

掺钛蓝宝石激光器的增益开关特性研究

杨扬 刘宏发 张国威
(北京理工大学, 北京, 100081)

摘要: 实验研究了调 Q Nd:YAG 激光器泵浦的增益开关型掺钛蓝宝石激光器的时间特性, 泵浦能量水平(泵浦能量/阈值能量)变化范围为 2.1~3.8, 腔长变化范围为 20cm~60cm, 并改变了腔的损耗。根据增益开关激光器时间特性的理论, 激光脉冲的建立时间和其脉冲宽度取决于泵浦能量水平和腔长, 并与腔损耗成反比, 而与泵浦脉宽和波形无关, 实验结果与理论分析相符。当用 10ns 脉宽的激光脉冲泵浦时, 在 20cm 短腔长情况下获得了比泵浦光脉宽窄的仅 4ns 脉宽的激光脉冲。

关键词: 掺钛蓝宝石 增益开关 时间特性

Study on the gain-switching characteristics of Ti:sapphire lasers

Yang Yang, Liu Hongfa, Zhang Guowei
(Beijing Institute of Technology)

Abstract: The temporal characteristics of a gain-switched Ti:sapphire laser pumped by a frequency-doubled Q-switched Nd:YAG laser have studied experimentally at the range of the pump level (pump energy/threshold energy) from 2.1 to 3.8, the cavity length from 20cm to 60cm. According to the theoretical model of the temporal characteristics for the gain-switching laser oscillator, the buildup time and pulse-width of the oscillating mode depend on the pump level and the cavity length, inversely as the cavity loss, and also is not dependent on the pump pulse-width and the waveshape. The experimental result coincides well with the theoretical analysis. The laser oscillator with a short cavity length $L = 20\text{cm}$ pumped by a 10ns pulse-width Q-switched laser outputs a 4ns shorter laser pulse.

Key words: Ti-doped sapphire gain-switching temporal characteristics

一、引言

掺钛蓝宝石激光器由于其激光上能级寿命短(仅 $3.2\mu\text{s}$), 难于通过灯泵的 Q 突变技术实现高转换效率的巨脉冲激光。因此大多采用其它脉冲激光作为其泵浦源, 如 Nd:YAG 激光的倍频光(532nm)和铜蒸汽激光(511nm)等。这些激光具有很短的脉冲宽度(通常在 10~50ns 范围)和较高的功率(MW 级)。用这种 10ns 量级脉冲激光对掺钛蓝宝石晶体进行泵浦时, 也

可直接获得高功率的激光巨脉冲,通过参数的优化选择,其光-光转换效率可高达40%左右。用这种工作方式获得激光巨脉冲的技术称之为增益开关(Gain-switching)技术。增益开关型激光器的激光脉冲建立过程不同于Q突变技术,它具有不同的机理和特性。增益开关技术可以说是一种增益突变技术,即在10ns量级的瞬间(突变)获得极高增益的条件下而得到激光的巨脉冲;而Q突变技术实为一种损耗突变技术,它在低Q值(高损耗)条件下先实现增益的积累,在达到高增益时由Q值突变释放能量而实现巨脉冲激光输出。

自掺钛蓝宝石激光器出现以来,已有一些论文实验研究了增益开关型掺钛蓝宝石固体可调谐激光器的时间特性^[1~5],主要研究了其激光脉冲建立时间(也称延迟时间) t_b 和输出激光脉冲宽度 Δt 与泵浦光能量(密度)的关系。虽然由于各自的实验条件不同,如腔长不同、损耗不同、阈值不同,因而具体的数据有差别,但都显示出了相似的实验曲线和实验结果。例如用10~50ns不同泵浦脉宽激光进行泵浦时,都可能获得<10ns~>300ns的连续可变脉宽的激光输出。文献[6]从理论上分析和阐述了这种增益开关技术的时间特性,分析表明这种增益开关型脉冲固体激光器的时间特性主要取决于两个参数:泵浦水平 $r = N_i/N_{th}$ (起始粒子数反转/阈值粒子数反转)与腔内光子寿命 $\tau_c = T/\delta_c$ (光在腔内往返一次的时间/腔的损耗),而与泵浦光的脉冲宽度和波形无关。本文将结合掺钛蓝宝石激光器进一步实验研究其时间特性,用文献[6]的理论进行比较与分析,表明这些实验结果和文献[1~5]的主要实验结果与理论很好相符。

二、理 论

文献[6]给出了10ns量级脉冲激光泵浦时,过渡金属离子脉冲激光器的峰值光子密度如下式

$$n_{max} \simeq \varphi(r) \cdot N_i \quad (1)$$

式中,

$$\varphi(r) = (r - 1 - \ln r)/r \quad (2)$$

式中, $r = N_i/N_{th}$ 。显然 $\varphi(r) < 1$,其物理意义是起始粒子数反转可转变为峰值光子的比率。而激光脉冲建立的时间如下式

$$t_b \simeq \beta \cdot f(r \cdot N_{th}) \cdot \tau_c \quad (3)$$

式中,

$$f(r \cdot N_{th}) = 1/(r - 1) \cdot \ln[\varphi(r) \cdot N_i] \\ = 1/(r - 1) \cdot \ln[\varphi(r) \cdot r \cdot N_{th}] \quad (4)$$

式中, $\tau_c = T/\delta_c$ 为腔内光子寿命, $T = 2L/c$ (L 为腔长, c 为光速)为光在腔内往返一次的时间, δ_c 为腔损耗, $\delta_c = \ln(1/R) + 2\alpha_m L + L_0$ ($R = R_1 \cdot R_2$ 为耦合损耗, α_m 是晶体的红外残余吸收, L_0 为其它损耗)。系数 β 有值 $1 < \beta < 2$,一般取1.1~1.3,视 $r \cdot N_i$ 大小由实验确定之。其激光脉冲宽度则如下式

$$\Delta t \simeq \alpha \cdot F(r) \cdot \tau_c \quad (5)$$

式中,

$$F(r) = \eta(r)/\varphi(r) \quad (6)$$

式中,

$$\eta(r) = (N_i - N_t)/N_i \quad (7)$$

N_t 为剩余的粒子数反转密度,因此 $\eta(r)$ 的意义是储能的提取效率。系数 α 有值 $1 < \alpha < 2$ 。

上述关系式表明,激光器增益开关时间特性取决于参数 r 和 τ_c ,即与泵浦水平 r 及其函数 $\varphi(r)$ 有关,与腔长 L 成正比,与腔损耗成反比,而与泵浦光脉冲宽度无关。

三、实验装置和实验条件

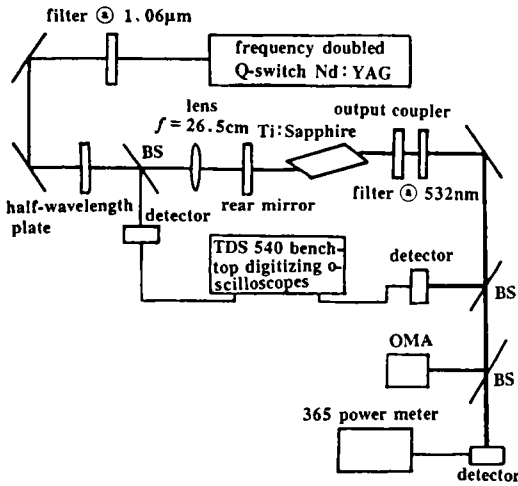


Fig. 1 Experimental setup of a gain-switched laser

实验装置如图 1 所示, 泵浦光为调 Q Nd:YAG 激光器的倍频光(532nm), 滤光片将截止残余的 1.06 μm 基波, 半波片用于调节泵浦光的偏振方向, 以与 Ti³⁺Al₂O₃ 晶体的 π 方向相一致。透镜焦距 $f = 26.5\text{cm}$, 输入镜为一双色平面镜, 对泵浦光 532nm 为高透, 对波长 720~900nm 为高反, 平面输出镜也为一宽带的反射镜, 在 780nm 处的反射率约为 85%, 两镜组成非色散的平-平腔。Ti³⁺:Al₂O₃ 晶体的端面按布儒斯特角切割, 其 c 方向垂直于光的传播方向且平行于纸面(即 π 方向)。晶体吸收系数 $\alpha(532) = 1.5\text{cm}^{-1}$, 长度为 1.6cm。晶体放置在靠近输入镜一端约 9.5~11cm 处, 离泵浦光会聚点约 2~4cm, 以免损伤晶体。

TEK-TDS-540 数字存储示波器用于测量泵浦光脉冲和输出激光脉冲宽度和波形, 以及两者之间的延迟时间(激光脉冲建立时间)。探测器的上升时间为 0.45ns。输出光的能量由 Sci-entech-365 能量计测定。EG & G-OMA 用于监测激光器的光谱分布, 本实验(非色散腔)的激光峰值波长约在 780nm 附近。

泵浦光的能量密度范围为 2~3.8J/cm², 以获得不同的 r 值。腔长变化范围为 20~60cm, 腔损耗 $\delta_c = 0.4 \sim 0.6$ (因泵浦光截面大小不同)。

四、实验结果与分析

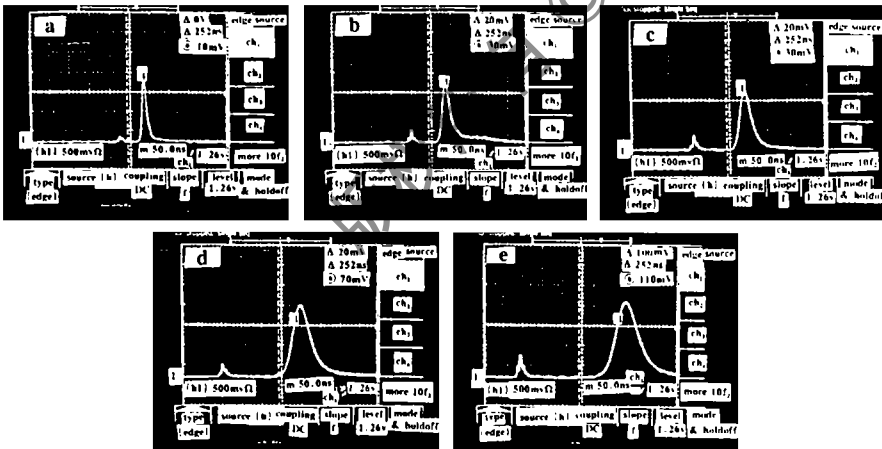


Fig. 2 Temporal characteristics of a gain-switched laser vers the cavity length (a - L = 20cm; b - L = 30cm; c - L = 40cm; d - L = 50cm; e - L = 60cm)

1. 在一定泵浦水平(r 不变)条件下,测定脉冲建立时间和激光脉冲宽度与腔长的关系 $t_b(L)$ 和 $\Delta t(L)$ 。图 2 是泵浦光斑 $W_p \approx 0.4\text{mm}$, 泵浦能量密度为 $2.7\text{J}/\text{cm}^2$ 时,腔长 L 分别为 20cm, 30cm, 40cm, 50cm 和 60cm 的一组示波器照片。照片中第一个小脉冲是泵浦光脉冲信号,脉宽约为 11ns。第二个脉冲为 $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光器的输出脉冲波形,随着腔长的加长,激光脉冲建立时间由 50ns 左右逐渐增至 300ns 以上;而脉冲宽度则由 10ns 左右加宽到近 100ns。

图 3 和图 4 是泵浦水平 r 分别为 2.1, 2.7, 3.3 和 3.8 时的 $t_b(L)$ 和 $\Delta t(L)$ 曲线。实验表明, t_b 和 Δt 与腔长 L 基本上呈线性关系,遵守(3)式和(5)式的规律。而 $f(r \cdot N_{th})$ 和 $F(r)$ 的值,在泵浦水平较低时,数值较大,斜率也大;当泵浦水平增高时,不仅数值显著变小,且斜率减小,斜率的变化也减小,时间特性趋于稳定。

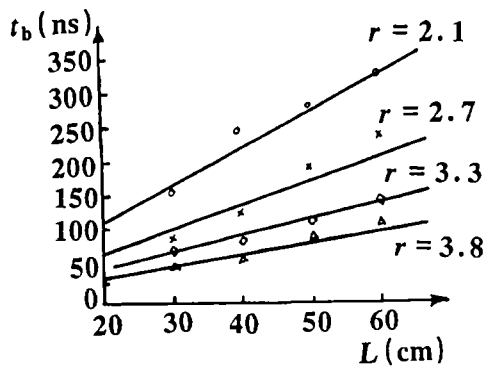


Fig. 3 Pulse buildup time vers the cavity length

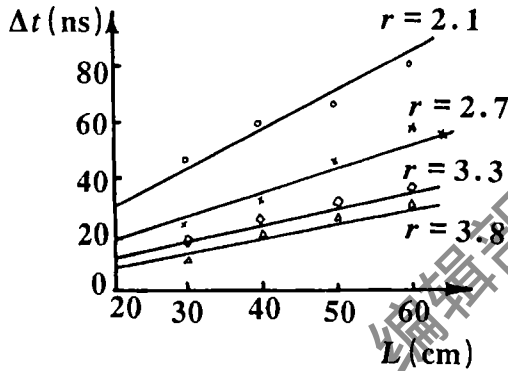


Fig. 4 Pulse-width vers the cavity length

在短腔长($L = 20\text{cm}$)时,在 $r = 3.8$ 条件下,得到了 4~5ns 的输出脉冲宽度,这比泵浦光的脉宽短一半还多。文献[5]即使用脉宽为 26ns 脉冲激光进行泵浦,由于腔长短($L = 8.3\text{cm}$),也获得 3~4ns 脉宽的输出,而在较长腔长时^[1~4],就可能得到比泵浦光脉宽要宽得多的输出脉冲宽度。这些结果都充分证明,增益开关型激光器的输出脉冲宽度,确实与泵浦光的脉宽无关。因此称增益开关型激光器对泵浦光脉冲宽度具有压缩作用或展宽作用,就不甚确切。应为激光输出脉宽由泵浦水平和腔长(严格说,应为光子寿命)所决定,而与泵浦脉宽无关。分析表明,对甚短腔长和高损耗的激光器,在高泵浦水平时,可能获得 1ns 左右的短脉冲。

2. 在一定腔长条件下,测定激光脉冲建立时间和激光脉冲宽度与泵浦水平(泵浦能量密

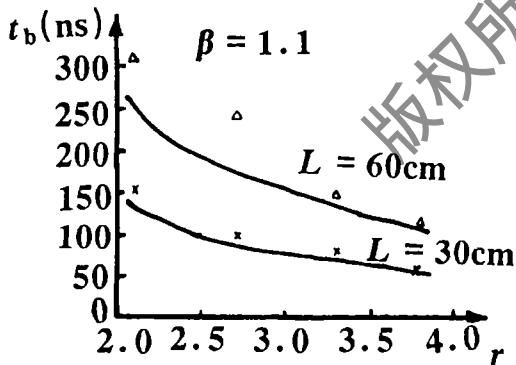


Fig. 5 Pulse buildup time vers the pump energy level

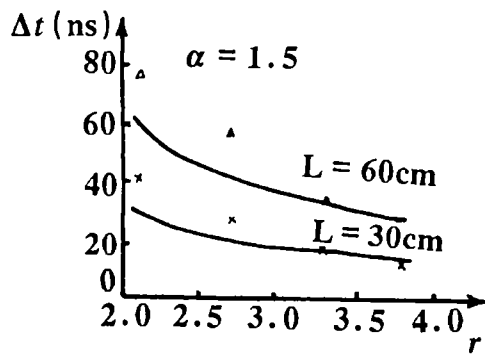


Fig. 6 Pulse-width vers the pump energy level

度)的关系 $t_b(r)$ 和 $\Delta t(r)$ 。腔长分别为 $L = 30\text{cm}$ 和 60cm , r 范围为 $2.1 \sim 3.8$ 。图 5 和图 6 分别为 $t_b(r)$ 和 $\Delta t(r)$ 曲线, 其中实线为理论曲线, $t_b(r)$ 曲线取 $\beta = 1.1$, $\Delta t(r)$ 曲线取 $\alpha = 1.5$ 。 x 和 Δ 分别为 $L = 60\text{cm}$ 和 30cm 的实验值。可以看出, 在 $r > 3$ 时相符得较好; 而在 $r < 3$ 时, 实验值偏大, 这正如文献[6]所指出, α 和 β 值也应与 r 有关, 对较小的 r 情况, α 和 β 应取较大的值。即随着 r 的减小而增大。同时还可看出, 腔长越长, 其值应更大。

3. 相同泵浦水平条件下, 泵浦光光斑大小(衍射损耗)的影响。图 7 和图 8 分别为泵浦光斑半径为 $W_p = 0.23\text{mm}$ 和 0.57mm , r 都为 3.3 时的 $t_b(W_p \cdot L)$ 和 $\Delta t(W_p \cdot L)$ 曲线。(3)式和(5)式表明, t_b 和 Δt 都正比于光子寿命 τ_c 。在腔长一定时, 即反比于腔损耗。因此, 当泵浦光斑半径 W_p 变小时, 则衍射损耗增大, 从而使激光脉冲建立时间缩短, 脉冲宽度变窄。实验结果与理论相符, 由于有相同的 r 值, 因此为一对斜率相同的平行直线。

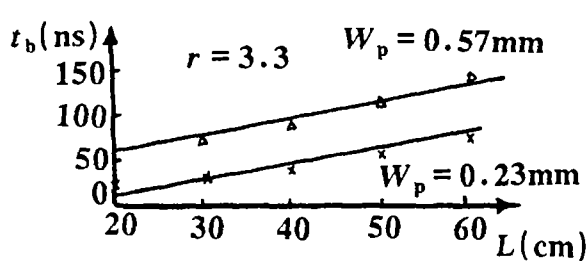


Fig. 7 Pulse buildup time vers the loss

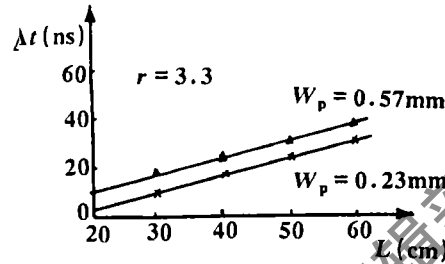


Fig. 8 Pulse-width vers the loss

4. 输出激光脉冲的波形与泵浦光脉冲波形无关。由图 2 中照片可知, 实验所用的泵浦脉冲带有两个次峰, 而输出的激光恒为光滑的、近高斯型的脉冲。文献[5]的实验中, 曾分别用带调制的和光滑的调 Q 脉冲进行泵浦, 但得到的激光脉冲也都是光滑的。这可由文献[6]的分析说明, 泵浦光的波动, 只对增益建立的速率有影响, 而对激光脉冲的形成没有影响。因此, 不管泵浦光脉冲有何波形, 也不管是否有调制性的多个尖峰, 其输出的激光脉冲都是光滑的。

5. 只观察到单脉冲输出, 没观察到双脉冲。在本实验的条件范围内, 从没发现有双脉冲现象。在文献[5]中出现的双脉冲是值得研究的, 该实验的泵浦水平较高 ($r > 5.5$), 且腔长短 (16cm), 损耗大 ($T = 45\%$)。因此, 具有高增益储能和短光子寿命 ($< 2\text{ns}$), 从而具有激光脉冲建立时间快(约 15ns)和脉冲宽度窄 ($\sim 5\text{ns}$)的特性。

参 考 文 献

- 1 Eggleston J M, Deshazer L G, Kangas K W. IEEE J Q E, 1988; QE-24:1009
- 2 Rines G A, Moulton P F. Opt Lett, 1990; 15:434
- 3 吴路生, 陈一宏, 赵梅荣 *et al.* 中国激光, 1990; 16:4
- 4 Steele T R, Gerstenberger D C, Drobshoff A *et al.* Opt Lett, 1991; 16:399
- 5 徐 冰, 林礼煌, 欧阳斌 *et al.* 光学学报, 1993; 13:425
- 6 张国威. 激光技术, 1995; 19(3):129

作者简介: 杨 扬, 男, 1958年1月出生。讲师, 硕士。主要从事固体可调谐激光器和光波导的研究。

刘宏发, 男, 1944年2月出生。工程师。从事染料激光器, 固体可调谐激光器和红外光波导的研究、教学、实验工作。

张国威, 男, 1933年7月出生。教授。主要从事染料激光器, 固体可调谐激光器, 分光技术, 红外光波导等研究。

收稿日期: 1994-11-28