

增益开关型 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器的 时间特性研究*

徐 冰 林礼煌 欧阳斌 李庆国 王润文
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道增益开关型 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器输出脉冲的时间特性; 给出激光器在宽带输出及调谐工作状态下, 输出脉冲的时间特性曲线. 实验中获得最小的脉宽为 1.2 ns. 在一定的实验条件下, 脉冲宽度可在 5~27.5 ns 范围内连续变化. 在调谐状态下, 用一输出耦合镜得到波长可调谐范围为 730~850 nm. 用三块棱镜作调谐器, 在中心波长 780 nm 处, 最大输出能量为 4.7 mJ, 谱线宽度为 0.13 nm(FWHM).

关键词 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器, 增益开关, 调谐激光器, 延迟时间.

1 引 言

$Ti^{3+} : Al_2O_3$ 是一种新型的可调谐激光晶体, 具有调谐范围宽(660~1100 nm)、增益高、阈值低、转换效率高(可达 50%左右)和可用多种光源泵浦^[1~3]等优点, 倍受国内外关注.

用调 Q 的 Nd : YAG 激光器的倍频光作泵浦光, 是一种得到 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器输出光脉宽为毫微秒量级的重要手段. 目前国内外对输出毫微秒量级的脉冲光的时间特性尚未作充分的研究^[4~6], 我们对此进行了一系列实验, 研究了 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光的时间特性.

2 实验装置

$Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器是由全反镜 M_1 (720~850 nm)、输出耦合镜 M_2 (720~850 nm) 和 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体构成. 激光腔为平-平腔. 实验 3.1 中 1)、2)、3) 部分所用的 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体长度为 24 mm, 在 532 nm 处的吸收系数为 $\alpha_{532} = 0.95 \text{ cm}^{-1}$, 其余部分所用的 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体长度为 19.5 mm, 在 532 nm 处的吸收系数为 $\alpha_{532} = 1.22 \text{ cm}^{-1}$. 晶体端面都按布儒斯特角切割, 其 c 轴垂直光的传播方向, 见图 1. 其中棱镜部分为实验 3.2 所用, 棱镜是用重火石玻璃 ZF₄ 制成.

调 Q 的 Nd : YAG 激光器重复频率为 1 Hz, 输出光(1.06 μm , 水平偏振)经 KTP 晶体倍频后, 用半波片调整倍频光的偏振方向. 滤去基波后, 532 nm 的绿光用一凸透镜对其聚焦以获得足够高的泵浦功率密度. 泵浦光通过全反镜 M_1 , 相对于 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体为 p 波以布儒斯特角入射. 晶体置于泵浦光会聚点之前, 以避免晶体受到损坏.

收稿日期: 1992 年 12 月 31 日; 收到修改稿日期: 1993 年 3 月 4 日

* 国家自然科学基金资助项目.

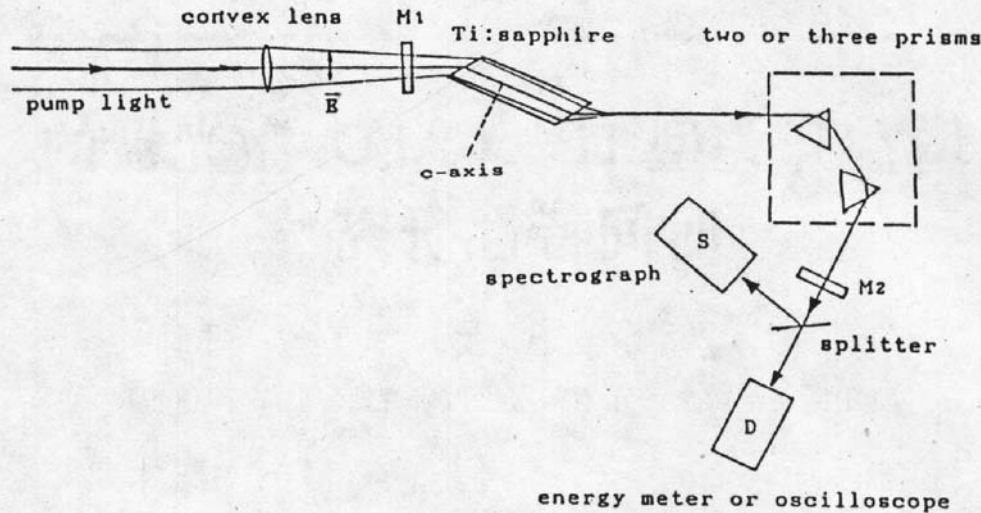


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

$\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器输出光谱带宽度由 WPP-05 型平面光栅摄谱仪摄谱, 经氦灯、氖灯定标后, 用 Joyce-Loebl 3CS 显微密度计测量光谱宽度, 精度为 $\pm 0.1 \text{ nm}$. 泵浦光能量与 $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 输出光能量, 由 PT-1 型能量计测量, 精度为 $\pm 0.01 \text{ mJ}$. 泵浦光脉冲与输出光脉冲一起射入同一个光二极管, 用存储示波器观测泵浦光脉冲宽度、波形, 输出光脉宽、波形及输出光相对于泵浦光的延迟时间(定义为泵浦光脉冲峰值与输出光峰值之间的时间间隔).

3 实验与结果

3.1 宽带输出的 $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器的时间特性

首先研究了泵浦光脉冲形状与 $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器的输出光脉冲形状关系; 其次研究了泵浦光脉冲能量与 $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器输出光的脉宽的关系, 及输出光相对于泵浦光的延迟时间的关系, 最后, 研究 $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器的输出脉冲的时间特性与泵浦光功率密度关系.

1) 最初, 实验中的泵浦光能量较低(小于 10 mJ), $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器腔长为 83 mm , 输出耦合镜的反射率为 60% , 用两种不同形状的光脉冲来泵浦: (I) 光滑的调 Q 脉冲, 其脉宽度为 22 ns , 得到输出脉宽为 6 ns , 延迟时间为了 55 ns , 如图 2(a) 所示; (II) 带自调制的调 Q 脉冲, 脉宽为 26 ns , 这时输出脉冲宽度为 4 ns , 延迟时间为 40 ns , 如图 2(b). 从图 2 可看出, 无论用哪一种泵浦光, $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器的输出脉冲的波形总是单一的、光滑的, 呈近高斯型, 且脉宽都明显地被压缩(相对于泵浦光脉宽). 这一结果与吴路生等^[7]观察到的明显不同.

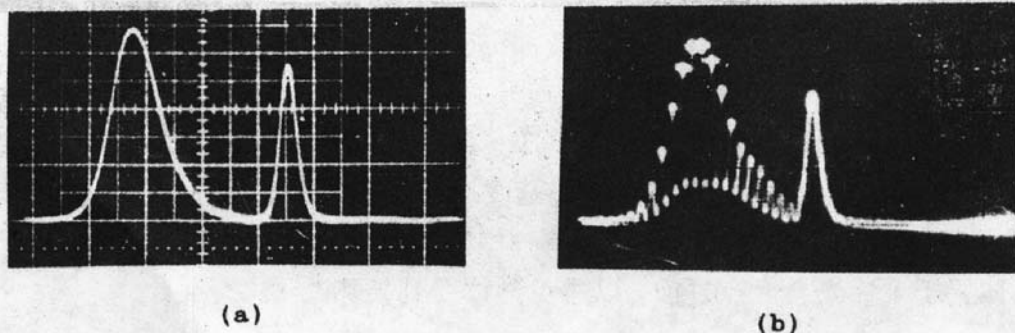


Fig. 2 Temporal profiles of 532 nm pump lights (left) and output lasers of the $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ laser (right). (20 ns/div.)

然后使泵浦光能量增大到 55 mJ , 脉宽为 13 ns , $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器腔长为 160 mm , 输出耦合镜的反射率为 55% , 继续对输出光的时间特性进行研究. 泵浦光脉冲波形还是有两种:

(I)光滑的调 Q 脉冲;(II)带调制的调 Q 脉冲,波形被分别显示于图 3(a)、(b)的左边. 在实验中,示波器不仅显示出单一的、光滑的调 Q 脉冲输出,而且还观测到光滑的双脉冲光输出,见图 3(a)、(b)中的右边脉冲波形,而且第一输出脉冲的后沿与第二输出脉冲的前沿相连. 出现双脉冲情况的几率约为 10%.

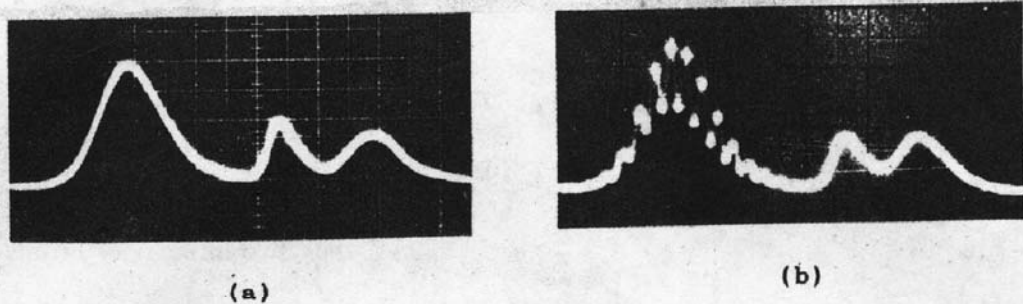


Fig. 3 Temporal profiles of 532 nm pump lights (left) and two output pulses of $Ti^{3+} : Al_2O_3$ laser (right). (10 ns/div.)

2) 研究泵浦光脉冲的能量与 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器输出光脉宽及输出光的延迟时间关系. 实验中保持腔长为 45 mm, 输出耦合镜的反射率为 55%. 用调 Q 的 Nd : YAG 激光的倍频光作为泵浦光, 脉宽保持 22 ns 不变. 通过插入衰减片改变泵浦光的能量 (3.5~12.5 mJ), 发现当泵浦光的光强增强时, 输出脉冲能量增加、示波器上显示输出光脉宽减小、输出光相对于泵浦光的延迟时间缩短, 结果如图 4 中(a), (b)曲线所示.

3) 保持腔长 160 mm、泵浦光脉宽 13 ns、能量 20 mJ 不变, 用焦距为 350 mm 的凸透镜会聚泵浦光. 因此在腔内 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体位置的不同对应于不同的泵浦光功率密度(见图 1), 连续地移动 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体(但始终处于泵浦光会聚点之前), 泵浦光功率密度就可连续地变化. 示波器波形图显示, 随着功率密度增强, 输出光的脉冲宽度减小, 输出光相对于泵浦光的延迟时间减少. 由于晶体的位置的连续变化, 因此得到连续变化的输出脉宽 5~27.5 ns, 和连续变化的延迟时间 18~140 ns. 测量数据绘制成图 5, 图中的距离定义为凸透镜与 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体之间的间距.

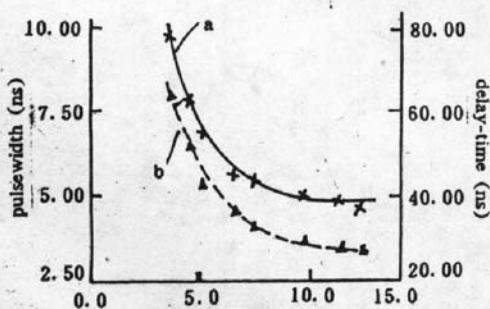


Fig. 4 Output pulsewidth (curve a) and delay-time (curve b) as a function of pump energy

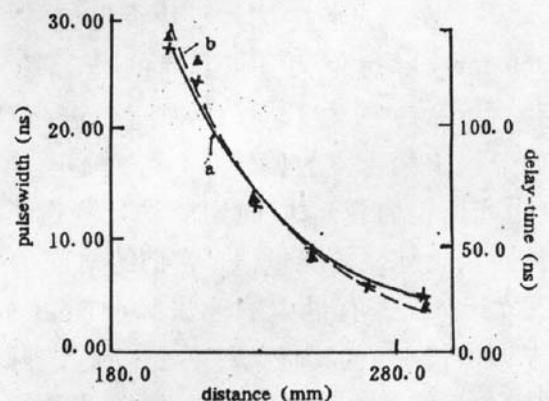


Fig. 5 Output pulsewidth (curve a) and delay-time (curve b) versus the distance between the $Ti^{3+} : Al_2O_3$ crystal and the conver lens

4) 当 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器腔长为 35 mm、输出耦合镜的反射率在 780 nm 处为 55%, 泵浦光(能量 14.5 mJ、脉冲宽度 13 ns)用焦距为 350 mm 的凸透镜会聚, $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体距凸透

镜 255 mm 时, 实验中得到最小输出脉冲宽度 1.2 ns (扣除示波器及探测器的上升时间), 如图 6 所示. Moulton 等人报道的结果为 5 ns^[1].

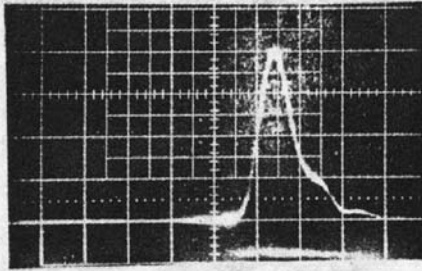


Fig. 6 Temporal profile of the shortest pulse.
(2 ns/div.)

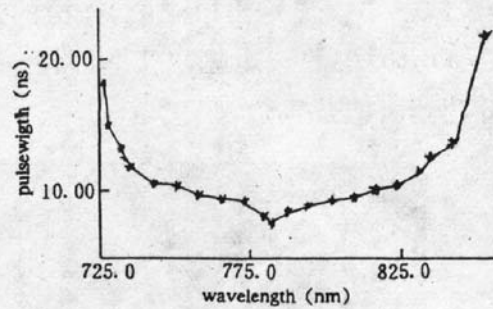


Fig. 7 Output pulsewidth versus wavelength
when two intracavity prisms were used

3.2 可调谐增益开关型 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 激光器的时间特性

实验装置仍如图 1 所示, 激光腔内加入二个或三个调谐棱镜, 实验中光以布儒斯特角入射到棱镜中. 激光腔仍为平-平腔, 在 720~850 nm 内, M_1 为全反射镜, M_2 的反射率为 55%. 泵浦光源仍用调 Q 的 Nd: YAG 激光器, 重复频率为 1Hz, 其输出光的倍频光 (532 nm) 用一凸透镜会聚, 以获得足够高的泵浦光功率密度, 相对于 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体为 p 波以布儒斯特角入射. 输出光脉冲被分束镜分束后, 一部分由光谱仪监测其光谱, 另一部分由存储示波器或能量计监测其波形或能量. 主要实验结果如下:

1) 两个棱镜被置入激光腔内, 谐振腔长 210 mm, 泵浦光能量为 13.5 mJ、脉宽为 13 ns, 用焦距为 400 mm 的凸透镜对其会聚. 只要仔细调节输出耦合镜的偏转角度, 输出光光谱在 730~850 nm 范围内可调谐. 从示波器上观察到对应不同的波长, 输出脉宽不同, 见图 7. 输出光光谱偏离 780 nm 越远, 输出脉宽越宽. 在 780 nm 处, 得到最短的输出脉宽 7.5 ns. 考虑到 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体的增益线宽曲线, 在 780 nm 处有最大的增益系数, 所以这个实验结果是合理的. 当泵浦能量降低时, 输出脉冲的光谱可调谐宽度随之变窄. 作为对比, 若未加入调谐棱镜, 而其它条件不变, 这时输出光脉宽为 11 ns.

2) 在激光腔内加入三块调谐棱镜, 谐振腔长 260 mm, 用焦距为 400 mm 的凸透镜对能量为 24.1 mJ、脉宽为 13 ns 的泵浦光进行会聚. 细微调节输出耦合镜的偏转角, 得到不同的输出波长 (由光谱仪监视), 同时用能量计测量了在不同波长时输出脉冲的能量值, 它们的对应关系见图 8. 在 780 nm 处有最大的输出脉冲能量 4.7 mJ, 但未调谐情况下 (其它条件不变), 输出脉冲能量为 4.9 mJ. 这是由于棱镜的吸收, 激光器调谐输出时能量值略小于未调谐时输出能量. 用 Joyce-Loebl 3CS 显微密度计测得输出激光的光谱宽度为 0.13 nm. 实验中观察到这时的输出脉冲带有调制, 并且每个调制之间的时间间隔相等. 若用更多的调谐棱镜或一组双折射片等, 输出光的谱线宽度还将减小.

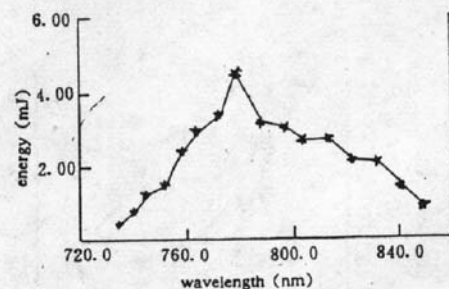


Fig. 8 Output laser energy versus wavelength
with the use of three intracavity
prisms

3) 比较了在激光腔中采用具有不同反射率的输出耦合镜对输出激光的时间特性的影响.

这时两个棱镜被置入激光腔内,谐振腔长 240 mm,泵浦光能量为 13.5 mJ、脉宽为 13 ns,用焦距为 400 mm 的凸透镜对其会聚,输出耦合镜的反射率分别为 80%、65%、60%、55%和 23%。用示波器测量输出光在 780 nm 处的宽度及脉冲延迟时间,如图 9 所示。实验中用反射率为 65% 的输出耦合镜,可以得到最短的输出脉冲宽度 6.5 ns 和最短的延迟时间 36 ns。

4 讨 论

在 3.1 节实验 1) 中,不论泵浦光脉冲波形如何,输出激光脉冲波形总是单一的、光滑的。这表明在泵浦光的作用下, $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体中反转粒子数只有积累到一定程度,才能在激光腔内形成激光振荡,输出激光脉冲。而且泵浦光脉宽远小于输出激光的延迟时间,因此泵浦光脉冲形状不会影响输出光脉冲形状。同时由于在激光腔内存在多纵模振荡(计算可知大约有 1.2×10^5 个纵模可以在腔内振荡),激光的多纵模相干输出使脉冲形状平滑化。而 3.2 节实验 2) 中,激光腔内加入三块调谐棱镜,这时只有为数不多的纵模能够振荡,仅存的这几个纵模发生相干输出,产生带有调制的激光脉冲。

从 3.1 节实验 2)、3) 的结果来看,输出激光脉宽和脉冲的延迟时间强烈地依赖于泵浦光的功率密度,这是因为当泵浦光脉冲功率密度高时,在泵浦光的作用下, $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体中上能级粒子数积累快,激光谐振腔内能较快形成激光振荡,因此这时输出激光脉宽较小,标志激光建立时间的脉冲延迟时间也较短。这一解释也说明在 3.1 节实验 1) 中的结果与吴路生等观察到不一致的原因。另外,对 3.1 节实验 2),Steele^[2] 等人也作过研究,但其泵浦光能量较低,只有 0.6~2.3 mJ(吴路生等人所用的能量为 30 mJ),而本文实验的泵浦光能量范围为 3.4~12.5 mJ,在不同的能量条件下可得到不同的实验结果。

$Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体增益系数在中心波长 780 nm 处最大,离中心波长越远增益系数越小,因此当泵浦光能量减小时,3.2 节实验 1) 观测到输出光光谱调谐宽度变窄。

在图 8 中,输出能量与波长的对应关系曲线与 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体增益系数曲线并不相同。这一现象的起因,是输出耦合镜的反射率作为激光振荡腔参数之一,对应于每输出波长,并不都是理想的。这一解释同样可以说明 3.2 节中实验 3) 的结果。

本实验结果对于选择适当的泵浦光,以得到合适的、稳定的输出脉冲宽度,减小泵浦光对晶体损伤的可能性,有着重要的现实意义。

参加本实验的还有杨晓东和康玉英,同时感谢邓佩珍研究员、乔景文副研究员为实验提供的优质 $Ti^{3+} : Al_2O_3$ 晶体。

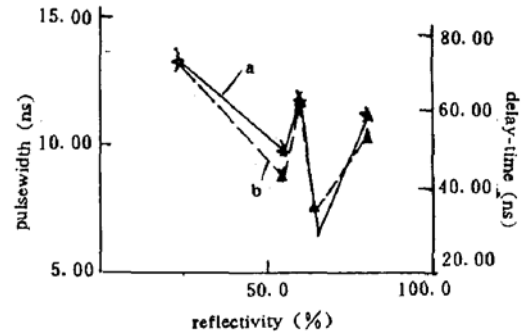


Fig. 9 Output pulsewidth (curve a) and delay-time (curve b) versus the reflectivity of output coupler

参 考 文 献

- [1] P. F. Moulton, Spectroscopic and laser characteristics of $Ti : Al_2O_3$. *J. Opt. Soc. Amer. B*, 1986, 3(1) : 125~133
- [2] B. Gu, M. Birnbaum, Material characteristics of titanium : sapphire. *J. Opt. Soc. Amer. B*, 1989, 6(12) : 2338~2341
- [3] A. Sanchez, A. J. Strauss, R. L. Aggarwal *et al.*, Crystal growth, spectroscopy and laser characteristics of $Ti : Al_2O_3$. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, QE-24(6) : 995~1002

- [4] J. M. Eggleston, L. G. Deshazer, K. W. Kangas, Characteristics and kinetics of laser-pumped Ti : sapphire oscillator. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6) : 1009~1015
- [5] G. A. Rines, P. F. Moulton, Performance of gain-switched Ti : Al₂O₃ unstable-resonator laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8) : 434~436
- [6] T. R. Steele, D. C. Gerstenberger, A. Drorobshoff *et al.*, Broadly tunable high-power operation of an all-solid-state titanium-doped sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6) : 399~401
- [7] 吴路生, 陈一宏, 赵梅荣等, Ti³⁺ : Al₂O₃ 激光特性的研究. *中国激光*, 1990, **16**(1) : 4~6

Temporal characteristics of a gain-switched Ti³⁺ : Al₂O₃ laser

XU Bing LIN Lihuang OUYANG Bin LI Qingguo WANG Runwen

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

(Received 31 December 1992; revised 4 March 1993)

Abstract

We report on the temporal characteristics of output pulses of a gain-switched Ti³⁺ : Al₂O₃ laser pumped by a frequency-doubled Q-switched Nd : YAG laser. The minimum laser pulsewidth of 1.2 ns has been observed. The pulsewidth can be varied from 5 ns to 27.5 ns continuously under certain experimental conditions. Using only one output coupler the tuning range of the laser was from 730 nm to 850 nm. The maximum output pulse energy of 4.7 mJ and the spectral content of 0.13 nm(FWHM) at 780 nm prisms were obtained, by using three intracavity prisms.

Key words Ti³⁺ : Al₂O₃ laser, gain-switching, tunable laser, delay-time.