

# 注入锁定铜蒸气激光器的实验研究

梁培辉 任虹 沈琪敏 沃敏政

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

使用两台相同的望远镜式非稳腔铜蒸气激光器, 通过一块  $45^\circ$  玻璃平板作腔的耦合组成匹配的注入锁定系统, 研究了同步、注入信号功率和光束孔径大小等因素对输出功率和方向性的影响, 实验结果清楚地表明, 注入信号的作用在于抑制腔内高阶横模(包括被放大的自发发射)的竞争, 使高增益介质的激光器既提高效率又改善方向性。注入锁定器件功率水平在 5 左右的情况下, 其结果与单独非稳腔振荡相比, 输出功率增加 30~40%, 方向性改善一倍以上。

关键词: 铜蒸气激光器, 注入锁定, 效率, 发散角。

## 一、引 言

激光器的注入锁定技术已有 20 年左右的历史<sup>[1]</sup>。开始的时候, 注意力集中在通过这种技术获得频率稳定的高功率连续激光或脉冲激光, 随着高增益介质激光器的发展, 为了克服多纵模、多横模振荡, 注入锁定技术愈来愈受到重视, 采用这种技术的染料激光器<sup>[2]</sup>、准分子激光器<sup>[3]</sup>已有较详细的分析和实验结果。

近年来发展很快的铜蒸气激光器由于增益很高, 即使采用放大倍率高达几十的非稳腔, 光束的方向性还是比衍射极限高一个量级。显然, 为了提高铜蒸气激光器输出光束的方向性, 注入锁定的非稳腔是一种很可取的方案。实验表明这种判断是正确的<sup>[4, 5]</sup>。

但就作者所知, 关于注入锁定非稳腔铜蒸气激光器的报导, 较偏重于最终指标的数据, 而缺乏供进一步作物理分析的实验结果。本文在铜蒸气激光振荡放大系统的实验基础上<sup>[6, 7]</sup>, 研究延时、注入光束孔径和注入信号大小等方面对输出光束方向性、输出功率和脉冲形状的影响, 从而阐明注入锁定非稳腔的优点: 效率高、方向性好来源于注入信号对腔内高阶横模与被放大的自发辐射(ASE)的抑制。

## 二、器件结构与实验方法

实验用的铜蒸气激光器为重复率 6 kHz 的自加热式器件, 产生注入信号的振荡器  $L_1$  和注入锁定的振荡放大器  $L_2$  均具有相同的结构: 放电管内径  $D=2.6$  cm, 电极距离 89.0 cm。  $L_1$  和  $L_2$  都是倍率  $M=10$  的望远镜式非稳定腔, 两腔板的曲率半径分别为  $R_1=500$  cm 和  $R_2=50$  cm。用中心有  $\phi 6$  mm 小孔的  $45^\circ$  全反射平板作输出耦合镜。在  $L_2$  的放电管与后腔板间放置一块与腔轴成  $45^\circ$  的平行平板玻璃, 将  $L_1$  的光束的部分功率( $\sim 8\%$ )注入。为

了研究注入光束孔径大小对注入锁定的影响,在光路上置一可变光阑,如图1所示。

$L_1$  与  $L_2$  之间的同步与延时由激光器电源的信号发生器控制<sup>[6]</sup>,光束的方向性仍用“穿孔法”,即在光束的焦斑处放置一光阑,依次改变光阑的大小,测量各种立体角内对应的功率百分比数<sup>[7]</sup>。

为了研究注入信号与锁定的振荡放大器内自发发射的关系,用  $f=2\text{m}$  的正透镜将光束聚焦,焦点处放一块  $45^\circ$  全反射平板,中间有  $\phi 4\text{mm}$  的小孔。以便于对低阶横模激光与高阶横模激光(包括 ASE)进行观察以及用 SD 2490 型数字式激光功率计进行测量。光束的脉冲波形用硅光电二极管和  $350\text{MHz}$  的示波器显示。

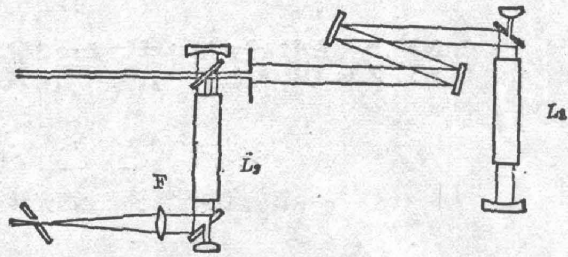


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up.

### 三、注入信号振荡器 $L_1$ 与注入锁定振荡放大器 $L_2$ 的激光特性

当  $L_1$  与  $L_2$  分别独立振荡时,激光的特性是相似的:方向性相同,激光波形差别也不大。图2(a)和图2(b)分别为  $L_1$  与  $L_2$  的激光脉冲形状,前者的半高宽约为  $18\text{ns}$ ,后者约为  $20\text{ns}$ 。去掉  $L_2$  的前后腔板就构成简单行波放大系统,图2(c)是放大器的输出脉冲波形,可以看出其宽度与振荡器相同。

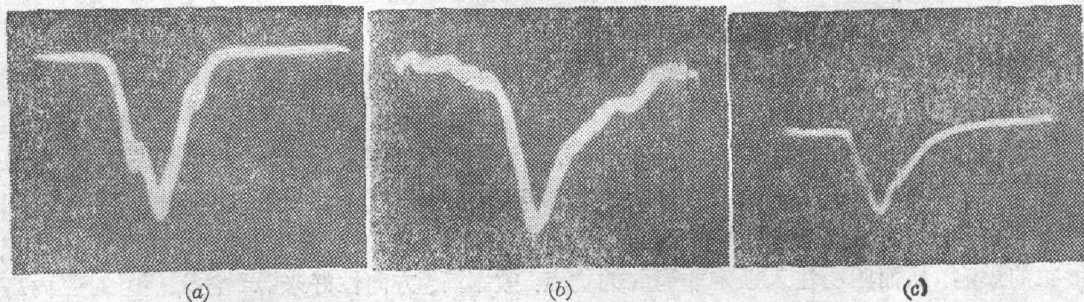


Fig. 2 CVL pulse profiles for (a)  $L_1$  as oscillator, (b)  $L_2$  as oscillator, (c)  $L_2$  as travelling wave amplifier

为了对注入锁定与单独振荡作准确的比较,我们首先比较了  $L_2$  望远镜腔内插入  $45^\circ$  平行平板玻璃与原来腔的性能,实验结果表明,平行平板玻璃虽然使腔内增加  $8\%$  左右的反射损耗,但在正常条件下,即器件输出  $5\text{W}$  左右的情况下,它对  $L_2$  振荡器的影响可以忽略不计,无论是效率还是方向性,都是如此。原因也很简单,因为激光器的单程增益非常高。

### 四、注入锁定的时间同步

脉冲条件下注入锁定与行波放大都要求  $L_1$ 、 $L_2$  同步运转,延时不当就使输出下降。但

是两者也有不同:行波放大情况下,延时不当,输入信号不但不被放大,甚至使振荡放大系统没有输出,因为此时放大器起了衰减作用变成衰减器<sup>[6]</sup>;但注入锁定情况下,延时不当, $L_2$ 单独振荡,系统的输出等于  $L_2$  的输出耦合进的  $L_1$  的信号的叠加。

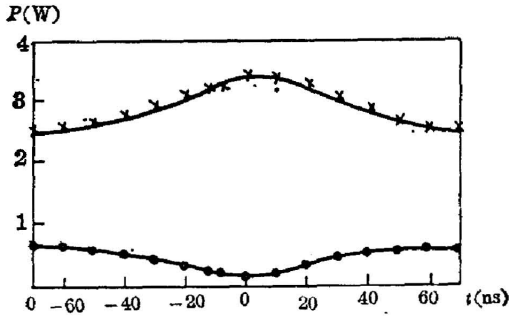


Fig. 3 Effect of relative delay time on the output powers of low order(-x) and high order transverse modes(-o)

图 3 是注入锁定输出功率与  $L_1$ 、 $L_2$  之间相对延时的关系的实验曲线。图 3 上面的曲线对应于低阶模,即方向性在 2 mrad 以下者;下面的曲线对应于高阶模(包括 ASE),即方向性比 2 mrad 大者。从图 3 实验结果可以得出:

(1) 延时合适,注入锁定提取的功率比单独振荡可以提高 40%,(从 2.5 W 增加到 3.5 W)。

(2) 注入锁定的延时范围(即在此延时范围内注入锁定提供的功率高于独立振荡者)为 140 ns 与行波放大的延时

范围一致,同为铜蒸气激光器放电脉冲所决定。

(3) 在峰值附近,延时变化 10 ns,总输出下降 3%,这远不如行波放大那样灵敏。但扣除独立振荡的贡献(2.5 W),只计算注入锁定造成功率增加的这一部分,则延时变化 10 ns,下降达 13%。

(4) 延时最佳时,总输出功率最大,但高阶模(包括 ASE)的输出则最小。

定性的分析可以预料,为了获得最佳的注入锁定效果,  $L_1$  的注入信号应该在  $L_2$  形成独立振荡之前注入,实验证实这个分析的正确性。让  $L_1$  和  $L_2$  激光信号各自经硅光二极管进入双线示波器,运用 A 触发 B 模式工作。分别记录各自独立振荡和最佳延时注入锁定两种情况下  $L_1$  与  $L_2$  输出脉冲的相对时间关系,如图 4(a)和图 4(b)所示,比较  $L_1$  与  $L_2$  脉冲的相对时间间隔,可以知道为了抑制  $L_2$  内的 ASE,  $L_1$  的信号应该较  $L_2$  独立起振的时刻提前 5 ns 左右。

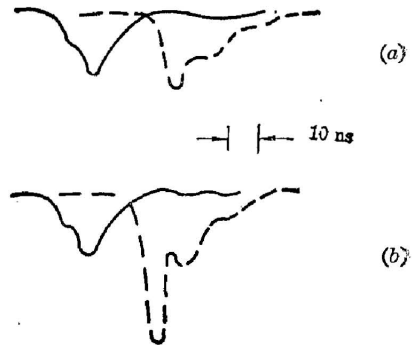


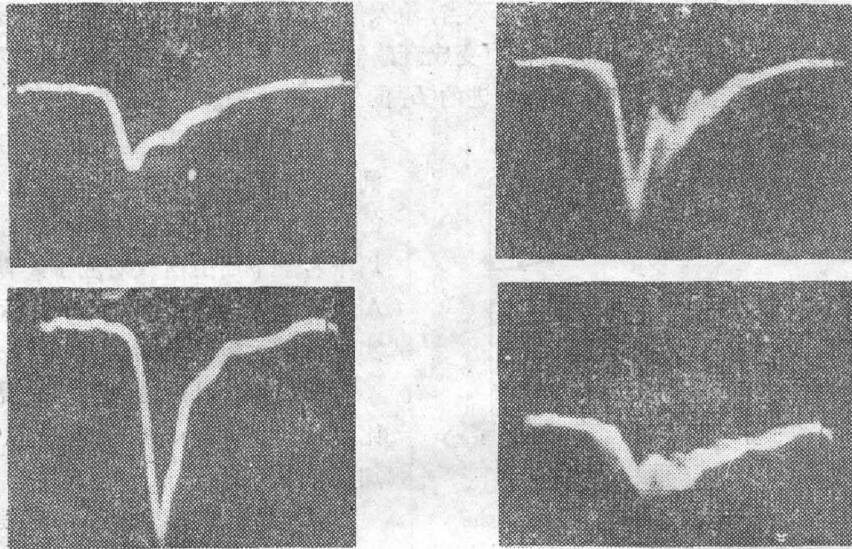
Fig. 4 Time behavior of pulses from  $L_1$  and  $L_2$  as

(a) independent oscillation  
 (b)  $L_2$  to be injection locked unstable resonator laser at optimum delay time.  
 Solid line— $L_1$ , dashed line— $L_2$ , the optical delay time between  $L_1$  and  $L_2$  is the same both in (a) and (b)

### 五、注入信号对高阶横模的抑制与注入锁定激光器方向性的改善

为了更清楚地了解注入锁定中注入信号的作用,我们记录了  $L_2$  的低阶横模与高阶横模(包括 ASE)在独立振荡与注入锁定条件的输出波形,如图 5 所示。

非常清楚地看到,注入信号使  $L_2$  的高阶横模减弱而使低阶横模增强。这个结果与图 3 所表示的内容相互补充,前者反映在最佳延时条件下,注入信号对横模的控制能力,后者则

Fig. 5 Pulse profile of  $L_2$  in different cases.

above—low order transverse modes below—high order transverse modes left—dependent oscillation right—injection locked unstable resonator. (time scale: 10 ns/div.)

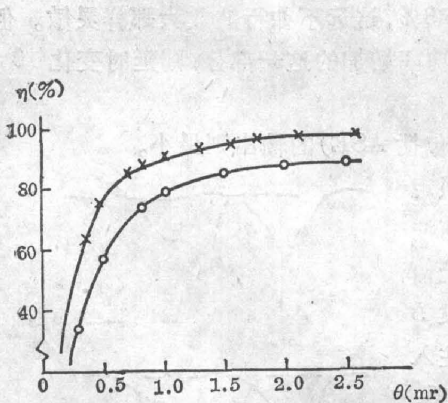


Fig. 6 Divergency plots for independent oscillation ( $-o$ ) and injected unstable resonator ( $-x$ ) of  $L_2$ , where the divergency is defined as the normalized power per certain solid angle. Input electric power  $P_{in}=3\text{ kW}$ , injected signal—12 mW, injected beam diameter—4mm

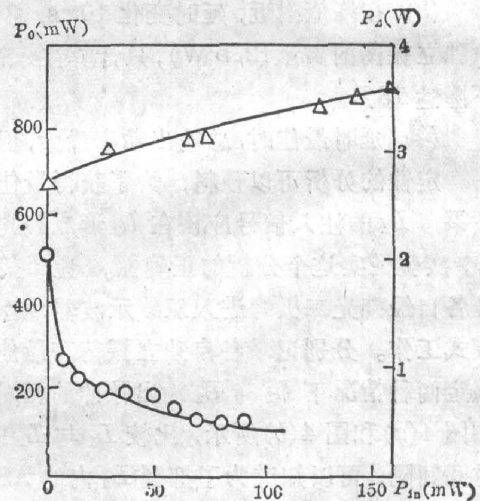


Fig. 7 Plots of output power against injected signal in the injected locked unstable resonator  $L_2$ . ( $\Delta$ —low order transverse modes,  $\circ$ —high order ones.) Injected beam diameter is 4mm.

反映这种控制能力与延时的关系。

图6是用“穿孔法”测量  $L_2$  作为独立振荡的非稳腔与注入锁定条件下的输出方向性,由于高阶横模受到抑制而增加了低阶模的输出,注入锁定的输出光束的方向性得到了显著改善,以功率的80%计,方向性从1.2 mrad进一步下降为0.5 mrad。

注入锁定的关键是注入信号的出现,它包括信号的大小、延时以及模式匹配。从实验工



作中我们了解到,  $L_1$  与  $L_2$  的模式匹配比较容易做到, 而且条件不是很接近临界的。图 7 给

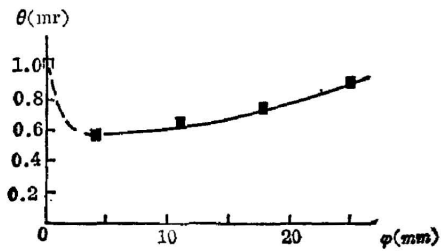


Fig. 8 Experimental curve of divergency versus injected beam diameter in injected locked unstable resonator  $L_2$ , (operated at optimum delay time, output power  $\sim 3$  W)

出不同信号功率注入下,  $L_2$  的输出变化, 由图 7 看出,  $L_2$  输出功率为 5 W 左右的情况下, 注入信号只需几十 mW 即可。从高阶横模(包括 ASE)的输出与注入信号大小的关系可以更清楚地看到, 注入信号的进一步加大对方向性的改善作用不大。

最后, 我们还应该考虑注入光束的孔径的影响, 本实验方案的一个优点是输入光束孔径容易改变。

图 8 是注入锁定激光器  $L_2$  输出光束方向性与注入光束孔径关系的实验曲线。

## 六、结 束 语

过去, 通常在采用提高激光器输出光束方向性的措施下, 常常会使效率下降, 但本文的注入锁定的铜蒸气激光器比之独立振荡的非稳腔, 方向性提高了一倍多, 而输出功率还提高 30~40%, 实验结果充分说明这种良好的效果来源于注入信号对高阶横模(包括 ASE)的抑制作用。因此可以推论, 所用的铜蒸气激光管口径  $D$  越大, 增益越高, 换言之, 被放大的自发发射与高阶横模越容易出现的情况下, 注入锁定的效果就显著, 例如, 可以预料, 当功率为几十 W 时, 输出功率提高 50% 以上。

从器件的同步、延时、注入信号的大小等方面来看, 本文的实验结果表明, 这些参量都不是很接近临界, 而是容易达到的。因此, 对于增益甚高的激光器来说, 注入锁定是一种很理想的工作方式。

## 参 考 文 献

- [1] C. J. Buczek *et al.*; *Proc. IEEE*, 1973, **61**, No. 10 (Oct), 1411.
- [2] U. Ganiel *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, **QE-12**, No. 11 (Nov), 704~716
- [3] I. J. Bigio *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 9 (Sep), 1426.
- [4] B. E. Warner; *Digest of CLEO'86* (WE1)
- [5] G. A. Maylor *et al.*; *Digest of CLEO'86* (WE2)
- [6] 梁培辉等;《中国激光》, 1987, **14**, No. 1 (Jan), 45~48.
- [7] 梁培辉等;《中国激光》, 1987

## Experimental studies of injection locked copper vapor laser

LIANG PEIHUI, REN HONG, SHENG QIMING AND WO MINZHENG  
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 25 November 1986; revised 17 February 1987)

### Abstract

This paper presents a study on the influences of timing, injected signal power and injected beam diameter upon the output power and divergency of a injection locking system, which is composed of two similar telescope unstable OVL with a 45° glass plate inside of one laser as coupling optics. The results showed that the injected signal strongly suppressed the competition of high order transverse modes (including ASE) in cavity, then led to raise the efficiency and to improve the divergency simultaneously. In the case of output power about 5W, the injection locked system raised the power by 30~40% and reduced the divergency to half, compared with the independent unstable resonator.

**Key Words:** copper vapor laser; injection locking; efficiency; divergency.