

# 用于激光核聚变的可长时间单纵模 稳定运转的 Nd:YAG 和 Nd:YLF 激 光振荡器的研究

曹渭楼 陈庆浩 朱智敏 陈绍和 邓锡铭  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

孙云龙 解 桥  
(电子工业部华北光电所)

## 提 要

成功地研究了准连续预激光调Q和脉冲预激光调Q Nd:YAG和Nd:YLF单纵模振荡器。首次解决了脉冲预激光调Q单纵模振荡器腔长控制的物理和技术问题,实现了长时间十分稳定的单纵模运转,已用于大型高功率激光核聚变系统。

## 一、前 言

大型高功率核聚变激光系统中,激光振荡器是核心部件之一。当激光的功率密度在各种光学元件、激光工作物质及各类光学薄膜处达到每平方厘米几千 MW 时,强激光束在空间和时间上的严重调制所造成的自聚焦效应,自相位调制效应以及激光对材料的其它破坏效应都可能使整个系统无法工作。另外,调制度很大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,在实验上很难找到它们的规律。为了减轻强激光的非线性效应,振荡器输出的激光能量与脉宽必须稳定,激光的空间、时间分布必须光滑。单纵模振荡器能比较好地满足这一要求。

一般较为稳定的单纵模激光振荡器,很多文献<sup>[1~5]</sup>都作了介绍。但是它们的共同问题是不能在长时间内都获得单纵模运转,有时存在两个或多个纵模的严重调制。为了获得单纵模运转,通常是把一个光学标准具置于激光谐振腔内以减少带宽。若增加调Q的建立时间,那么此装置抑制所不希望出现的纵模的能力将得到进一步的改善。一般来讲,一个设计得很好的单纵模激光器也只能运转几分钟,或者使出现调制的情况减少到百分之一或千分之一,但这对激光核聚变来说是远远不够的。因为强激光系统的光学元件和薄膜,一般都工作在极限负载的条件下,偶尔一次带有调制的激光输出,就有可能使很多光学部件产生破坏,因而造成了不可弥补的巨大损失。

收稿日期: 1985年12月27日; 收到修改稿日期: 1986年4月9日

我们这项工作就是采取了新的设计方案,以保证每一次打靶都是光滑的单纵模激光输出。我们对  $1.064\ \mu\text{m}$  波长的 Nd:YAG 和  $1.053\ \mu\text{m}$  波长的 Nd:YLF 分别进行了实验。

## 二、单纵模振荡器系统的物理设计

要实现固体激光器的单纵模工作,一般来讲,在技术上远比气体工作物质困难。这是因为固体激光工作物质的线宽比气体工作物质的线宽宽得多。例如,磷酸盐 Nd 玻璃在  $1.054\ \mu\text{m}$  处的线宽为  $210\ \text{cm}^{-1}$ , Nd:YLF 在  $1.053\ \mu\text{m}$  处增益线宽为  $12.5\ \text{cm}^{-1}$ , Nd:YAG 在  $1.064\ \mu\text{m}$  处的增益线宽为  $6\ \text{cm}^{-1}$ ,这要比 He-Ne 等气体激光宽两个数量级以上。

另外,对固体激光器来说,腔内驻波的空间烧孔效应容易使相邻纵模同时起振,造成严重的调制(拍频),然而在气体激光器中,这一效应可随气体的扩散运动而消失。再者,在稳频技术方面,固体激光工作物质没有象气体激光工作物质增益曲线那样的兰姆凹陷频率稳定控制参考点。同时,固体激光工作物质增益高,激发态能级寿命长,利用腔长控制来稳频容易产生弛豫振荡,破坏正常工作。然而,固体激光工作物质增益高,储能高,是理想的振荡、放大介质,易于获得所需要的功率,同时,由于其增益特性基本上属于均匀加宽范畴,一旦某个纵模领先振荡,整个增益曲线就会被全部压低,这对抑制其它纵模振荡是十分有利的。

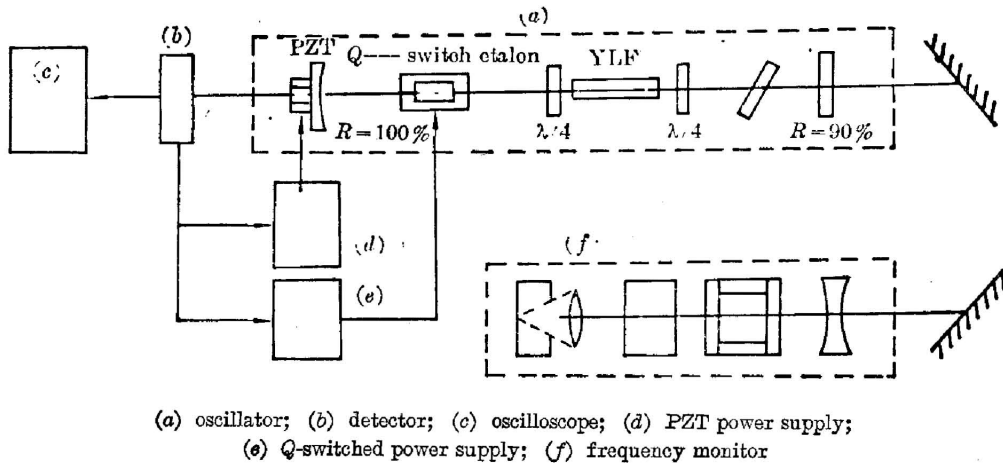


Fig. 1 Layout for experiment

基于以上分析,我们设计的单纵模激光系统示于图1。我们在激光工作物质的两端放置两片正交的  $\lambda/4$  波片,消除工作物质中的驻波光场,以达到有效地抑制相邻纵模振荡的目的。为了压缩激光振荡的线宽,腔内放置了一个  $2\ \text{cm}$  厚的标准具,端面反射率  $R$  为  $65\%$ 。它的锐度系数为:

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} = 21.$$

自由谱宽:

$$\Delta\nu_{\text{aut}} = \frac{c}{2nd} = 50\ \text{GHz}. \text{ 即 } 1.67\ \text{cm}^{-1}.$$

反射条纹细度——定义为自由谱宽除以分辨带宽:

$$\mathcal{F} = \frac{\nu_{N+1} - \nu_N}{|\nu - \nu'|} = \frac{\pi}{2} \sqrt{F} = \pi \left( \frac{\sqrt{R}}{1-R} \right) = 7.2。$$

分辨带宽为:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_{\text{Tran}} &= |\nu - \nu'| = \frac{c}{\pi nd} F^{-\frac{1}{2}} = \frac{c}{2\pi nd} \left( \frac{1-R}{\sqrt{R}} \right) \\ &= \Delta\nu_{\text{auto}} / \mathcal{F} = 7 \text{ GHz}。 \text{ 即 } 0.23 \text{ cm}^{-1}。 \end{aligned}$$

分辨率:  $RP = \frac{\nu}{\Delta\nu_{\text{Tran}}} = \mathcal{F} \frac{2nd}{\lambda} = N \cdot \mathcal{F} = N\pi \left( \frac{\sqrt{R}}{1-R} \right) = 4.3 \times 10^4,$

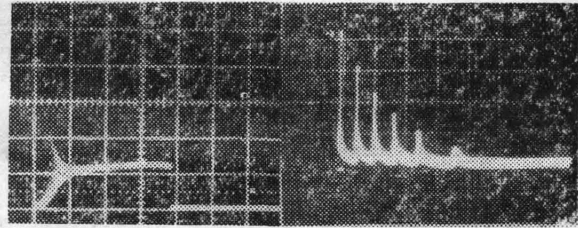
其中  $N$  为干涉级。

我们最为关心的是标准具在谐振腔中的选频能力。在谐振过程中,激光多次通过标准具,对脉冲预激光来说,预激光的时间为  $1 \mu\text{s}$ ,腔的光程长度为  $25 \text{ cm}$  ( $0.8 \text{ ns}$ )。  $N$  为  $10^3$  左右。而对准连续预激光束来说,时间为  $2 \text{ ms}$ ,  $N$  可达  $1.4 \times 10^6$ 。当光多次通过标准具时,标准具的选频能力可用等效条纹细度  $\mathcal{F}_N$  来描述,不难证明,  $\mathcal{F}_N = 1.2\sqrt{N} \mathcal{F}^{[6]}$  (当  $N \gg 1$ )。所以,对脉冲预激光而言,  $\mathcal{F}_N \approx 272$ 。对准连续激光而言,  $\mathcal{F}_N \approx 10^4$ 。这时标准具的等效分辨带宽为:

a) 脉冲预激光情况:  $\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{aut}} / \mathcal{F}_N \approx 0.184 \text{ GHz}$ , 即  $0.006 \text{ cm}^{-1}$ 。

b) 准连续预激光情况:  $\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{aut}} / \mathcal{F}_N \approx 5 \text{ MHz}$ , 即  $1.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。

根据这一设计,当采用脉冲预激光调 Q 工作方式时,我们用张弛振荡的第一个脉冲作为预激光脉冲,在其顶部或尾部进行调 Q; 而当采用准连续预激光调 Q 方式时,调 Q 时间则选在张弛振荡结束,让预激光达到稳态输出以后(见图 2)。自然,为了得到稳定的单纵模输出,我们还必须使所选纵模频率与标准具的透过峰频率以及增益曲线的顶峰频率三者重合。这就要求标准具的倾斜角度和腔长能够精密调节。一般而言,先调标准具的倾斜角度,使后两者的峰值对准,然而通过电压陶瓷微调腔长使三者重合。



(a) 1 ms/div. (b) 5 μs/div.

Fig. 2 Oscillograms of the quasi-cw prelude and pulsed prelude

由于谐振腔的纵模间隔为:

$$\Delta \left( \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{1}{2nd} = 0.02 \text{ cm}^{-1}。 \text{ 即 } 0.6 \text{ GHz}。$$

没有标准具时,自由振荡的谱宽为  $1 \text{ cm}^{-1}$  左右。所以我们设计的自由谱宽为  $1.67 \text{ cm}^{-1}$ ,分辨带宽为  $0.006 \text{ cm}^{-1}$  的标准具既能抑制远模,又能抑制邻模。

### 三、单纵模激光的实验研究

为了提高单纵模选择性,我们把准连续预激光的时间选为  $3 \text{ ms}$ 。在这段时间内,各种纵模都几乎是在连续状态下相互竞争,并且只有损耗较小的那个纵模最后占统治地位。而在脉冲预激光的工作方式下,张弛振荡的第一个脉冲的底宽也有  $1 \sim 2 \mu\text{s}$ ,各纵模在腔内也

有近千次的来回相互竞争。在实验上,能非常容易观察到这一效应,用纯调 $Q$ 方式得到的激光与在预激光条件下调 $Q$ 所得到的激光截然不同,前者具有非常严重的调制,并且在光谱上出现旁频,而后者无论是时间特性还是光谱特性上都是十分光滑的。图3给出的就是条纹相机的图片。

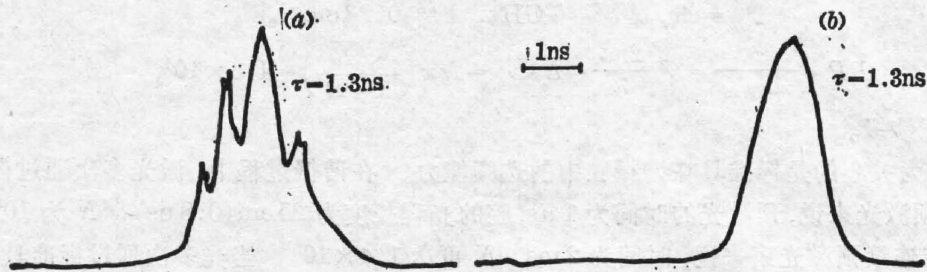
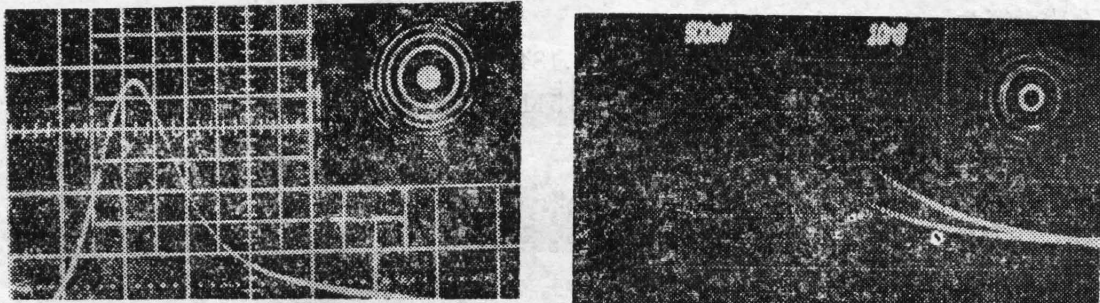


Fig. 3 Temporal profiles of an ordinary  $Q$ -switched laser pulse (a) and the single-axial-mode laser pulse (b) taken by a streak camera



(a) 200 mV 50 ns/div.

(b) 500 mV 10 ns/div.

Fig. 4 Spectral and temporal characteristics of the laser pulses of single axial mode (a) and double axial modes (b)

我们使用 Hamamatsu R1193  $\mu$ -01 型光电强流管和快速示波器来观察激光输出。在调试标准具时,要避免与腔片构成子腔,倾斜的角度是以获得最低阈值为条件。用装在后腔板上的压电陶瓷来改变腔长,我们能够分别获得比较稳定的单纵模运转和双模运转(见图4)。

自然机械不稳定性、热效应以及环境等因素都会造成纵模频率漂移,因此要获得长时间的单纵模运转,必须从激光输出的特性中选取合适的反馈信号来控制腔长,这是本激光系统所要解决的关键问题。

#### 四、准连续预激光调 $Q$ 单纵模激光稳定性实验研究

通过对 Nd:YAG 准连续预激光的仔细观察,我们发现当获得非常稳定的单纵模输出时,预激光信号非常光滑,预激光的幅度也是平坦的。若使腔长产生微小变化,预激光幅度的斜率也随之改变(见图5)。但是对 Nd:YLF 却观察不到斜率变化的现象。这是由于在整个预激光过程中, Nd:YAG 晶体不断接受泵浦加热而膨胀,促使谐振腔的光学长度不断改变,使在整个预激光时间内的激光振荡波长不断漂移。由于腔长的改变相当缓慢,所以激



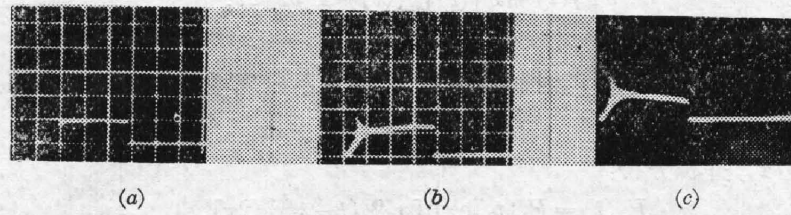


Fig. 5 Slope characteristics of the quasi-CW prelude

光波长在整个预激光过程中, 慢慢地连续扫动, 不造成任何突然的激光输出波动。对 Nd:YAG 激光器来说, 实验中总是观察到正的热自聚焦效应。所以在预激光过程中, Nd:YAG 晶体有效长度总是增加的, 也就是说, 在预激光的时间内, 激光波长是逐步增大的。但对 Nd:YLF 而言, 热膨胀系数非常小, 观察不到上述现象。

图 5 反映了 Nd:YAG 激光谐振腔内纵模相对标准具透过峰的几种不同的位置。图 5(a) 中, 在预激光开始时, 一个纵模非常接近标准具的峰值。预激光过程中, 这个纵模慢慢地扫过峰值, 由于这时腔内标准具透过率的变化十分微小, 所观察到的预激光变化不大, 而位于两侧的纵模比位于中心附近的纵模具有更多的损耗, 一直被抑制在阈值以下不能振荡。如果纵模的初始位置位于标准具透过率曲线的左侧或右侧, 则预激光的增益就会逐步增加和逐步减少, 但两侧邻模仍处于阈值以下, 这就是图 5(b) 和图 5(c) 的情况。现在再来看看另一种情况, 在预激光的初始阶段, 纵模 2 振荡而纵模 1 的增益处于阈值以下, 随着频率的漂移, 纵模 1 的增益就高于纵模 2, 纵模 1 起振, 而纵模 2 被抑制, 激光输出出现模式交替, 激光频率发生跃变, 预激光再一次出现张弛振荡, 这就是在实验中所不希望出现的情况。

上述实验证明, Nd:YAG 预激光输出斜率的变化是纵模相对标准具峰值处所处位置的重要标记。所以只要我们监测预激光的起点和终点信号并加以比较, 用其信号之差作为反馈信号来修正腔长, 使激光稳定在图 5(a) 的状态, 这就实现了单纵模的长期稳定运转。但对准连续 Nd:YLF 振荡器而言, 我们只有靠主动扫描来确定纵模相对标准具峰值的位置, 这就需要在预激光过程中, 在压电陶瓷上加一锯齿波电压, 以实现 Nd:YAG 同样的结果。

## 五、脉冲预激光调 Q 振荡器单纵模成功率的研究

脉冲预激光工作方式的激光系统自然比准连续预激光工作方式的激光系统简易得多, 但以往的所有脉冲预激光调 Q 振荡器所获得的单纵模几率远不如准连续预激光系统<sup>[6,7]</sup>, 这是由于脉冲预激光时间短, 无论是热效应或者是人为改变腔长都不可能观察到反映纵模与标准具峰值相对位置的预激光特性。没有这一参考信号, 也就无法预先把腔长一直控制在最佳状态, 这是美国科学家探索了多年而没有解决的问题<sup>[6]</sup>。

为了解决这一问题, 我们首先分析一下两个相邻纵模相互竞争的过程。

设在预激光情况下, 主纵模在腔内来回一次的强度增益为  $g_1(t)$ , 则有:

$$g_1(t) = \exp[2\sigma_1 \Delta N(t) l] R_1 R_2 T_1^2 T_0^2, \quad (1)$$

这里  $\Delta N(t)$  是粒子数反转密度,  $l$  为增益介质长度,  $T_0$  为 Q 开关打开前的透过率,  $T_1$  为标准具的透过率。在达到阈值以后, 主纵模的强度  $dP$  在时间  $dt$  内以下面规律增加。

$$dP_1(t) = P_1(t) [g_1(t) - 1] dt / 2\tau, \quad (2)$$

其中  $2\tau$  为腔内来回时间。

为简便起见,我们设粒子数随时间线性增加,并且不出现增益饱和效应。即

$$\Delta N(t) = \alpha t - \beta, \quad (3)$$

以(3)式代入(2)式,并积分得:

$$P_1(t) = P_1(t_1) \exp[\sigma_1 2l(t-t_1)^2 / 2\tau], \quad (4)$$

这里用了  $g_1(t_1) = 1$ 。

自然,邻模2的强度以同样的形式增长,因此,两模的强度比为:

$$P_1/P_2 = \exp[\sigma l \alpha (t_2 - t_1) (t - t_1) / \tau], \quad (5)$$

这里作了简化近似  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ ,  $t_1 \approx t_2$ , 利用阈值条件可得:

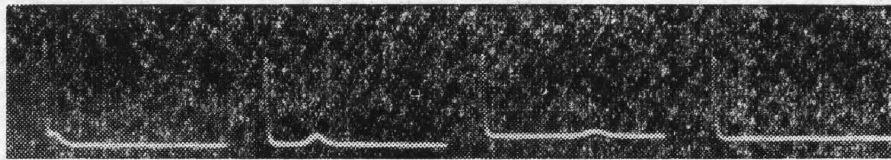
$$P_1/P_2 = (T_1/T_2)^N. \quad (6)$$

当腔长远大于标准具厚度时,有

$$P_1/P_2 = \left[ 1 + \frac{1}{L \Delta \nu_{\text{Tran}}^2} \right]^N, \quad (7)$$

式中  $L$  为腔的光学长度,  $\Delta \nu_{\text{Tran}}$  为标准具的单个通过的分辨带宽,  $N$  为振荡次数。所以为了获得比较好的单纵模选择性,就要求增多振荡次数,缩短腔长和使用窄透过带宽的标准具。实验中,  $L = 25 \text{ cm}$ ,  $\Delta \nu_0 = 0.23 \text{ cm}^{-1}$ ,  $N = 10^3$ , 所以  $P_1/P_2 = 31$ 。以上讨论的情况只是两个模处于标准具透过率曲线一侧的情况,如果相邻两个纵模处于透过率曲线两侧比较对称的位置,它们的透过率就比较接近甚至相等,因而两个相邻纵模的强度也就接近或相同,这时就出现双模同时振荡的情况,这是上述选模措施所无能为力的。

我们带有突破性的进展就是利用两个邻模起振的时间特性来判断谐振腔纵模与标准具透过率曲线的相对位置,并以此作为参考信号来控制腔长,使主纵模永远处在标准具透过峰值的位置。我们选定第一个脉冲作为预激光,在其顶部或尾部实现调  $Q$ , 这时主纵模以巨脉冲输出,由于  $Q$  开关的打开,邻模也就振荡起来,但是时间上延后了。这时激光输出如图 6 所示,两个纵模起振的时间间隔以及邻模的幅度,完全是由纵模与标准具透过峰的相对位置决定的。调节压电陶瓷的电压,改变腔长(即移动纵模位置),即可改变邻模相对主模的时间间隔和邻模的强度。两者间距越远,邻模的强度越弱甚至消失。这一实验结果其实在式(5)中就已经表达出来了。我们正是利用这一特性,来实现腔长的半自动和自动控制,保证了在长时间内实现 100% 的单纵模运转。由于调  $Q$  信号是取自预激光,所以调  $Q$  激光脉冲的幅度和宽度也十分稳定,均在  $\pm 5\%$  以内。改变调制器的输入功率,调  $Q$  激光脉冲的宽度可以



(a)  $V_{\text{PZT}} = 20 \text{ V}$       (b)  $V_{\text{PZT}} = 40 \text{ V}$       (c)  $V_{\text{PZT}} = 60 \text{ V}$       (d)  $V_{\text{PZT}} = 80 \text{ V}$   
( $0.5 \mu\text{s}/\text{div.}$ )

Fig. 6 Dependence of intensity and delay time of the  $Q$ -switched adjacent mode pulse on the cavity length shift

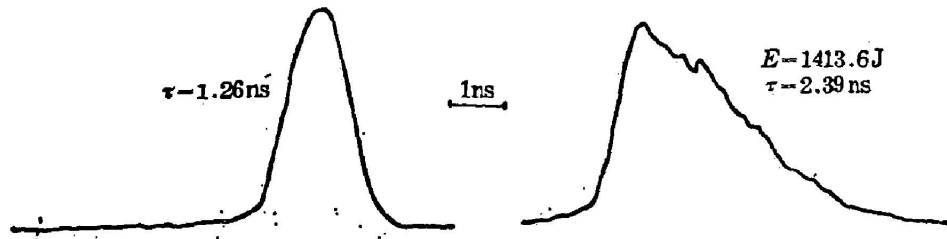


Fig. 7 Sliced single-axial-mode laser pulses taken by a streak camera

从 30 ns 至 100 ns 的范围内连续变化。

现在, Nd:YLF 脉冲预激光调 Q 单纵模振荡器已用作大型核聚变磷玻璃激光系统的振荡器, 单纵模调 Q 激光脉冲经过削波、放大可获得不同宽度的光滑的 ns、KJ 级的激光巨脉冲(图 7)。

振荡器的机械设计由乔福堂同志完成, 调制器由李士英同志提供, 参加本工作的还有徐仁芳同志, 在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] D. J. Kuizerga; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1694.
- [2] H. G. Danielmeger; *IEEE J. Q. E.*, 1970, **QE-6**, No. 2 (Feb), 101.
- [3] A. L. Egorov *et al.*; *Sov. J. Q. E.*, 1975, **5**, No. 3 (Mar), 291.
- [4] D. C. Hanna *et al.*; *Opto-Electron.*, 1972, **4**, No. 3 (Aug), 249.
- [5] Y. K. Park *et al.*; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, No. 3 (Mar), 96.
- [6] Y. K. Park and R. L. Byer; *Optics Commun.*, 1981, **37**, No. 6 (Jun), 411.
- [7] Y. L. Sun and R. L. Byer; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 9 (Sep), 408.

### Investigation of a single-axial-mode Nd:YLF oscillator for laser fusion system

CAO WEILOU, CHEN QINHAO, SUN YUNLONG\*, ZHU ZEIMING,  
CHEN SHAOHE, XIE QIAO\* AND DEN XIMING  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)  
(\* North China Research Institute of Electro-Optics Beijing)

(Received 27 December 1985)

#### Abstract

Single-axial-mode Q-switched Nd:YAG and Nd:YLF oscillators with quasi-CW prelude or pulsed prelude have been developed successfully. This paper is the first report on the long duration 100% single-axial-mode operation of a pulsed prelude Q-switched oscillator by cavity length control. The Nd:YLF oscillator has been used in a big laser fusion system.