

# 脉冲钛宝石激光器时间特性的研究

方香云 王惠茹 周寿桓

(华北光电所, 北京 100015)

**提要** 本文从四能级结构激光速率方程出发,对脉冲掺钛蓝宝石激光器的时间特性进行了理论研究。倍频调 Q Nd:YAG 激光器泵浦的掺钛蓝宝石激光器的输出脉宽和时间延时随泵浦能量、调谐波长和输出耦合率的变化而变化。所得的实验结果与理论结果相吻合。

**关键词** Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 激光器,可调谐激光器

## 1 引 言

钛宝石可调谐激光器的发展方向之一是提高输出能量,以满足某些应用的需要。国际上普遍采用放大的方法<sup>[1~4]</sup>,其中包括同步放大、再生放大和注入种籽等技术。在诸多的放大技术中无不需要了解振荡级输出的时间特性,以提高转换效率。

文献[5]从实验上观测了宽带和可调谐输出的延时和脉宽随注入能量的变化以及脉宽随调谐波长的变化曲线,获得了一些有益的实验结果。本文从四能级结构激光速率方程的理论出发,通过大量的模拟计算和实验观测,研究 ns 量级脉宽激光泵浦的掺钛蓝宝石激光器的时间特性。着重研究输出延时和脉宽随泵浦能量、谐振腔输出耦合度和可调谐波长的变化关系。实验观测结果与理论分析结果相吻合。

## 2 理论研究

### 2.1 速率方程理论

在泵浦作用下, Ti<sup>3+</sup> 在 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体中的激光作用呈四能级结构<sup>[6]</sup>。钛宝石激光器的瞬态速率方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{dn}{dt} = (1 - e^{-\alpha L_0})P(t) - c\sigma nq - \frac{n}{\tau} \quad (1)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{L_0}{L} c\sigma nq - \frac{q}{t_c} \quad (2)$$

其中  $n$  和  $q$  分别为反转粒子数密度和光子数密度,  $\alpha$  为激光晶体对泵浦光的吸收系数,  $L_0$  为晶体长度,  $L$  是谐振腔的长度,  $c$  为光速,  $\sigma$  是荧光辐射截面,  $\tau$  为激光上能级的寿命,  $t_c$  为腔内光子寿命,  $P(t)$  为泵浦速率。

对于以  $TEM_{00}$  模振荡的脉冲固体激光器,输出光的时间波形可以近似为高斯型:

$$P(t) = P_0 \exp\left\{-\left[\frac{t}{T_1}(\ln 2)^{1/2}\right]^2\right\} \quad (3)$$

若以  $E_0$  代表总泵浦能量,  $T_1$  为泵浦激光在半高处的时间半宽度,  $V$  代表增益介质的体积,  $h\nu_p$  为泵浦光子的能量,那么,将  $P(t)$  的具体表达式代入上述速率方程,可得如下的关系式

$$\frac{dn}{dt} = A \exp\left\{-\left[\frac{t}{T_1}(\ln 2)^{1/2}\right]^2\right\} - c\sigma nq - \frac{n}{\tau} \quad (4)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{L_0}{L} c\sigma nq - \frac{q}{t_c} \quad (5)$$

其中

$$A = \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{E_0}{V \cdot h\nu_p \cdot T_1} (1 - e^{-\alpha L_0})$$

求解方程(4),(5),可获特定条件下  $n, q$  随时间的变化关系。对有限长的谐振腔,腔内光子数密度随时间的变化关系代表了输出功率随时间的变化关系,即输出光的时间波形。

本文中定义脉冲激光的脉宽为半高处的全宽度,时间延时为输出光峰值相对于泵浦光峰值的时间差即两个脉冲信号强度最大点之间的时间差。根据定义,泵浦光在  $t = 0$  时刻达到最大值。用二阶 Rung-Kutta 法<sup>[8]</sup>求方程(4),(5)的数值解。

## 2.2 理论结果

根据上述的分析,用计算机求速率方程的数值解,计算中的有关参数取值如下:晶体吸收系数  $\alpha_{490} = 2.6 \text{ cm}^{-1}$ ,晶体长度  $L_0 = 1.8 \text{ cm}$ ,腔长  $L = 40 \text{ cm}$ ,在中心波长  $780 \text{ nm}$  处的荧光辐射截面  $\sigma = 3.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,泵浦光脉宽为  $18 \text{ ns}$ 。

2.2.1 泵浦光与输出光的波形及相对关系如图 1 所示。输出光是一个与泵浦光形状相似的单脉冲,脉冲高度、宽度和相对于泵浦光脉冲的时间位置随泵浦状态和谐振腔状态的不同而不同。

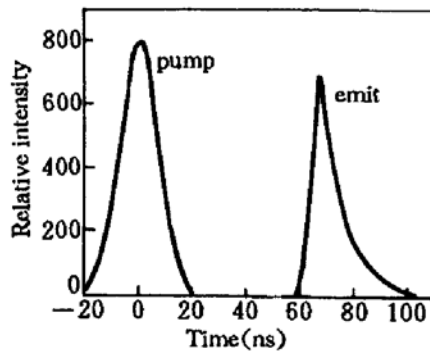


Fig. 1 Theoretical temporal profiles of a laser and its pump light

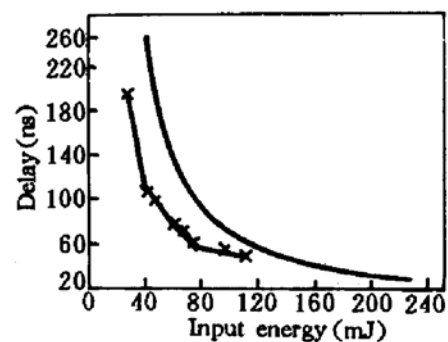


Fig. 2 Delay vs input energy

2.2.2 泵浦能量变化对输出的影响。图 2 和图 3 中的实线表示可调谐激光在某个波长下的输出延时和脉宽随泵浦能量的变化关系。这里  $\lambda = 780 \text{ nm}$ ,输出镜反射率  $R \sim 60\%$ 。由这两图可看出,输出延时和脉宽都随泵浦能量的增大而减小。这是因为当谐振腔条件(损耗)和晶体增益不变时,增大泵浦能量,提高泵浦速率,达到阈值条件所需的时间减少。受激辐射的速率正比于反转粒子数密度和光强,当泵浦速率提高后,受激辐射速率增大,输出激光的脉宽减小。

2.2.3 谐振腔输出耦合度的变化对时间特性的影响。在泵浦能量和工作波长( $\lambda = 780$

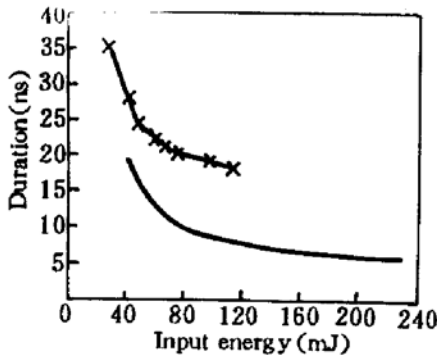


Fig. 3 Pulse duration vs input energy

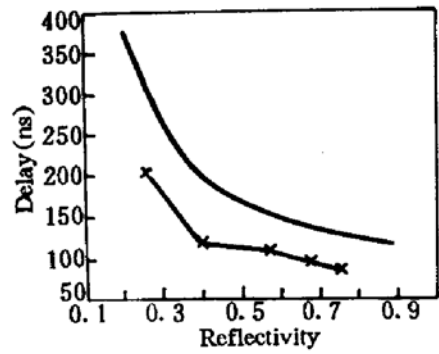


Fig. 4 Delay vs reflectivity

nm) 不变时, 改变谐振腔的输出耦合度, 延时的变化如图 4 中的实线所示, 这里泵浦能量为 100 mJ, 延时随反射率的增大而减小。这是因为, 反射率增大时, 谐振腔损耗减小, 在同样的泵浦条件下, 达到阈值的时间减小。脉宽的变化趋势与泵浦能量有关, 我们分别计算了 60 mJ, 100 mJ 和 200 mJ 泵浦的情况。在 60 mJ 泵浦时, 脉宽在  $R = 60\%$  处取得极小值; 100 mJ 泵浦时, 极小值位置为  $R = 35\%$ ; 200 mJ 泵浦时, 脉宽随反射率的增大而增大。这是因为当泵浦能量低而谐振腔损耗又较大时, 激光工作在阈值附近; 而当泵浦能量很高而输出镜反射率大时, 腔内形成的大量的光子无法及时输出, 在腔内多次来回振荡的结果使得输出脉宽增大。图 5 中实线是  $E = 60$  mJ 泵浦时的脉宽变化曲线。

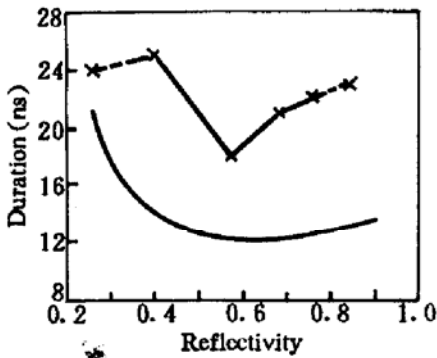


Fig. 5 Pulse duration vs reflectivity

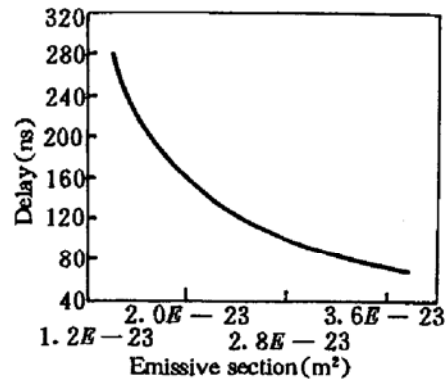


Fig. 6 Delay vs emission section

2.2.4 波长变化的影响。对于钛宝石晶体, 在泵浦作用下可以产生 650~1100 nm 的荧光辐射。不同波长的辐射截面不同, 在中心波长 780 nm 处最大, 约  $3.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。假定谐振腔的两个反射镜在波长变化范围不是很大的情况下, 反射率能保持不变, 则输出特性随荧光辐射截面的变化可以定性地反映波长变化对输出的影响。图 6 是  $E = 100$  mJ,  $R = 60\%$  时, 延时随辐射截面的变化曲线。随着辐射截面的增大, 延时减小, 脉宽也具有相似的变化趋势。这是因为, 在相同的泵浦速率和谐振腔条件下, 辐射截面增大, 增益增大, 达到阈值的时间减小, 而且达到阈值后, 腔内的光强随增益的增大而提高, 受激辐射加剧, 使得输出脉宽减小。因此, 根据这一估算, 输出延时和脉宽在中心波长附近应取最小值, 在调谐范围的两端延时和脉宽都较大。

### 3 实验研究

为了验证上述分析的正确性, 我们采用图 7 所示的装置观测脉冲钛宝石激光器的时间特

性。其中  $M_1$  和  $M_2$  组成谐振腔,  $M_3$  和  $M_1$  为对  $1.06 \mu\text{m}$  高透, 对  $0.53 \mu\text{m}$  高反的反射镜。在输出端用 PIN 光电管探测输出激光和剩余泵浦光的时间波形, 用快速响应示波器观察, 它们的响应时间均小于  $1 \text{ ns}$ 。用倍频 Nd:YAG 激光器泵浦, 脉宽约  $18 \text{ ns}$ , 输出波形为近高斯型, 出现弱调制的几率小于  $5\%$ 。实验中参数选择均与理论分析时相同, 晶体尺寸为  $5 \times 5 \times 18 \text{ mm}^3$ , 对  $490 \text{ nm}$  的吸收系数  $\alpha = 2.6 \text{ cm}^{-1}$ , 谐振腔为平平腔, 腔长为  $40 \text{ cm}$ 。

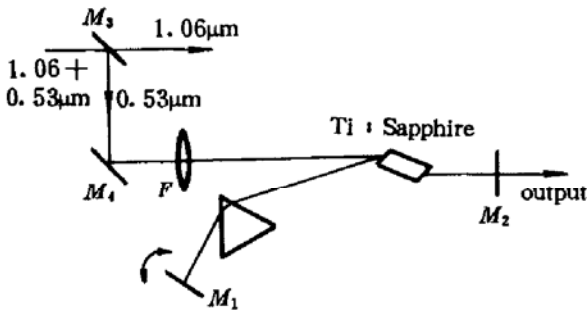


Fig. 7 Setup for the experiments

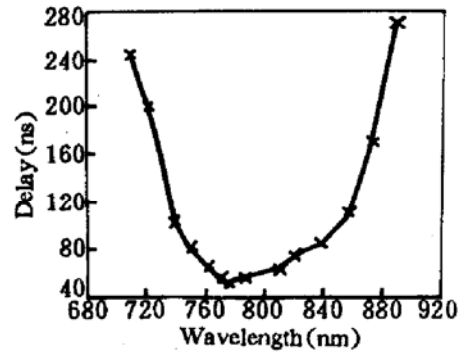


Fig. 8 Delay vs wavelength

实验中观察到类似图 1 的输出光和泵浦光波形。获得  $706 \sim 911 \text{ nm}$  的可调谐输出, 在中心波长  $780 \text{ nm}$ ,  $R = 57\%$  时, 最小延时为  $48 \text{ ns}$ , 最小脉宽为  $18 \text{ ns}$ ; 在调谐范围的边缘, 最大延时为  $270 \text{ ns}$ , 最大脉宽为  $50 \text{ ns}$ 。如此大的变化范围与腔镜在不同波长处的反射率不同有关, 在调谐范围的两端, 反射率明显下调, 这与理论假定不同。但所观测到的延时脉宽随泵浦能量、反射率和波长的变化关系与理论曲线(相同参数条件下)具有相同的变化趋势, 如图 2~5 及图 8 中的带点的曲线所示。但理论值与实验值之间存在一定的偏差。

## 4 讨 论

至此, 我们已对 ns 量级脉冲激光泵浦的钛宝石激光器的时间特性进行了研究。理论结果与实验结果基本一致, 具有相同的变化趋势。但在数值上延时的理论值偏大而脉宽的理论值偏小。这主要是因为理论计算中所采用的近似与实际情况之间的偏差。在求解速率方程时, 我们将晶体所吸收的泵浦能量对增益介质的体积求平均作为泵浦速率。当晶体较长时, 泵浦端附近一定长度内的晶体起增益作用, 而远离泵浦端的那一段由于泵浦光强度太低难以达到真正的增益。所以, 平均泵浦速率的求法使得理论计算中泵浦速率的取值小于实际值, 致使延时的理论值偏大。导致脉宽实验观测值偏大的主要原因是输出光存在一定的线宽, 线宽内不同波长的光延时和脉宽不同, 实验观测到的是这一线宽内所有波长的光输出的总效果, 它的总脉宽大于理论分析中假定的单一波长的输出脉宽值。如果对泵浦速率的求法采取更为精确的近似并对输出线宽加以限制, 则实验结果与理论结果将更好地吻合。

## 参 考 文 献

- 1 Patrick Georges, Frederick Fstable, Francois Salin *et al.*. High-efficiency multipass Ti : sapphire amplifiers for a continuous-wave single-mode laser. *Opt. Lett.*, 1991, 16(1) : 144~146
- 2 Jeff Squier, Francois Salin, Gerard Mourou. 100 fs pulse generation and amplification in Ti :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Opt. Lett.*, 1991, 16(5) : 324~326
- 3 G. Vaillan Court, T. B. Norris, J. S. Coe *et al.*. Operation of a 1 kHz pulse-pumped Ti : sapphire regenerative

- amplifier. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6): 317~319
- 4 James C. Barnes, Norman P. Barnes, George 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
- 5 徐 冰, 林礼煌, 欧阳斌 等. 增益开关型 Ti<sup>3+</sup> : 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
- 6 方香云, 周寿桓. Ti : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可调谐激光器综述. *激光与红外*, 1991, **21**(6): 10~13
- 7 周炳琨, 高以智, 陈家骅 等编. *激光原理*, 北京: 国防工业出版社
- 8 李庆杨 等编. *数值分析*, 武汉: 华中工学院出版社

## Time Characteristics of a Pulsed Ti : sapphire Laser

Fang Xiangyun Wang Huiru Zhou Shouhuan

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015)

**Abstract** The time characteristics of a pulsed Ti : sapphire laser have been studied theoretically based on the rate equation of four-level system. Pumped by frequency double Q-switched Nd : YAG laser, the output delay and pulse duration of a tunable laser vary with its input energy, the index of reflection of its output mirror and the wavelength. The experimental and theoretical results coincide with each other.

**Key words** Ti : sapphire laser, tunable lasers

## 第三届国际光束传输学术会议在吉隆坡召开

1994年8月23~26日,在马来西亚首都吉隆坡召开了第三届国际光束传输学术会议,我国12名科学家出席了此次会议,并在大会上宣读了8篇论文,介绍了我国科学家在光动力研究、无衍射光束研究、光束在光纤中的传输研究、可见光和紫外激光研究、小型固体激光器研究和激光技术应用研究等方面的成果,受到与会科学家的注目。

会议期间我国科学家参观了马来亚大学光电子技术实验室,并和那里的科学家交流了激光技术的发展和应用的的信息,探讨了合作研究的途径。马来亚大学从1988年开始激光技术研究,目前在气体激光器、金属蒸气激光器、全息技术、光传感技术、激光工业应用、激光医学应用等方面已取得不少研究成果。

第四届光束传输会议将于1996年在香港举行。

(纪 钟)