

## 单透镜望远镜腔型连续锁模倍频

## Nd: YAG飞秒激光泵浦源

白晋涛

王 诺

(西安石油学院, 西安, 710061) (西北大学, 西安, 710069)

张怡彬 王水才

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安, 710068)

**摘要:** 本文着重介绍了具有单透镜望远镜腔的CW(连续)锁模倍频Nd: YAG飞秒激光泵浦源的腔型设计和动态稳定性实验研究。在单灯3.5kW连续激励下, 获得了脉宽约100ps, 平均功率约1.7W的CW锁模倍频绿光输出, 其稳定度优于3%。

**A CW mode-locked frequency doubling Nd: YAG fs laser  
pump source with single lens telescopic resonator**

Bai Jintao

Wang Nuo

(Xian Petroleum Institute) (Northwest University)

Zhang Yibin, Wang Shuicai

(Xian Inst. of Optics &amp; Precision Mech., Academia Sinica)

**Abstract:** In order to achieve a higher green light output from a CW mode-locked frequency doubled Nd: YAG laser we have used a single lens telescopic cavity. In this paper the cavity configuration designing and dynamics performance researching of this laser have been conducted. The CW mode-locked frequency doubled green light output of 1.7W at a repetition rate of 200MHz has been achieved at 3.5kW single lamp input power and the amplitude stability of the pulse is less than 3%.

## 一、引 言

近几年来,随着超快现象研究的进展,飞秒染料激光系统的固体泵浦源在国际上受到广泛重视<sup>[1~3]</sup>,特别是高功率、短脉冲、高稳定度、低噪声CW锁模Nd: YAG倍频激光器已发展成为理想的CPM飞秒染料激光器的同步泵浦源。在100MHz高重复频率下,人们已得到锁模绿光输出的平均功率为15W,脉宽为70ps,用此激光器同步泵浦染料激光器则获得了85fs

的超短光脉冲<sup>[4]</sup>。最近,我们全部利用国产元件设计研制了一台单透镜望远镜腔200MHz超高频CW主动锁模Nd:YAG倍频激光器,用于同步泵浦CPM飞秒染料激光器。本文着重讨论了该激光器的腔型设计和动态性能研究。

长期以来,连续波或超高频连续(CW)锁模的倍频效率一直很低<sup>[5]</sup>,仅是在近几年新型非线性晶体KTP出现之后,才有了突破性进展,但和使用调Q技术相比,二次谐波转换效率还相差很远,特别是我们在200MHz重复频率下,采用单灯泵浦方式(为减少输入功率和压窄脉宽),以及利用仅有65%衍射效率的声光(AO)调制器,困难就更大了。众所周知,在晶体材料和最佳晶体长度以及满足相位匹配条件下,其转换效率完全取决于基波功率密度 $P_w/A$ 。正因为这样,我们从提高基波功率 $P_w$ 和缩小KTP晶体中的光斑面积 $A$ 以及尽量减少腔内元件等方面综合考虑,将谐振腔设计成单透镜望远镜腔,即在腔内插入一块薄凸透镜 $F_2$ (焦距为 $f_2$ ),它与具有热透镜效应(等效焦距 $f_1$ )的激光棒共同形成了所谓的望远镜腔,如图1所示。为了得到高功率、大基模体积、高稳定度的锁模倍频输出,必须对该腔进行理论分析、计算和优化设计。

## 二、腔型设计与参数优化

如图1所示为单透镜望远镜腔型结构示意图。 $M_1$ 和 $M_2$ 镜的曲率半径分别为 $R_1$ 和 $R_2$ ,棒

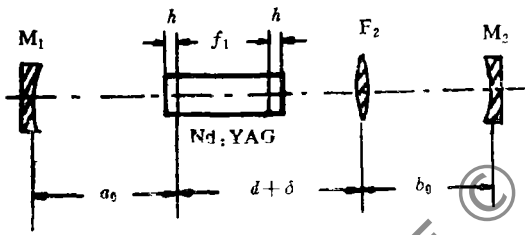


Fig.1 Configuration scheme of single lens telescopic resonator

的两个主平面到棒两端面的距离为 $h$ ,并把棒等效为一个焦距为 $f_1$ 的薄热透镜, $\delta$ 为望远镜的离焦量,其它各符号如图1所示。图中暂未画出声光调制器(AOM)和KTP倍频晶体。我们所采用的AOM和KTP的长度分别为20mm和5mm,它们对有效腔长略有影响,但对整个激光腔设计来说影响不大。所以在具体计算时只要用折射率修正后的有效腔长代入就行了。

如图1所示的腔型结构下,腔内传输矩

阵元为:

$$\begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d + \delta' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \frac{h}{f_1} & 2h \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{h}{f_1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $d = f_1 + f_2$ ,  $\delta' = \delta - h$ 。由于 $h$ 为 $f_1$ 的一阶小量,所示(1)式可近似为:

$$\begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d + \delta' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 - (d + \delta)/f_1 & d + \delta \\ -1/f_1 - 1/f_2 + (d + \delta)/f_1 f_2 & 1 - (d + \delta)/f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

这样, 激光腔内的单程传输矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & b_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式, 可得矩阵元 $A_0, B_0, C_0, D_0$ 分别为:

$$\begin{cases} A_0 = m + \frac{\delta b}{f_1 f_2} \\ B_0 = ma + \frac{b}{m} + \frac{\delta ab}{f_1 f_2} \\ C_0 = \frac{\delta}{f_1 f_2} \\ D_0 = \frac{1}{m} + \frac{\delta a}{f_1 f_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $m = \frac{-f_2}{f_1}$ ,  $a = a_0 - f_1$ ,  $b = b_0 - f_2$ ,  $g$ 参数为:

$$\begin{cases} g_1 = A_0 - \frac{B_0}{R_1} = \left[ \left( m + \frac{\delta b}{f_1 f_2} \right) \left( 1 - \frac{a}{R_1} \right) - \frac{b}{m R_1} \right] \\ g_2 = D_0 - \frac{B_0}{R_2} = \left[ \left( \frac{1}{m} + \frac{\delta a}{f_1 f_2} \right) \left( 1 - \frac{b}{R_2} \right) - \frac{ma}{R_2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

作参量变换:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{ma} + \frac{m}{b} + \frac{\delta}{f_1 f_2} \\ u_1 = a \left( 1 - \frac{a}{R_1} \right) \\ u_2 = b \left( 1 - \frac{b}{R_2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式有

$$\begin{cases} g_1 = \frac{b}{a} \left( -\frac{1}{m} + u_1 x \right) \\ g_2 = \frac{a}{b} (-m + u_2 x) \\ B_0 = abx \end{cases} \quad (7)$$

则激光腔与模体积有关的光斑半径 $w_3$ 为:

$$w_3^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{|2xu_1u_2m - u_2 - m^2u_1|}{[(1 - g_1g_2)g_1g_2]^{1/2}} = \frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{4u_1u_2m^2g_1g_2 + (m^2u_1 - u_2)^2}{(1 - g_1g_2)g_1g_2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

根据热不灵敏条件<sup>[9]</sup>,对(8)式求导,可得热稳方程

$$g_1 g_2 = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - u_2/m^2 u_1) & \text{当 } |m^2 u_1| > |u_2| \text{ 时} \\ \frac{1}{2}(1 - m^2 u_1/u_2) & \text{当 } |m^2 u_1| < |u_2| \text{ 时} \end{cases} \quad (9)$$

相应的 $w_3$ 变为:

$$w_{30} = \begin{cases} \frac{2\lambda}{\pi} |m^2 u_1| & \text{当 } |m u_1| > |u_2/m| \text{ 时} \\ \frac{2\lambda}{\pi} |u_2| & \text{当 } |m u_1| < |u_2/m| \text{ 时} \end{cases} \quad (10)$$

在 $|m u_1| < |u_2/m|$ 时 $u_2$ 和 $u_1$ 的关系式为:

$$u_1 = \frac{2u_2^2 x - m u_2}{2m u_2^2 x^2 - 2m^2 u_2 x + m^3} \quad (11)$$

而 $M_2$ 镜和 $F_2$ 透镜间的束腰大小及位置分别为:

$$\begin{cases} w_{20}^2 = \frac{\lambda B_0}{\pi} \frac{\sqrt{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}}{|g_2 + D_0^2 g_1 - 2D_0 g_1 g_2|} \\ z_{20} = \frac{B_0 g_1 (D_0 - g_2)}{g_2 + D_0^2 g_1 - 2D_0 g_1 g_2} \end{cases} \quad (12)$$

这样就得到了一组满足热不灵敏条件下腔的特性参数方程。具体计算时,需先给出几个参数,即根据所提供的泵浦能力确定棒的热焦距 $f_1$ (3.5kW泵浦功率对应热焦距 $f_1 = 380\text{mm}$ ),选取适当的薄凸透镜 $F_2$ (我们实验用的 $f_2 = 150\text{mm}$ ),从而确定出 $m = -f_2/f_1$ ,给定调焦量 $\delta$ 及总的几何腔长,以满足锁模要求,如对于在200MHz锁模频率下,考虑到AOM和KTP及Nd:YAG激光棒( $\phi 105\text{mm} \times 4\text{mm}$ )对有效腔长的影响,经折射率修正后的几何腔长为636mm,选择 $M_2$ 镜为平面镜,并采用激光棒自孔径选模,即已知 $w_{30} \approx 0.6 \sim 0.9\text{mm}$ 。然后,根据方程(6)式,(10)式,(11)式,(12)式就可得到一组满足热不灵敏条件下的腔参数。我们所选取的具体数据为 $a_0 = 242\text{mm}$ , $b_0 = 150\text{mm}$ , $z_{20} = 10\text{mm}$ , $R_1 = -300\text{mm}$ 。至此,我们得到了在理论上保证可获得高功率、大基模体积、高稳定度的热不灵敏激光谐振腔参数。

### 三、锁模倍频系统的动态稳定性实验研究

将AOM和KTP晶体插入到如图1所示的激光腔内,即AOM放入靠近 $M_1$ 反射镜一边,以便让腔内所有纵模都能参与锁模,而KTP晶体则放在 $M_2$ 与 $F_2$ 之间的光束腰处,这样就形成了CW锁模腔内倍频激光系统。作为一个CPM飞秒染料激光器的同步泵浦源,它的输出稳定性要求很高。

1. 为获得稳定的锁模输出, 腔长的失调量必须控制在 $10\mu\text{m}$ 左右。为此, 我们采用了具有自动温度补偿的石英腔架及殷刚结构, 使腔长变化控制在 $0.2\mu\text{m}/\text{C}$ 内, 并且将整个系统放置在专用防震台上, 从而有效地抑制了机械振动及热变效应。该结构在普通撞击下, 可以在几个毫秒内迅速稳定下来。此外, 因为电源的不稳定性是引起瞬态脉冲功率变化的主要因素, 我们采用了光反馈稳定, 即在谐振腔内加光电三极管来提取激光的波动变化信号, 通过电源及时抑制脉冲峰值功率漂移, 同时也等效压缩了腔长的失谐范围。

2. 为使光子在谐振腔内往返一周时间保持严格的同步, 对调制频率的稳定度提出了很高的要求。我们所采用的射频驱动源的频率稳定度可达 $10^{-8}/\text{天}$ , 最大功率输出为 $8\text{W}$ 。加在调制器上驱动电源功率应选在有利于锁模激光稳定输出的范围。实验表明在 $3.5\text{W}$ 时, 输出最稳定, 锁模效果也最好。此外, 在高功率激光器中, 由于腔内强光束与调制器的相互作用, 导致调制器晶体折射率的明显变化, 从而影响腔长的稳定性, 使锁模效果恶化。而且, 随着温度的升高, 其固有频率也相应增大, 调制器频率的这种变化同样导致锁模的不稳定, 这在示波器上可明显地观察到。为此, 我们专门设计了一个比较理想的恒温装置。

3. 尽管KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ , 钛氧磷酸钾) 晶体有极其优良的综合性能, 特别是对温度的变化不敏感, 但在腔内高功率密度, 长时间连续(CW)锁模状态下工作时, 实验发现, 它的热效应一方面影响锁模倍频绿光输出的稳定性, 另一方面晶体容易被炸裂。因此, 我们设计了专用的冷却装置, 并得到了满意的效果。

4. 一般情况, Nd:YAG激光器输出的光是非偏振的, 所以无论是腔内还是腔外倍频, 其中一半基波对倍频无贡献, 即没有实现偏振匹配。通常解决的办法是在腔内安置起偏器, 但理论和实验均表明, 当激光棒内耗散功率较大时, 由于热致双折射效应产生退偏振, 造成起偏器上的反射损耗增大, 使倍频效率反而下降。目前, 国外开始采用插入 $\lambda/4$ 波片来补偿这种退偏效应, 我们在实验中通过利用 $\lambda/4$ 波片也取得较满意的效果。

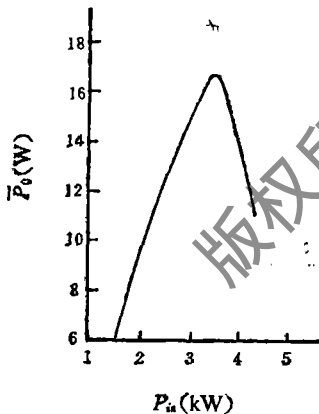


Fig.2 Relationship between fundamental output power and pumping power

#### 四、实验结果与讨论

通过插入AO调制器和KTP晶体在图1所示的激光腔内, 进行了CW锁模腔内倍频实验研究。在 $3.5\text{kW}$ 单灯连续泵浦下, 空腔得到平均 $26\text{W}$ 的 $1.06\mu\text{m}$ 激光输出。插入调制器后, 完全锁模状态下, 获得了 $17\text{W}$ 的平均输出功率, 其稳定度优于 $2\%$ 。图2是输出基波功率随泵浦功率变化的实验关系曲线。最后将KTP放入腔内后, 则获得CW锁模倍频绿光平均输出功率为 $1.7\text{W}$ 。采用相关仪测量脉宽约 $100\text{ps}$ , 输出功率变化小于 $3\%$ 。实验表明, 薄凸透镜(双面镀增透膜)的插入, 并没有明显影响基波功率, 谐振腔本身仍具有很高的电光转换效率, 但是且为腔内倍频创造了很好的条件(KTP中的光斑半径约 $50\mu\text{m}$ ); 获得了 $10\%$ 的谐波转换效率, 比没有透镜时提高了 $9\%$ 。输出激光模式也以 $\text{TEM}_{00}$ 为主, 从在我们的激光器中能通过断开调制器的驱动源开关, 能观察到自锁模现象, 也说明了这一点。

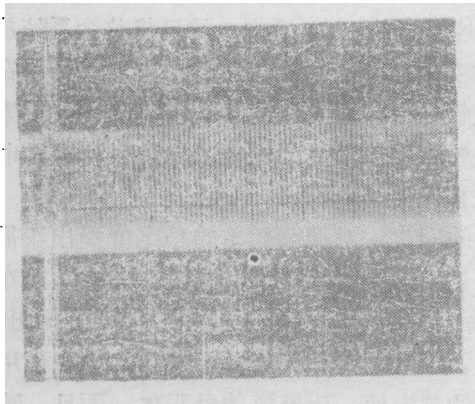


Fig.3 Mode-locked pulses sequence (50 ns/div, pulses interval 5ns)

图3是从“485”示波器上观察到的锁模谐波波形,可见脉冲是很干净的,顶端没有明显的毛尖,且波形比较稳定,波动幅度很小,信噪比高,没有弛豫振荡状态。

实验还表明,失谐对锁模谐波输出的影响很大。当腔长在失谐约 $15\mu\text{m}$ 范围内,脉冲序列变化甚微,能够保持稳定输出。当腔长变化超出这个范围后,从输出脉冲序列看到,脉宽加大,信噪比减小,波形不稳定。当改变调制器的倾斜角使其偏离布喇格角时( $\theta_B = 0.48^\circ$ ),因调制深度减小,亦可观察到失谐现象。因此,整个激光系统必须有步骤地精心调整,才能获得稳定的完全锁模状态。

### 参 考 文 献

- [1] Knox W H, J O S A (B), 1987; 4: 1771
- [2] Mokhtari A, Fine L, Chesnoy J. Opt Commun, 1987; 16 (6): 421
- [3] Kubota H, Kurokawa K, Nakazawa M. Opt Lett, 1988; 13 (9): 749
- [4] Norris T, Sizer II T, Mourou G. J O S A (B), 1985; 2 (4): 613
- [5] 上海交通大学激光研究室器件组. 激光, 1974; (1): 10
- [6] Steffen J. IEEE J Q E, 1972; 8: 239

\*

\*

\*

作者简介:白晋涛,男,1959年出生。讲师。现主要从事大学物理教学和飞秒激光产生技术研究。

王 诺,男,1932年11月出生。教授,室主任。现主要从事气体激光器与超短脉冲激光研究。

张怡彬,女,1963年出生。助研。现主要从事超短脉冲激光研究。

王水才,男,1935年出生。研究员。现从事飞秒激光,超快现象和光盘磁光头等研究。

收稿日期:1992年10月8日。

收到修改稿日期:1992年11月14日。

### 多晶薄膜晶体管液晶显示器

日本精工埃普森公司研制成功一种使用以 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 低温成膜的多晶薄膜晶体管的液晶显示器。

普通多晶硅薄膜晶体管是在 $1000^\circ\text{C}$ 左右形成薄膜的,因此要用昂贵的石英基层。精工公司用玻璃基石代替石英基石,要把薄膜形成的处理温度降到 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 以下,并在玻璃基石上形成驱动用集成电路。这种低温成膜的多晶硅薄膜晶体管液晶显示器,体积小,操作电路简单,能构成更复杂的电路。其性能和现在使用的最高水平的非晶硅薄膜晶体管方式基本相同,但生产成本可降低

90%。(转自《机电日报》,1993年2月12日,第2版,华工)

### 激光二极管

激光二极管具有体积小、功率大、重量轻、耗电省、可靠性高、波长短等特性。在诸多应用领域内,它与其它气体、固体激光器相比毫不逊色。它已广泛应用于光电、视听、光盘、光纤通信、外科医疗、激光打印、激光印刷、条形码读出扫描、物理测量、位置传感器等领域。目前,极短波长的 $650\sim 690\text{nm}$  AlInGaP 激光二极管已商品化。(转自《国外产品与技术》,1993年,第1期,第8页)