,与已知的  $3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  接近。

晶体的饱和能量密度  $E_s$  为:

$$E_s = h\nu_L/\sigma \quad (5)$$

式中  $\nu_L$  为种子光频率,用 2.2 节的实验结果代入(4)和(5)式,得到  $E_s$  为  $0.93 \text{ J/cm}^2$ 。

放大介质的长度直接影响放大效率,(3)式显示在共线泵浦条件下增益系数  $g(l)$  随放大介质的长度增加作指数衰减,然而寄生吸收系数  $\alpha_L = 0.015 \text{ cm}^{-1}$  为一常量,当  $g(l)$  与  $\alpha_L$  相等时,得到放大介质的最佳长度  $L_0$  的表达式为:

$$L_0 = -\frac{l}{\alpha_p} \ln\left(\frac{E_s \lambda_L \alpha_L}{E_p \lambda_p \alpha_p}\right) \quad (6)$$

其中  $\lambda_L$  为种子光波长。实验参数代入(6)式,即得到放大介质的最佳长度  $L_0$ ,表 2 给出实验中所用的泵浦能量密度对应的最佳长度  $L_0$ 。由于实验中所用掺钛蓝宝石晶体长  $1.8 \text{ cm}$ ,表 2 中放大介质的最佳长度  $L_0$  的计算结果显示,实验中采用双程放大的方式得到的放大效果较好。

Table 2 The optimum length  $L_0$  versus pump energy density

$E$ (mJ)	22	48	70	98	110	140
$E_p$ (J/cm <sup>2</sup> )	0.71	1.53	2.23	3.12	3.50	4.46
$L_0$ (cm)	3.1	3.7	4.0	4.2	4.4	4.6

## 参 考 文 献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, 3(1) : 125~133
- 2 J. Zhou, G. Taft, C. P. Huang *et al.*. Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(15) : 1149~1151
- 3 Regeneratrve shaping with chirped amplification generates 18-fs multiterawatt pulses. *Laser Focus World*, 1996, 32(3) : 13
- 4 徐 冰, 林礼煌, 欧阳斌 等. 增益开关型 Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器的时间特性研究. *光学学报*, 1993, 13(5) : 425~430
- 5 J. C. Barnes, N. P. Barnes, G. E. Miller. Master oscillator power amplifier performance of Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(6) : 1029~1038
- 6 K. F. Wall, R. L. Aggarwal, R. E. Fahey *et al.*. Small-signal gain measurements in a Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amplifier. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(6) : 1016~1020

## Experimental Studies on Amplifier Performance of Ti : sapphire

Xu Bing Wu Jianguang Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

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

**Abstract** A small-signal single-pass power gain of 14.76 and double-pass power gain of 26.31 have been measured for a Ti : sapphire amplifier. The results correspond to the small-signal gain coefficient being 1.81 cm<sup>-1</sup> and the gain cross section being 2.74 × 10<sup>-19</sup>cm<sup>2</sup>. The small-signal gains for different wavelengths have been obtained. The saturation fluence and optimum length of Ti : sapphire have been calculated.

**Key words** amplifier of Ti : sapphire, small-signal gain, small-signal gain coefficient, saturation fluence