

# 一种结构新颖的调Q注入锁定非稳腔Nd:YAG激光器的技术研究

郭建强

蓝信矩

(西南交通大学, 成都)

(华中理工大学, 武汉)

**摘要:** 本文描述了一种结构新颖、简单、技术上容易实现的外注入锁定非稳腔Nd:YAG激光器装置, 在技术上大大简化了原有结构。在理论上着重分析了主副谐振腔的匹配条件和方法。通过实验, 证明了该技术装置的正确性。

The study of the technology of a new structure of an injection locked unstable resonator Q switched Nd:YAG laser

Guo Jianqiang

Lan Xinju

(Xinan Jiaotong University) (Huazhong University of Science and Technology)

**Abstract:** A new simple structure of an injection locked unstable resonator Q switched Nd:YAG laser is described, and the mode match between the first and the second resonator is studied. A method to realize the match of Gaussian beam and sphere wave is proposed. The experiment results and conclusion are given.

## 一、引言

根据激光外注入锁定理论可知<sup>[1]</sup>, 要实现激光外注入锁定, 有几个关键技术需要解决。1. 主激光振荡器能输出一个稳定的单频、窄带宽的激光, 不一定要高功率的脉冲激光, 连续输出同样可行<sup>[1,2]</sup>。2. 主、副振荡器能够在时间上实现匹配。目前, 美国斯坦福大学的Park和Byer教授报道了用调Q的单纵模脉冲激光作为注入信号, 注入进一台非稳腔Nd:YAG调Q激光器中, 实现了注入锁定技术<sup>[3]</sup>。但是, 由于注入信号的脉宽相当窄, 要使主、副振荡器的调Q开关延时达到高精度, 这对于毫微秒数量级来说, 技术相当困难。否则, 由于外注入信号的上升前沿与副振荡器的振荡建立时间的上升沿不同步, 而不能实现注入锁定。另外, 由于主振荡器采用调Q技术, 激光在腔内振荡次数有限, 不容易压缩线宽, 实现单频运转<sup>[4]</sup>。3. 主、副振荡器能够实现腔型匹配或准匹配。本文描述了用连续单频激光作为外注入信号,

注入一台调Q非稳腔Nd:YAG激光器中,实现激光外注入锁定技术。通过实验得到了论证。本文的主振荡器使用快速光电二极管测量F-P标准具反射的两纵模差频信号,来控制主振荡器的腔长,稳定单频的技术。这使得主振荡器的结构和控制相当简单。本文的光路采用一种结构新颖、简单、控制容易,实现方便的结构,技术上很容易实现。

## 二、调Q注入锁定非稳腔Nd:YAG激光器的光路研究

如图1所示装置是调Q外注入锁定非稳腔Nd:YAG激光器的光路图。主振荡器由全反射镜 $M_1$ - $M_2$ 组成,副振荡器由 $M_1$ - $P_2$ - $M_3$ 组成。在工作时,主振荡器是一个连续激光振荡,KDP电光调制器上加半波电压,于是由 $P_1$ 、KDP、 $P_2$ 组成的Q开关处于高Q状态,对主振荡器来说,只相当于一个损耗元件,无其它作用,在分析主振荡器工作状态时,可省略。副振荡器是一个高增益的腔倒空调Q激光器。由于调Q激光器的增益相当大,因此,在处理和副振荡器的工作状态时,对主振荡器连续泵浦的功率可忽略不计,以便于处理。

主振荡器由 $M_1$ 、 $M_2$ 组成平凹稳定谐振腔, $R_1 = 3\text{m}$ , $L_1 = 0.65\text{m}$ 。采用透射式F-P标准具在正入射条件下选择单纵模。如图2所示,偏振器 $P_2$ 在主振荡器中有三个作用:1.与四分之一波片对配合使用,消除Nd:YAG激光棒的烧孔效应;2.与四分之一波片对配合使用,消除主振荡器的寄生振荡;3.作为选频和稳频的探测分光器,从偏振器 $P_2$ 输出由于选模不彻底而产生的双模振荡的差频信号,提供选模和稳频用。若采用斜倾插入F-P标准具来选择单纵模,既增加了腔内损耗,又使调整相当困难,还容易使选模能力下降<sup>[6]</sup>。本文使用F-P标准具正插在四分之一波片之间来选纵模,效果相当好,使用起来很方便,如图3所示。其工作原理为:从偏振器 $P_2$ 向F-P标准具方向传播的线偏振光束A,经过四分之一波片后变成圆偏振光,若从F-P标准具反射回来的一部分光,再经过四分之一波片后,线偏振光A的偏振态已旋转 $\pi/2$ 形成线偏振光B,这部分光经过偏振器 $P_2$ 后折射出去,这样就消除了F-P标准具的寄生振荡。由于F-P标准具的选模作用,只有特定频率的光能够透过F-P标准具,再经过四分之一波片后形成振荡。当腔长受外界干扰而微小变化时,频率会出现漂移。若两纵模频率

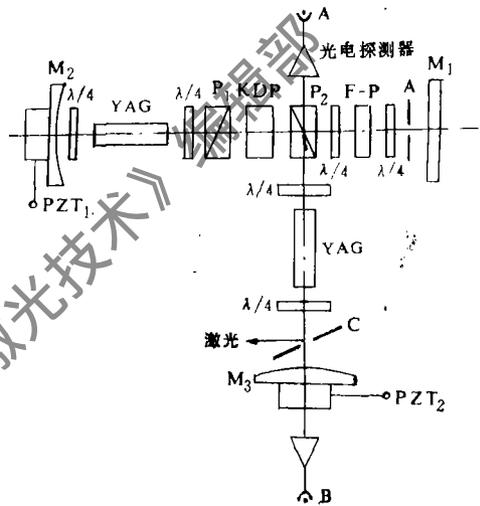


图1 注入锁定光路

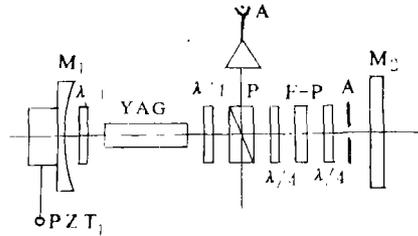


图2 主振荡器光路

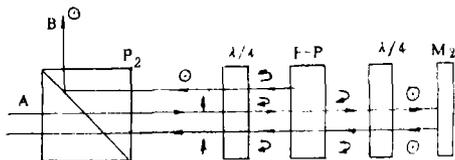


图3 F-P标准具工作原理

位于F-P标准具的透过率中心频率之间时,会形成双模振荡。如图4所示,只有当振荡频率 $\nu_n$ 位于 $2\delta_{m,x}$ 之中,才能形成单模振荡,否则形成双模振荡。由于F-P标准具的反射率随频率变化,在单纵模振荡时,

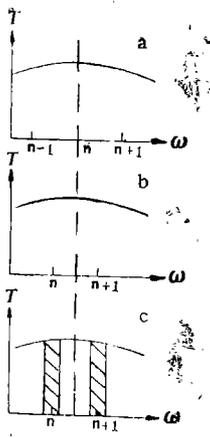


图4

a—标准具的中心频率与纵模频率重合，最佳状态 b—两纵模对称于标准具中心频率之间，最坏状态 c—阴影部分是双模振荡区域，只有在阴影外面，才能选出单纵模

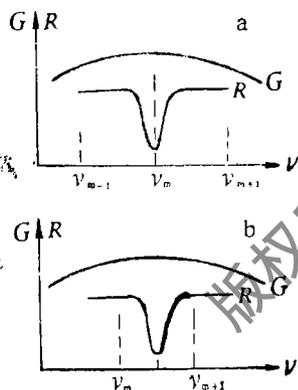


图5

a—最佳运行状态 b—最坏运行状态 G—表示增益 R—表示标准具的反射率

反射率 $R$ 最低，而双模振荡时，反射率剧增，如图5所示。因此能够从光电探测器A上测量出由频率 $\nu_n$ 和 $\nu_{n+1}$ 所形成的差频信号的脉动，用该信号经处理后控制压电陶瓷，实现选频和稳频。

副振荡器由 $M_1-P_2-M_3$ 组成。偏振器 $P_1$ 、电光调制器KDP和偏振器 $P_2$ 组成调Q开关。它有两个作用：一方面在副振荡器中作为调Q开关，另一方面作为主、副振荡器联接用的注入信号控制开关。Nd:YAG棒两端的四分之一波片对仍然是消除激光棒的烧孔效应。谐振腔 $M_1-M_3$ 采用凸凹非稳腔，激光输出使用环形窗从侧面输出。

当主振荡器工作时，光电探测器A接收到从偏振器 $P_2$ 反射的差频信号，经过交流放大、整形、滤波后，取交流电压的有效值，根据该值的大小来使主振荡器的压电陶瓷PZT<sub>1</sub>伸缩，以稳定频率。当频率稳定后，光电探测器A测量的电压为直流信号。该信号使副振荡器开始泵浦，经过延时，使粒子数反转最大时，调Q开关原来加的半波电压突然退下，并略加反压，使调Q开关建立时间缩短。此时，主振荡器中的全部能量注入进副振荡器。副振荡器还没有振荡已使注入信号放大，在放大的同时，经过受激辐射和反复谐振激发起与注入信号最邻近的纵模振荡。此时由光电探测器B测量出纵模的差频信号，以控制压电陶瓷PZT<sub>2</sub>的伸缩，使之差频信号最小，形成单纵模振荡。

### 三、主、副谐振腔的匹配

如图6所示，是主、副谐振腔的光路简图。本文采用Siegman<sup>(6)</sup>的方法，即使用几何光学原理来处理非稳腔的问题。所用各参数均在图6中标明，其中 $f = R_2/2$ 。

由于稳定谐振腔中传播的是高斯光束，而非稳腔中存在的是球面波。因此，即使在副腔中某一位置等相位面彼此相等，但由于传输过程中，高斯光束的等相位面不满足球面波传输规律，所以，传输一段距离后，等相位面不再相等。因此，在原则上，实现高斯光束与球面波的匹配是不可能的。但是，根据高斯光束等相位面的公式：

$$R(z) = z + f^2/z^2 \quad (1)$$

若经过透镜变换，使 $f \rightarrow 0$ ，即高斯光束的束腰 $\omega_0' \rightarrow 0$ ，则 $R(z) \rightarrow z$ ，可认为是一个球面波。从而可以实现模式匹配。

高斯光束经过透镜变换后，得：

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{f}{F^2} \quad (2)$$

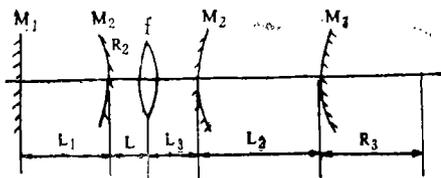


图6 主、副谐振腔匹配图

为实现高斯光束和球面波的匹配，我们从数量上作三点规定：

1. 根据高斯光束的等相位面  $R(z) = z + f^2/z$ ，当  $|f^2/z^2| \ll 1$  时，为高斯光束与球面波匹配的必要条件；

2. 高斯光束的等相位面和球面波的等相位面在镜面  $M_3$  上相等。或者说，高斯光束的束腰位置与球面波的共轭象点的位置重合；

3. 根据光的相干原理，若注入信号的波阵面与腔内自再现球面波的波阵面，在有效孔径内，误差不得大于  $\lambda/2$ ，否则，由于相干减弱，将抑制激光振荡。

若满足以上条件，则高斯光束和球面波可以相匹配。在激光注入锁定过程中，首先应该考虑主振荡器的模式与副振荡器的模式匹配，若不能实现匹配，应计算由此产生的误差。

设在镜面  $M_3$  上，注入信号的等相位面为  $R$ ，副腔内的自再现球面波的等相位面的曲率半径为  $R_0$ ，在有效孔径  $r$  范围内，误差  $\delta$  为：

$$\delta = |R_0 - R_i| \quad (3)$$

在副腔内往返一次后，误差为  $\delta'$ ，根据条件 3，它应小于  $\lambda/2$ 。

设  $R_i = R_0 + \delta$ ，并且  $r/R \ll 1$ ，则等相位面在腔内往返传播一次到达  $M_3$  时，所产生的误差  $\delta'$  为：

$$\delta' = \frac{r^2}{2} \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_i} \right) \quad (4)$$

式中， $R_i' = R_0 + \delta''$ ， $\delta''$  经计算后由下式表示<sup>[7]</sup>：

$$\delta'' = \frac{\delta [1 - (R_0/2L_2)]^2}{(R_0/2L_2)^2 + \delta/2L_2} \quad (5)$$

在一般情况下， $\delta \ll R_0^2/2L_2$ ，上式变为：

$$\delta'' = \delta/m^2 \quad (6)$$

或

$$R_i' = R_0 + \frac{R_i - R_0}{m^2} \quad (7)$$

式中， $m = m_1 \cdot m_2 = (1 + \sqrt{1 + R_3/L_2}) / (-1 + \sqrt{1 + R_3/L_2})$ 。

由(7)式可知， $R_i$  和  $R_0$  之间的误差每往返一次，按  $m^2$  衰减。因此，对于放大倍率较大的非稳腔，由于注入信号的等相位面产生的偏差  $\delta$ ，是随着往返次数增加而逐渐减小的。

为了求出  $R_i$  误差的最大范围，根据条件 3 得到：

$$\frac{\lambda}{4} > |\delta'| = \frac{r^2}{2} \frac{|R_i - R_0|}{R_0 [(m^2 - 1)R_0 + R_i]} \quad (8)$$

解上式得到：

$$-\frac{\lambda R_0^2 m^2}{2r^2 + \lambda R_0} \leq R_i - R_0 \leq \frac{\lambda R_0^2 m^2}{2r^2 - \lambda R_0} \quad (9)$$

在实验中，使用  $R_2 = 3\text{m}$ ， $L_1 = 0.65\text{m}$ ， $R_3 = 9\text{m}$ ， $L_2 = 0.7\text{m}$ ， $R_0 = 2.68\text{m}$ ，计算得到：

$$-7.3\text{m} \leq R_i - R_o \leq 32.7\text{m} \quad (10)$$

由此可见，在注入锁定技术中，对于谐振腔型的要求不很严格，因此，注入锁定的关键仍然是如何实现注入信号激发副振荡器振荡和保持注入信号与振荡信号相干放大。

#### 四、实验结果及分析

本文根据上述光学系统，做了实验。主振荡器使用F-P标准具和四分之一波片对配合选择单纵模，实验测得连续输出单纵模功率为6mW。副振荡器是一个双凸的非稳腔，采用腔倒空调Q技术。实验测量采用100MHz的美国军用示波器，测量出脉冲波形平滑无任何拍频效应及毛刺，如图7所示。测量单纵模采用长度为30mm，反射率在90%以上的F-P标准具，拍摄出如图8所示的干涉圆环。由于峰值功率极大，使得测量标准具的介质膜层部分损坏，使干涉环质量变差。从图7中，经过测量得到脉冲能量为50mJ，脉宽为40ns，重复频率为1pps。由此可知，注入锁定后所输出的激光，其振荡频率是单频，而且实现了调Q。实验分析表明：

1. 连续单纵模激光器作为高增益调Q激光器注入锁定的主振荡器是可行的。
2. 调Q非稳腔注入锁定激光器能压缩频率线宽，实现单频、高峰值功率、大能量运转。
3. 本文的光学系统设计简单，在技术上较易实现激光注入锁定。

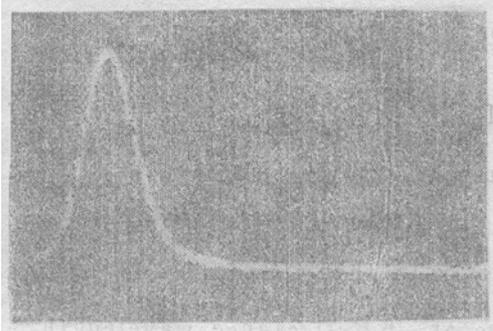


图7 注入锁定的调Q波形图

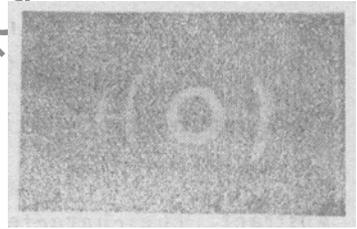


图8 用F-P标准具拍摄的注入锁定干涉图

#### 参 考 文 献

- [1] IEEE J.Q.E., 1984, Vol.QE-20, P.117~125.
- [2] 蓝信矩、郭建强, YAG固体激光注入锁定技术的研究, 华中工学院硕士生毕业论文, 1987年.
- [3] Opt.Comm., 1981, Vol.37, P.411~416.
- [4] Opt.Comm., 1982, Vol.43, P.414~418.
- [5] Appl.Phys., 1975, Vol.6, P.267~276.
- [6] Proc.IEEE, March 1965, P.277~287.
- [7] IEEE J.Q.E., 1980, Vol.QE-16, No.2, P.235~241.

作者简介：郭建强，男，1957年3月出生。教师，硕士。现从事光电子技术专业。

蓝信矩，男，1932年出生。教授。YAG光纤激光手术刀获国家发明二等奖。现从事电子技术专业。

收稿日期：1989年7月14日。