

# 准连续主动锁模调 Q Nd:YLF 振荡器

曹渭楼 陈庆浩 徐仁芳 周 峰 罗宁一

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

朱 智 敏

(上海复旦大学, 物理系)

## 提 要

顺利建成了用于磷酸盐钕玻璃激光核聚变系统的准连续主动锁模调 Q Nd:YLF 振荡器。报道了其稳定性、可靠性和高信噪比的特性。

关键词: 准连续主动锁模; 激光核聚变。

## 一、引 言

亚毫微秒激光主振荡器是激光核聚变系统的核心部件, 它必须幅度稳定、波形光滑和具有很高的信噪比(一般要大于  $10^7$  至  $10^9$ )。由于激光系统工作在高强度负载状态, 振荡器激光能量和脉宽的起伏以及光束在空间和时间上的调制所引起的自聚焦、自相位调制, 都可能对光学件造成破坏, 使激光系统无法安全运转。另外, 无规调制的激光脉冲会使激光与等离子体的相互作用变得十分复杂, 在实验上很难找出它们的规律。要获得高质量的脉冲, 脉冲主动锁模或主被动锁模都是很难实现的, 只有采用连续或准连续锁模的技术, 才能使激光脉冲进入稳态, 消除脉冲的亚结构, 获得高的信噪比。为此, 我们研制了准连续预激光锁模调 Q 的振荡器, 它既可输出质量很高的激光脉冲, 又可获得相当的激光功率和降低器件的热平均负载。

## 二、振荡器的实验研究

对于磷酸盐激光系统, 振荡器可以选择三种工作物质: Nd:YAG、Nd:YLF 和掺钕磷酸盐玻璃。由表 1, 磷酸盐玻璃的热导系数和受激发射截面很小, 频率带宽过大, 难以获得光滑的激光脉冲。Nd:YAG 在  $1.052 \mu\text{m}$  的受激发射截面远比  $1.064 \mu\text{m}$  为低, 选频相当困难, 而且  $\frac{dn}{dT}$  和线膨胀系数  $\alpha$  很大, 动态热稳定性能很差。另外, 它的非线性系数  $n_2$  很大, 极易产生自相位调制。对 Nd:YLF 来说, 动态热稳定性能极好, 热导系数介于玻璃与 Nd:YAG 之间, 而  $n_2$  极小, 破坏阈值很高。因此, 我们选定 C 轴 Nd:YLF 为激光工作物质, Nd:YLF 的荧光光谱见图 1 所示。

收稿日期: 1986年9月4日; 收到修改稿日期: 1986年12月12日

Table 1 Properties of laser materials

PROPERTY		Nd:YAG	Nd:YLF <sub>3</sub>	Q-98
Index of Refraction	$\eta_0$	1.82	(1.45) <sub>o</sub> (1.47) <sub>e</sub>	1.55
Laser Wavelength	$\lambda$	1.064 $\mu\text{m}$ , 1.052 $\mu\text{m}$	(1.047 $\mu$ ) <sub><math>\pi</math></sub> (1.053 $\mu$ ) <sub><math>\sigma</math></sub>	1.053
Emission Cross Section	$\sigma$	$4.6 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 1.064 $\mu\text{m}$ $1.7 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 1.052 $\mu\text{m}$	$(6.2 \times 10^{-19} \text{cm}^2)$ <sub><math>\pi</math></sub> $(1.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2)$ <sub><math>\sigma</math></sub>	$4.5 \times 10^{-20} \text{cm}$
Density	$\rho$	4.55 gr/cm <sup>3</sup>	3.99 gr/cm <sup>3</sup>	2.5 gr/cm <sup>3</sup>
Thermal Conductivity	$K$	0.13 W/cm-K	0.06 W/cm-K	0.01 W/cm-K
Specific Heat	$c$	0.59 J/gr-K	0.79 J/gr-K	1.2 J/gr-K
Diffusivity	$k$	0.048 cm <sup>2</sup> /s	0.019cm <sup>2</sup> /s	0.003 cm <sup>2</sup> /s
Thermal Expansion	$\alpha$	$6.9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$(13 \times 10^{-6} \text{K}^{-1})$ <sub>A</sub> $(8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1})$ <sub>C</sub>	$8.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
$\frac{dn}{dT}$ (1.06 $\mu$ )	$\frac{dn}{dT}$	$7.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$(-2.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1})$ <sub>A</sub> $\times (-4.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1})$ <sub>C</sub>	
Nonlinear Index	$\eta_2$	$4.09 \times 10^{-13} \text{esu}$	$0.59 \times 10^{-13} \text{esu}$	$1.2 \times 10^{-13} \text{esu}$
Fluorescence Lifetime	$\tau$	(1%) $2 \times 10^{-4} \text{s}$	(1.5%) $4.8 \times 10^{-4} \text{s}$	(6%) $2.7 \times 10^{-4} \text{s}$
Fluorescence Linewidth	$\Delta\nu$	6 cm <sup>-1</sup>	12.5 cm <sup>-1</sup>	216 cm <sup>-1</sup>
Damage Threshold	$D$	10.1 GW/cm <sup>2</sup>	18.9 GW/cm <sup>2</sup>	8 GW/cm <sup>2</sup>
Livermore Figure of Merit $\left(\frac{\sigma\eta_0}{\eta_2}\right)$	$F$	$2.05 \times 10^{-6}$	$15.2 \times 10^{-6}$	$0.58 \times 10^{-6}$

为使振荡器稳定工作,一定要采用重复率运转的方式,这不仅是为了使振荡器处于热平

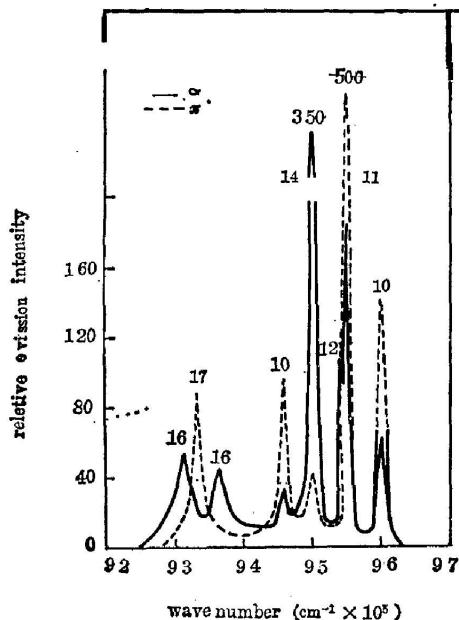


Fig. 1 Fluorescence spectrum of  ${}^4F_{3/2}$   $\rightarrow$   ${}^4I_{11/2}$  transition of  $\text{LiYF}_4:\text{Nd}(300\text{K})$

衡状态,而且是监测和控制系统所要求的必备条件。但是准连续器件与重复率脉冲器件一样存在动态热畸变的问题,一定要控制泵浦功率,真正使预激光进入稳态。如果系统效率很低,泵浦功率过大,动态热畸变将会使整个预激光阶段出现无规的弛豫振荡(见图2a)。另外,泵浦灯的气压不宜过高,否则连续谱成分增多,进一步降低了泵效率,使动态热畸变更趋严重。

如美国的 Argus 和 Shira 掺钕硅酸盐玻璃激光核聚变系统, D. J. Kuizenga 在准连续 Nd:YAG 振荡器上做了许多工作<sup>[1]</sup>。由于 Nd:YLF 晶体的受激发射截面仅为 Nd:YAG 的三分之一,热导系数也只有 Nd:YAG 的 1/2,加上 Nd:YLF 的光学质量远不如 Nd:YAG,这就给振荡器的研究带来了很大困难。

电子工业部 11 所提供的 Nd:YLF C 轴晶体,在采用新工艺和评价标准之后,质量有了明显

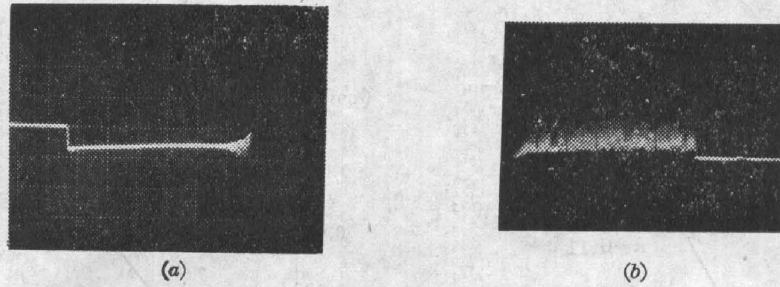
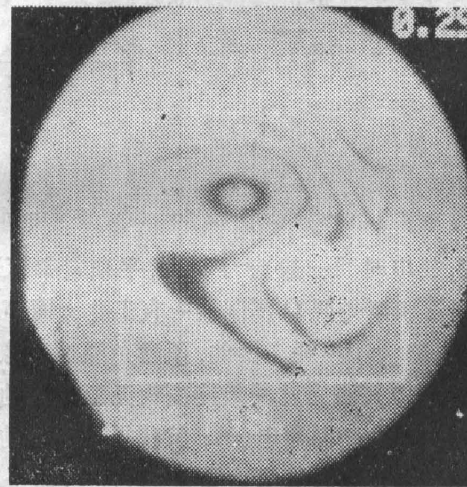
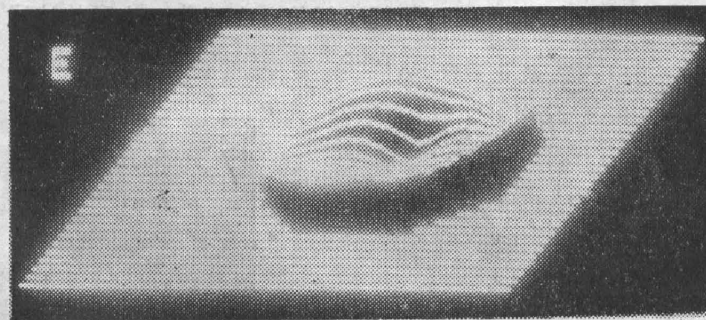


Fig. 2 Prelase waveforms as the modulator is turned off

- (a) pumping peak power 10 kW (1ms/div.)  
 (b) pumping peak power 5 kW (1ms/div.)



(a)



(b)

Fig. 3 Interferogram of the Nd:YLF rod (RMS=0.299 $\lambda$ , PU=1.494W, 1804PTS)

的改进。图 3 是所用 Nd:YLF 棒的干涉图, 峰值波面畸变为  $1.493\lambda$  ( $6328 \text{ \AA}$ ), 平均波面畸变为  $0.299\lambda$  (选取 1804 个测试点)。我们采用 1.5m 的激光腔, 全反射板的曲率半径为 3m, 单椭圆玻璃腔体全腔水冷, 用阈值法对 Nd:YLF *O* 轴激光晶体的激光性能进行了测试。图 4 给出了不同耦合率输出 ( $R_2$  表示耦合反射镜的反射率) 和小信号增益系数与准连续泵浦峰值功率的关系。

振荡器的光学系统与控制系统示于图 5, Nd:YLF 的尺寸为  $\phi 6 \times 76 \text{ mm}$ 。泵浦过程

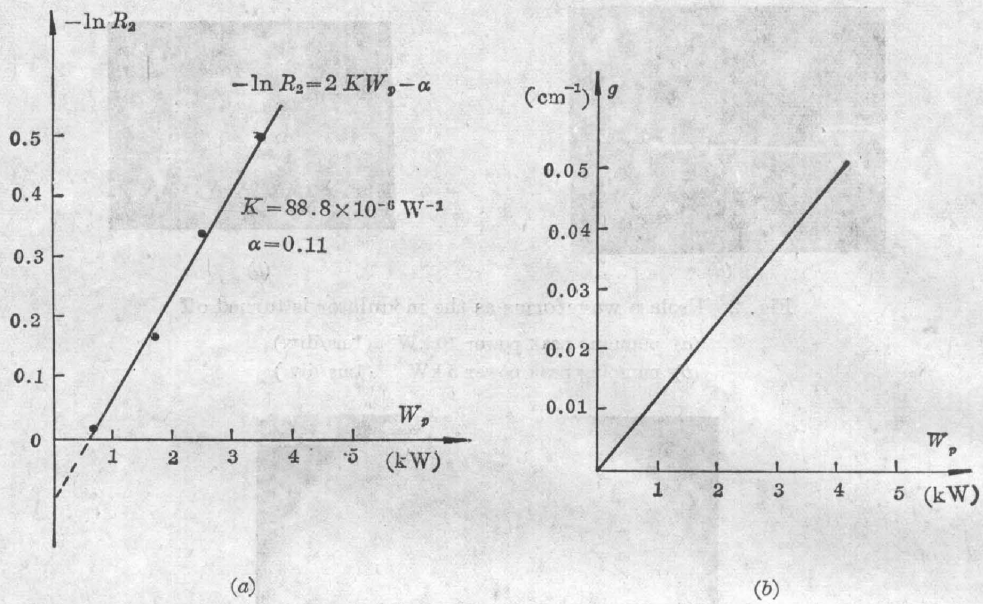


Fig. 4 Small signal gain coefficient as a function of pumping peak power

中, 氩灯放电电流保持不变, 放电时间一般选为 6 ms, 平顶斜率可调的灯光波形示于图 6。在这段时间内, 声光锁模调制器和声光调 Q 调制器一直工作, 而声光调 Q 调制功率控制在适当的水平上, 以使得激光增益略大于损耗。因此, 预激光经过弛豫振荡之后进入准连续状态 (图 7)。在此准连续锁模过程中, 激光脉冲最终变为无亚结构的高信噪比的变换极限的脉冲。这时将 Q 开关打开 (退去调 Q 调制器电压), 就获得了稳定的具有相当功率的亚毫微秒激光脉冲序列 (图 8)。这时的器件输入峰值功率为 5170 W, 而平均功率仅为 30 W, 重复率为每秒一次。

在 6 ms 的预激光时间内, 激光器一般超出阈值 5% 工作。为了使这段时间的激光增

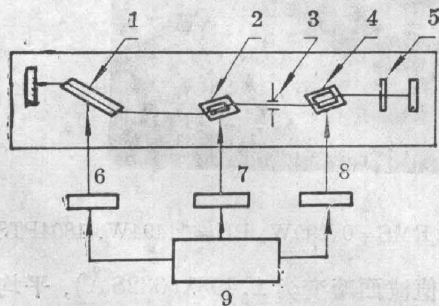


Fig. 5 Schematic of the oscillator with a typical control system

- 1—Nd:YLF 2—Q-switch 3—Iris 4—modulator
- 5—etalon 6—lamp driver 7—Q-switch driver
- 8—modulator driver 9—timing system

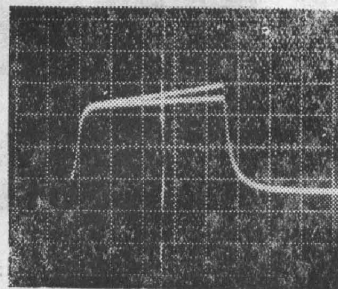


Fig. 6 Lamp light waveforms (1ms/div). The width, amplitude and slope are all adjustable

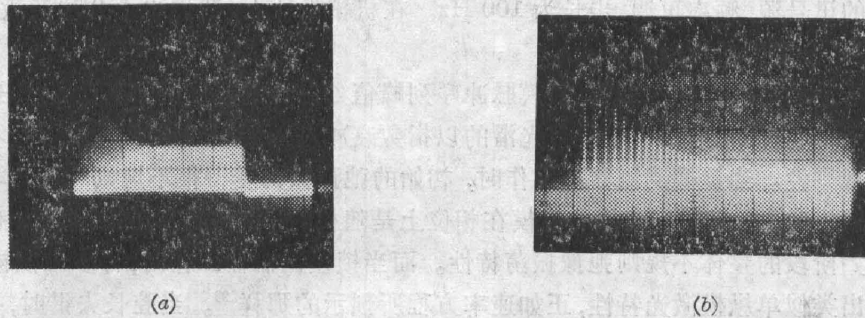


Fig. 7 Typical pre-lase waveforms as the modulator is turned on  
(a) 1 ms/div; (b) 0.2 ms/div

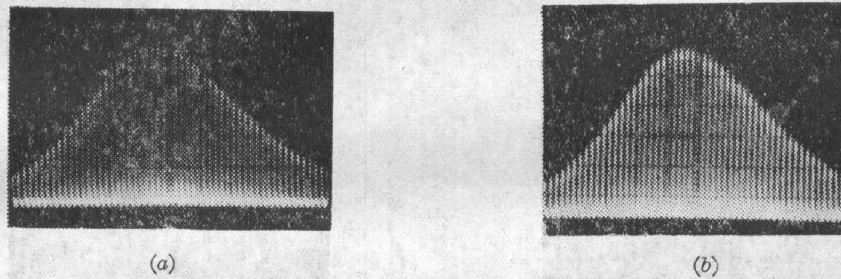


Fig. 8 The waveforms of the output pulse train (50 ns/div)  
(a) 15 shots; (b) 50 shots

益保持不变, 通常的  $LC$  放电脉冲不能满足要求, 为此我们研制了专门的方波电源, 电流由 0 至 50 A 可调, 电流斜率亦可控制。氩灯的预电离电流为 1 A, 电输入功率的不稳定性  $< 0.3\%$ , 灯的寿命  $> 10^7$  次。

众所周知, 声光锁模调制器的谐振频率随温度漂移。声光介质一般选用上下两面平行的石英谐振腔体。换能器为  $\text{LiNbO}_3$  晶片, 置于石英腔体上表面使在石英腔体中形成声的驻波, 换能器的热耗直接影响到石英谐振腔的温度, 从而改变了腔体的厚度 (亦即谐振频率)。由于对调制器进行了恒温控制和脉冲加压, 从而保证了调制器的谐振频率始终一致 (见图 9)。

另外, 我们发现调制讯号源的短期频率稳定性是十分重要的。如果在 6 ms 的预激光时间内讯号源存在相位起伏, 则可在整个预激光过程中观察到严重的弛豫振荡, 如此, 我们选

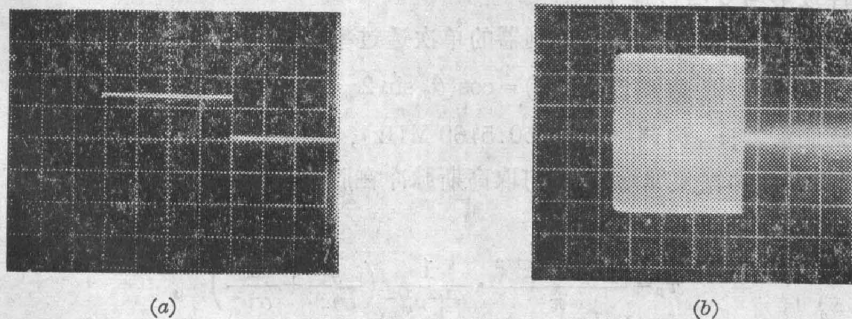


Fig. 9 The RF signal of the modulator driver or Q-switch driver (2ms/div)  
(a) control signal; (b) RF signal of the modulator driver

用了稳定的讯号源,频率可调,步长为 100 Hz。在机械设计上,我们也十分注意激光腔的稳定性,采用了合理的机械结构。

振荡器经过精细地调整之后,锁模脉冲序列峰值处脉冲的幅度的不稳定性 $< \pm 2\%$ 。在正常情况下,预激光讯号是一个非常光滑的以指数衰减进入稳态的讯号(见图 7),没有任何其它的不规则性。当锁模调制器不工作时,初始的弛豫振荡变得很不规则(见图 2b),这是由于没有锁模时,所有高于阈值的纵模在相位上是随机的,因而各自独立地产生弛豫振荡,形成了初始阶段的整体不规则弛豫振荡特性。而当锁模调制器工作时,许多纵模被抑制了,激光呈现出类似单纵模激光特性,正如速率方程所预示的那样<sup>[2]</sup>。当腔长失谐时,整个预激光会呈现出强迫振荡的现象(见图 10)。这时,调制讯号源与腔的差频讯号迫使激光弛豫振荡。所以,预激光的性质反映了振荡器工作状态的好坏,它是监测振荡器的有效手段。

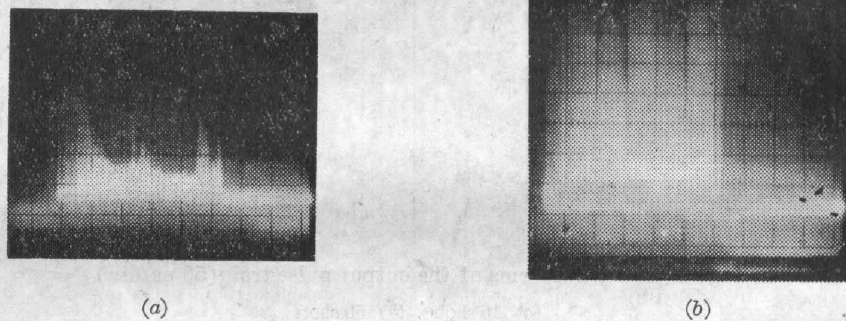


Fig. 10 The prelease waveforms of the driven relaxation oscillations(1ms/div) caused by a cavity length mismatch  
(a)  $\Delta l = 30 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta l = 50 \mu\text{m}$

### 三、理论分析与结构讨论

预激光过程中,包含着三个极为重要的发展过程。第一,光波场反复通过调制器使脉冲变窄,最后达到稳定值;第二,初始光波场具有很高的光学噪声,当光脉冲多次通过具有一定带宽的激活介质时,这些噪声逐步趋向平滑;第三,脉冲放大直到最后调 Q 输出。下面我们将对前两个过程进行分析与讨论。

#### 1. 脉冲成形与变窄过程

由文献[2, 3]可知,声光锁模调制器的单次透过率为:

$$a(t) = \cos(\theta_m \sin 2\pi\nu_m t), \quad (1)$$

这里  $\theta_m$  为调制深度,  $\nu_m$  为调制频率(50.5160 MHz),  $\theta_m$  在 0.1 至 0.8 之间可调。

由均匀加宽激光锁模理论<sup>[4]</sup>,我们取高斯脉冲在腔内来回一次的自洽解,则可获得稳态的脉宽  $\tau_p$  和谱宽  $B_p$  为:

$$\tau_p = \frac{(2 \ln 2)^{1/2}}{\pi} \cdot \frac{1}{\theta_m^{1/2} \nu_m^{1/2}} \left( \frac{g}{\sigma \nu^2} + \frac{1}{\sigma \nu_0^2} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

$$B_p = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_p}, \quad (3)$$

其中  $g$  为 Nd:YLF 的中心频率激光在腔内来回一次的饱和增益(实验值为 2.9),  $\Delta\nu$  为 Nd:YLF 的增益线宽, 取为  $12 \text{ cm}^{-1}$  ( $360 \text{ GHz}$ ),  $\Delta\nu_e$  为腔内标准具的有效透过带宽。由(2)可知, 当选用适当的  $\Delta\nu_e$ ,  $\tau_p$  就可以完全由标准具来决定。无标准具时, 所得稳态脉宽为:

$$\tau_p = \frac{1/3}{\theta_m^{1/2}}, \quad (\text{ps}) \quad (4)$$

当  $\theta_m$  由 0.1 至 0.8 之间变化时, 脉宽可以从 357 ps 变到 126 ps。

对于(1)式所示的调制函数, 在腔内  $M$  次来回后, 脉冲的形状由  $[a(t)]^{2M}$  给出, 最终很快变为高斯型, 这时高斯脉冲的半极大全宽为:

$$\tau_p = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\theta_m \sqrt{M\nu_m}} \quad (5)$$

由(2), (5)可得, 当脉宽离稳态值只差 5% 时, 则要求:

$$M > \frac{0.38 \Delta\nu}{\sqrt{g} \theta_m \nu_m}, \quad \text{即 } M_1 > 1.6 \times 10^3 \times \frac{1}{\theta_m} \quad (6)$$

当  $\theta_m$  由 0.1 到 0.8 变化时, 则要求预激光的时间必须  $< 160 \mu\text{s}$  至  $20 \mu\text{s}$ , 这比一般的脉冲主动锁模或主、被动锁模激光的建立时间长得多。当腔内放置 F-P 标准具时,  $\Delta\nu$  则由  $\Delta\nu_e$  代替, 这时脉宽入稳态值所需的预激光时间要短得多。

## 2. 光波场噪声的抑制过程

当脉冲反复通过 Nd:YLF 激光介质和腔内的标准具时, 激光脉冲中的噪声亚结构将逐步消失, 噪声光波场的频谱也将迅速变为高斯型。腔内  $M$  次来回后, 光波场噪声频谱的半极大全宽为:

$$B_n = \sqrt{\frac{\ln 2}{2Mg}} \cdot \Delta\nu_e \quad (7)$$

当噪声带宽为变换极限激光脉冲带宽的 2 倍时, 由(2)、(7)式可得, 这时  $M$  值必须  $< 2.7 \times 10^2 / \theta_m$ , 当  $\theta_m$  由 0.1 至 0.8 变化时, 则所需预激光的时间为  $27 \mu\text{s}$  至  $3.4 \mu\text{s}$ 。然而要消除激光脉冲的亚结构, 噪声场的带宽必须远小于主脉冲的带宽。当脉冲达到变换极限时, 我们认为除了最中心的一个纵模外, 所有其它纵模都不存在, 只有这一个纵模机它的旁频带得以保留下来。在这种条件下就有:

$$B_n < 2\nu_m \quad (8)$$

由(7), (8)式可得:

$$M > \frac{\ln 2}{8g} \left( \frac{\Delta\nu_e}{\Delta\nu_m} \right)^2 \quad (9)$$

即要求  $M > 3.2 \times 10^6$ , 相应的预激光时间为 32 ms, 这一条件是十分苛刻的, 在实际中往往取几个毫秒就足够了。当插入 F-P 标准具时, 所需预激光时间自然将大为缩短, 这时(9)式中的  $\Delta\nu$  将由标准具的  $\Delta\nu_e$  代替。

## 参 考 文 献

- [1] D. J. Kuizenga, *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1694.
- [2] A. E. Siegman and D. J. Kuizenga, *Opto-Electron.*, 1974, **6**, 43.
- [3] D. A. Pinnow, *IEEE J. Q. E.*, 1970, **QE-6**, No. 4 (Apr), 223.
- [4] D. J. Kuizenga and A. E. Siegman, *IEEE J. Q. E.* 1970, **QE-6**, No. 11 (Nov), 669.

## Quasi-CW actively mode-locked and Q-switched Nd: YLF oscillator

CAO WEILOU, CHEN QINHAO, XU BENFANG, ZHOU FENG  
(*Shanghai Institute of Optics and Finen Mechanics, Academia Sinica*)

ZHU ZHIMIN AND LUO NINGYI  
(*Department of Physics, Fuda University, Shanghai*)

(Received 4 September 1986; revised 12 December 1986)

### Abstract

A quasi-CW actively mode-locked and Q-switched (AMQ) Nd:YLF oscillator for a phosphate Nd: glass laser fusion system has been developed successfully. This paper describes the stability, reliability and the high contrast of signal to noise of the AMQ laser pulses.

**Key Words:** Quasi-CW actively mode-locking; Laser fusion.