

Nd:YAG 激光器 AM 锁模稳定性的研究

黄国标 董沙雷 关绮玲 温中一

(华中工学院激光研究所)

提要: 为了提高锁模激光器输出稳定性,本文研究并解决了高效率声光调制器、高稳定度 100 兆周高频驱动电源、激光器腔长稳定、防震、稳流 Kr 灯泵浦电源、光反馈稳光等技术问题。

Research of stability of Nd:YAG AM mode-locked laser

Huang Guobiao, Dong Shalei, Guan Yiling, Wen Zhongyi

(Huazhong Institute of Technology)

Abstract: To improve the output stability of the mode-locked laser, technical problems have studied on the 200MHz acousto-optical modulator, 100 MHz U. H. F. driving source, the stabilization of the laser resonator length, the stable current of the Kr lamp, shock-proof, stabilization of light by light-feedback, etc.

我们于 1980 年 4 月研制成功一台 200 兆周的连续 Nd:YAG 声光 AM 锁模激光器^[1],而后,为提高其稳定性又继续进行了一系列的试验研究工作,有效地解决了 AM 锁模激光器的稳定输出问题。

1. 调制深度

调制器是主动锁模激光器的核心元件。调制器的调制深度对锁模状态的影响可从以下分析中看出,在损耗调制下,光波电场为:

$$\begin{aligned}
 e(t) = & A_c \sin(\omega_c t + \varphi_c) \\
 & + \frac{A_c \delta_m}{2} \cos[(\omega_c + \omega_s)t + (\varphi_c + \varphi_2)] \\
 & + \frac{A_c \delta_m}{2} \cos[(\omega_c - \omega_s)t + (\varphi_c - \varphi_2)]
 \end{aligned}$$

式中 $A_c = E_0 T_0$, E_0 为初始场强, T_0 为原始

透过率; $\delta_m = \frac{\Delta E_s}{A_c}$ 为调制度, ΔE_s 为损耗时场强变化量; ω_c 为光波角频率; ω_s 为损耗调制角频率; φ_c 为光波初相角, φ_2 为透过率变化的初相角。由于损耗的调制频率 $f_s = 2\pi\omega_s = \Delta\nu_a$, 即与谐振腔内纵模间隔相等,所以内腔损耗调制可以通过边频的耦合效应把增益曲线内的所有纵模耦合起来,而其耦合强弱则取决于边频的振幅 $\frac{A_c \delta_m}{2}$, 亦即取决于调制度 δ_m 。显然,当调制度不够时,各纵模的相位锁定不完全,各纵模相位的随机性将使激光输出为无规的尖峰脉冲,即弛豫振荡占主导地位,锁模处于不稳定状态,严重时乃至完全

收稿日期:1982年4月30日。

失锁。实验结果证实了这种关系。当 δ_L 值减小到一定数值时,会引起 20~1000 千赫范围内的阻尼弛豫振荡,继续减小 δ_L 值,就引起锁模脉冲幅度的随机涨落和脉冲序列的不稳定,严重时将完全失锁。实验表明当平均功率为 200 毫瓦时,要求 δ_L 大于 10% 才能达到较好的锁模状态。

为了获得足够大的调制深度,我们的调制器选择了 Bragg 衍射方式和驻波工作方式。声光介质选用了折射率较高的 ZF_7 重火石玻璃,换能器选用机电耦合系数较大的 $LiNbO_3$ 晶体(Y-36° 切割),它还具有较大的长宽比(=10)。此外,驻波调制器对声光介质高度 h 要求严格控制为声波半波长的整数倍,否则由于干涉的作用会大大削弱驻波声场强度。这样设计的调制器在三次谐波激励下衍射效率大于 18%,在全部自然空冷时仍能使激光器连续稳定锁模 8 小时以上。

2. 谐振腔的腔长稳定与抗震

主动锁模激光器的腔长要有足够的稳定度,并要有高精度的平动微调机构。根据锁模条件 $f_m = \frac{c}{2L}$, 要求腔长的稳定度 $\Delta L \sim 2$ 微米数量级,对腔长 $L = 750$ 毫米的谐振腔支架来说,受温度变化或振动等外界因素的影响, ΔL 很容易超出这个范围。因此必须设计一台温度膨胀系数极小的谐振腔支架,同时还要考虑防震措施。我们采用三根石英棒作为谐振腔两个反射镜之间的主要支撑,并以钢钢构件作长度补偿,腔长变化可以控制在 0.1 微米/°C 以下。同时,我们还设计了一套波纹片弹性支承微调机构,这是一种无间隙导轨,平动精度高,能方便地进行腔长微调,以获得最佳锁模状态。利用这个微调机构进行微米量级的腔长微调,便可观测到锁模状态的变化。实测表明,本锁模激光器的失调范围约为 20 微米,通过 BP-3 型频谱分析仪对锁模脉冲的拍频频谱进行观测,可以清楚地判明这种失谐状态。在稳定锁模时,

脉冲的拍频频谱近似为一个清晰光滑的高斯分布。在失谐时,主拍频谱上出现大幅度的低频弛豫振荡而变得不光滑了。

振动也可以引起腔长的变化,从而影响锁模状态。我们曾在普通光具座上进行锁模试验,当用木郎头轻轻敲击光具座时,便很敏感地发生短时间的失锁,在示波器上可以看到如图 1(a)所示的输出波形(扫描速度为 50 微秒/格),这时锁模脉冲已完全被一些低频的随机振荡所代替。而同样的敲击对石英棒谐振腔的影响却比较小。输出波形如图 1(b)所示。我们又用电动式激振器分别作用在谐振腔端部和中部位置上,对于频率为 20~100 赫、振幅小于 15 微米的机械振动力均不会破坏稳定锁模运行状态。

激光头的冷却循环液,因水泵压力的交替变化,也会引起腔架振动,使锁模脉冲输出不稳定,如图 1(c)所示。为消除这种不良影

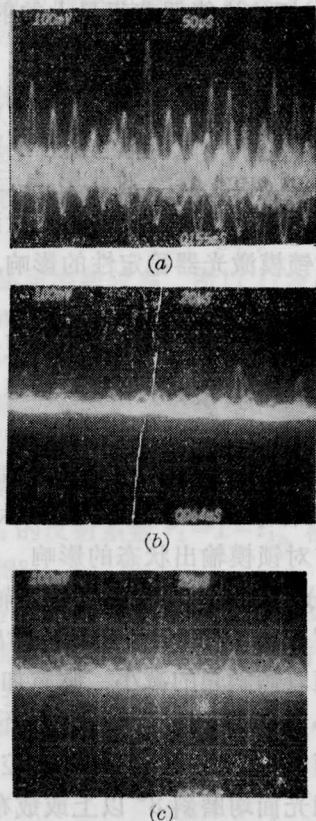


图 1 振动对锁模输出的影响

响,设计了一种水压缓冲装置,效果很好。

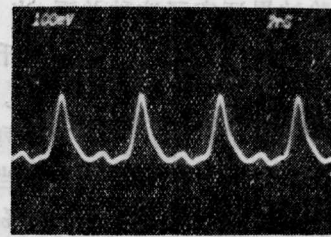
热空气在谐振腔内的扰动也会造成腔长的改变,这是由于空气在不同温度下折射率发生改变所致。考虑到这种后果,我们特意在锁模激光器上加上有机玻璃的封闭罩,以防止外界热空气的扰动。

3. 调制频率的稳定度

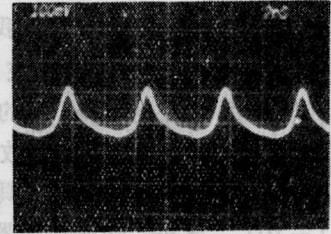
我们研制的调制器射频驱动电源,其频率稳定度达到 10^{-8} /天,它是由带有恒温槽的100兆赫石英晶体振荡器经三级电压放大和三级丙类功放组合而成的。接50欧负载时,最大功率输出可达8瓦,而管耗仅为1瓦,可以在连续8小时以上保持稳定输出。射频驱动电源与调制器的换能器之间的阻抗匹配要十分适当,否则将使调制深度下降,影响锁模的稳定性,还会造成功率管严重发热。采用LC的T型网络就可以达到较好的匹配效果。在微调时用Y环形器接入高频中功率计监测,以便使换能器获得最大的射频率。

4. 弱标准具效应

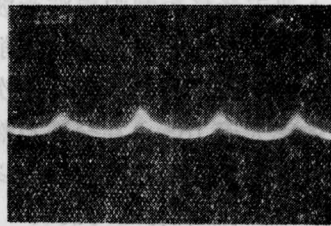
谐振腔内若存在插入件的两端面构成标准具效应,锁模脉冲宽度将因子腔作用而大大加宽,Kuizenga等^[2]对此影响已作出定量的分析。除此之外,我们还注意到弱标准具效应对锁模激光器稳定性的影响。因为这种效应的结果是在子腔内产生随机性振荡,这些子脉冲迭加到锁模脉冲后,便会使输出的锁模脉冲亦处于一种不稳定状态。计算表明,所有插入件中,以Nd:YAG晶体棒的两个端面形成的标准具效应最大。通过偏转Nd:YAG棒来改变标准具效应的大小,就可以观察它对锁模输出状态的影响。图2(a)、(b)、(c)分别表示棒端面法线与光轴的夹角为 2° 、 1° 和 0.5° 时的锁模脉冲输出。可以看出,随着倾斜角的减小,脉宽加大幅度减小。当小于 0.5° 时,锁模脉冲很不稳定,甚至失锁而消失。为此,要求谐振腔内所有光学件的通光面均磨斜 3° 以上或成布儒斯特角入射,端面还应镀增透膜。



(a)



(b)



(c)

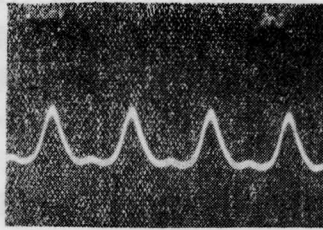
图2 标准具效应对锁模脉冲输出的影响

5. 稳流Kr灯泵浦电源

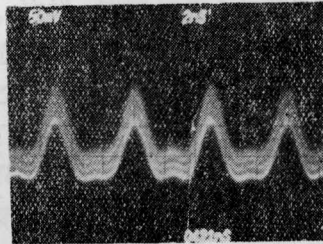
实验表明,当Nd:YAG激光器的Kr灯泵浦电流达到0.1%的稳定度时,可以获得稳定度比较好的锁模脉冲输出。图3(a)、(b)分别是在稳流和未稳流时所得的锁模脉冲波形。为了达到0.1%的电流稳定度,我们采用了先由特别设计的谐振变压器稳压,再用大功率晶体管稳流的方法。其优点是既能达到较高的稳流精度,又可以使大功率晶体管得到保护和有较高的运行效率。

6. 光反馈稳光

采取上述各种措施后,虽然已得到比较稳定的锁模输出,但还存在一些较慢过程的输出波动和漂移,特别是在长时间连续运行时更是如此。这些波动和漂移多是由于Kr灯放电电弧不稳定等因素引起的,必须考虑从激光本身来寻找稳定的办法。为此我们试验成功了一种利用光反馈来进一步稳定激光



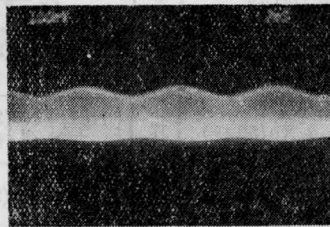
(a)



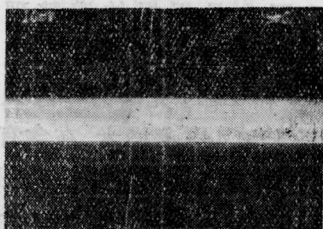
(b)

图3 稳流与非稳流对锁模输出的影响

输出的新装置, 这就是利用光电元件在谐振腔内取出激光的波动变化信号, 以负反馈方式经运算放大器放大后推动大功率晶体调整管, 控制泵浦电流作相应改变, 使激光输出达到稳定。图4(a)是没有光反馈时锁模脉冲序列的慢扫描波形(扫描速度为2毫秒/格), 其脉冲幅值受到一个频率约为几百赫的低频调制。图4(b)是加光反馈后的锁模输出。这时脉冲幅值包络是一条光滑稳定的直线。图5是在较长的连续运转中两种状态的光强输出稳定度的比较。由图可见光反馈的稳定作用是明显的。



(a)



(b)

图4 光反馈对锁模脉冲序列输出的影响

出稳定度的比较。由图可见光反馈的稳定作用是明显的。

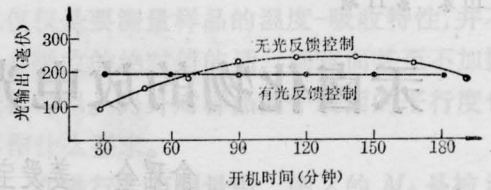
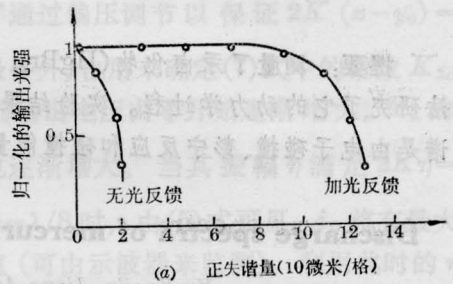
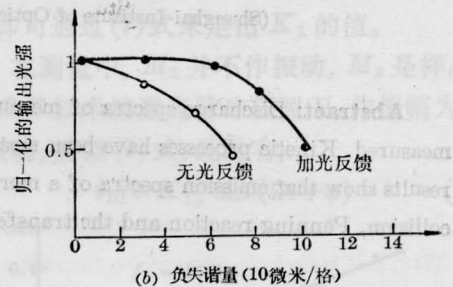


图5 两种状态的输出特性比较



(a) 正失谐量(10微米/格)



(b) 负失谐量(10微米/格)

图6 光反馈对失谐范围的影响

试验还发现, 光反馈作用还可使谐振腔的准直范围及锁模失谐范围扩大了不少。其中正失谐范围的增大更显著, 如图6所示。这种特性的存在可以降低对正、负失谐量的要求, 从而使在相同条件下增加了锁模输出的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 华中工学院激光教研室; 《激光与红外》, 1980, No. 9, 75.
- [2] D. J. Kuizenga; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **QE-6**, No. 11, 694~708.
- [3] R. C. Eckardt, C. H. Lee, J. N. Bradford; *Opt-Electronics*, 1974, **6**, 67~85.
- [4] J. H. Wandington; *Electron-Optics/Laser International* 76, UK, 1978, 12~25.