

## 注入锁定铜蒸气激光器的时空、能量以及偏振特性

任虹 沃敏政 沈琪敏 何明霞 梁培辉

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 采用  $P$  分量的偏振光注入到平行平面腔的铜蒸气激光器中, 结果表明, 与未加注入光时的振荡器比较, 注入锁定铜蒸气激光器的输出功率提高了 43%,  $P$  分量的偏振度从 0.30 提高到 0.78, 脉宽由 36 ns 加宽到 48 ns, 输出光的发散角显著改善, 由 7.8 mrad 降到 1.1 mrad, 与注入光束基本相同。

**关键词:** 铜蒸气激光器, 注入锁定, 偏振

### Temporal, spatial, energy and polarized properties of an injection-locked copper vapor laser

*Ren Hong, Wo Mingzhen, Shen Qimin, He Mingxia, Liang Peihui*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** We studied the temporal, spatial, energy and polarized properties of a copper vapor laser with plane-plane resonator into which a parallel polarized beam was injected. The results showed that comparing with the original oscillator, the output of such injection-locked copper vapor laser was increased by 43%, the degree of polarization rised from 0.30 to 0.78, the pulse width was broadened from 36ns to 48ns, the divergence of output beam was improved remarkably from 7.8 mrad to 1.1 mrad and approximately equal to that of the injecting beam.

**Key words:** copper vapor laser, injection locking, polarization

### 一、引言

由于铜蒸气激光器是高增益介质激光器, 为了既获得较好的光束质量, 又能更多地提取输出激光功率, 近来开展了对铜蒸气激光器振荡-放大系统延时特性、时空特性以及能量特性的研究<sup>[1~5]</sup>。为了克服高增益激光器中多纵模、多横模振荡, 注入锁定技术愈来愈受到重视, 已被广泛地应用<sup>[6,7]</sup>。我们曾对非稳腔注入锁定铜蒸气激光器进行过实验研究<sup>[8]</sup>。本文报道的是采用平行平面腔注入锁定铜蒸气激光器的实验结果, 它与非稳腔注入锁定铜蒸气激光器相比, 结构简单、调整方便, 波面以及孔径自然匹配。实验研究了同步、注入光功率、方向性、偏振度对输出光功率、脉宽、方向性、偏振度的影响, 从而阐明注入锁定铜蒸气激光器能利用注入光充分抑制腔内高阶模(包括放大的自发辐射)的竞争。

## 二、实验装置及实验条件

实验采用两台结构相同的自加热式纯铜激光器，放电管内径为 2.6 cm，电极间距为 89.0

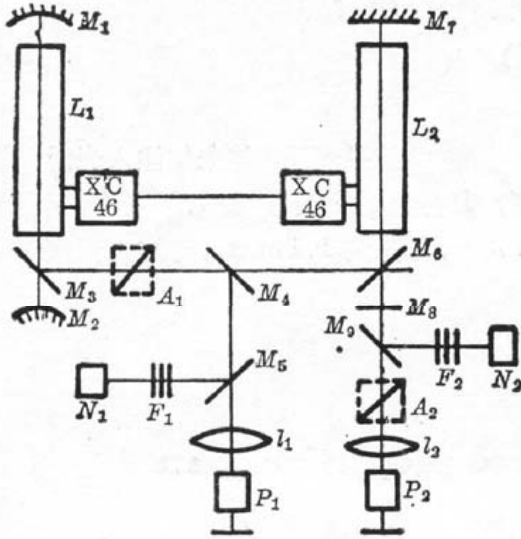


图 1 实验装置示意图

cm，充 Ne 气作为缓冲气体，气压在 30~50 Torr 之间。实验装置如图 1 所示，振荡器  $L_1$  采用放大倍率  $M=10$  的望远镜式非稳腔， $M_1$  与  $M_2$  为球面全反镜，曲率半径分别为  $-5000$  mm 和  $500$  mm，用  $\phi 6$  mm  $45^\circ$  的斜孔全反平板  $M_3$  作输出耦合镜，其输出的平行光作为注入光，它与平行平面腔输出光的波面以及孔径自然匹配。 $M_4$ 、 $M_5$ 、 $M_6$ 、 $M_8$ 、 $M_9$  都是平板玻璃； $M_7$  为全反镜； $A_1$  与  $A_2$  为洛匈棱镜，用于起偏和检偏； $F_1$  和  $F_2$  是滤光片； $N_1$ 、 $N_2$  为 PIN 管，其电信号通过 100 MHz 的通用示波器观察脉冲激光波形； $l_1$ 、 $l_2$  为透镜， $P_1$  与  $P_2$  是 SD 2490 型数字式功率计。

实验采用转移式放电路激励，充电电容为 5000 pf，锐化电容为 1000 pf，重复频率为 6 kHz，闸流管采用 4050 A 型。用振荡器  $L_1$  的脉冲信号作为注入锁定激光器  $L_2$  的外触发信号，调节 X C-46 型脉冲信号发生器的延时，以使振荡器与注入锁定激光器两者保持同步。

## 三、激光的时间特性

为了能准确理解注入光的作用，并对注入锁定激光器作出定性的物理分析，本文从出光时间、脉冲波形、同步特性三个方面对输出激光的时间特性进行了研究。从光路中移去  $A_1$ 、 $A_2$ ，

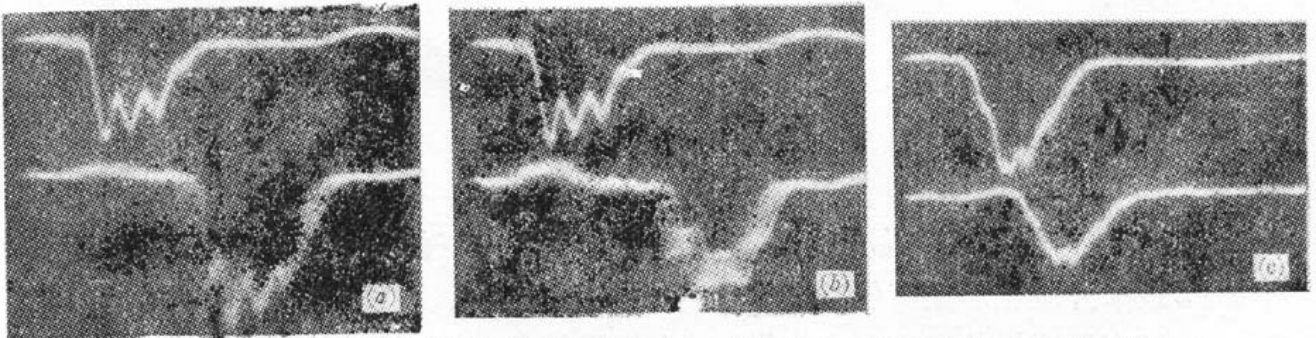


图 2 (a) 注入光(上)与注入锁定光(下)；(b)  $L_1$ (上) $L_2$ (下)独立振荡的波形；(c) 注入光(上)与通过  $L_2$  后的注入光(下)。横坐标为 20 ns/div

图 2 是从示波器上拍摄的激光波形。图 2(c) 与 (a)、(b) 的振荡器输入电压略有不同，但光路不变。图 2(a) 与图 2(b) 的工作条件完全相同。图 2(a) 是最佳延时，注入光与注入锁定后输出光的波形，均以波形的起始点为基准，从图 2(a) 中测出注入锁定的输出光在振荡器  $L_1$  的输出光即注入光之后 44 ns。图 2(b) 是我们在  $M_4$  与  $M_6$  之间挡去注入光后得到的波形，它们分别是两台激光器独立振荡时的激光波形，图中表明：激光器  $L_2$  作为振荡器时，其输出光要落后振

荡器  $L_1$  的输出光  $59\text{ ns}$ 。图 2(c) 是在切断注入锁定激光器  $L_2$  的电源后拍摄的两个注入光波形, 第二个波形是注入光通过激光器  $L_2$  后的波形, 可以测出注入光是在经过  $24\text{ ns}$  的固定光学和电缆线延时后到达注入锁定激光器的。由此可分析出: 从注入光到达激光器  $L_2$  到注入锁定激光器出光有  $20\text{ ns}$  的时间差, 在这段时间内, 由于放电开始后不久, 增益刚刚达到阈值, 处于预放大阶段, 因此输出光很弱。以后放电电流的上升速率迅速提高, 增益很快升高, 因此光强也迅速增加, 这是功率放大阶段。由于注入锁定激光器具有放大器的特性, 只要反转布居数大于零就有放大作用, 因此它要比激光器  $L_2$  作为振荡器时的出光阈值低。所以起始出光时间也要比激光器  $L_2$  独立振荡时提前  $15\text{ ns}$ 。可见注入锁定激光器既能降低出光阈值, 又比振荡器提前抑制了高阶模(包括放大的自发辐射)的竞争。

从图 2(a) 中测出注入光的脉宽为  $32\text{ ns}$ , 而注入锁定后的激光脉宽为  $48\text{ ns}$ , 又从图 2(b) 中测出  $L_2$  独立振荡时的激光脉宽为  $36\text{ ns}$ 。注入锁定后激光脉宽变宽也从另一个侧面反映出注入锁定激光器的反转粒子数阈值比振荡器低, 因此它能在较宽的时间范围内充分提取激活区域内的反转粒子数, 从而使输出功率明显比振荡器高。从图 2(a) 中还能观察到: 注入锁定后的激光波形基本上保持了注入光的四小峰结构, 但各峰的调制深度明显减小。这是因为在放大过程中小信号得到较高的增益, 而大信号由于饱和效应, 获得的增益较小, 图 2(a) 中第四个小峰变化最为明显。另外还测出注入锁定后的激光波形相对于注入光有  $\pm 5\text{ ns}$  的抖动, 产生抖动的原因是由于闸流管放电时间的离散量以及由此引起的波形畸变<sup>[9]</sup>。

脉冲条件下注入锁定要求两台激光器同步运转, 延时不当就会使输出下降。在图 1 中移去  $A_1$ 、 $A_2$ , 我们测量了注入锁定后激光的输出功率与相对延时的关系曲线, 如图 3 所示, 图中虚线为不加注入光时的输出功率。从中可得出:

(1) 有延时效果的时间范围为  $120\text{ ns}$ , 延时特性是不对称的, 欠延时 ( $\Delta t < 0$ ) 的变化斜率为  $2.7\% / 10\text{ ns}$ , 而过延时 ( $\Delta t > 0$ ) 的变化斜率为  $6.3\% / 10\text{ ns}$ , 它们比行波放大的变化斜率  $10 \sim 15\% / 10\text{ ns}$ <sup>[3]</sup> 要小。过延时的变化斜率大于欠延时的变化斜率是因为过延时使腔内放大的自发辐射大大增加, 以致能与注入光竞争反转粒子数; 而欠延时还能利用注入光在腔内多次振荡来增加延时, 抑制放大的自发辐射的竞争, 使起振光仍然受注入光控制; (2) 注入锁定激光器的提取功率比无注入时单独振荡的输出功率提高  $28\%$  (从  $2.00\text{ W}$  增加到  $2.55\text{ W}$ ); (3) 在峰值附近  $\pm 10\text{ ns}$  的范围内,

功率起伏小于  $2\%$ , 而行波放大在峰值附近  $\pm 10\text{ ns}$  的范围内, 功率起伏有  $5\%$ <sup>[3]</sup>。

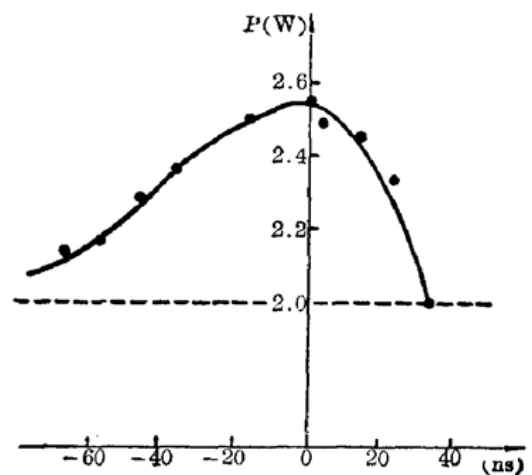


图 3 注入锁定激光器的输出功率与相对延时的关系曲线。 $V = 5.5\text{ kV}$ ;  $I = 0.47\text{ A}$ ;  $P_{N_0} = 40\text{ Torr}$ ;  $P_{in} = 10\text{ mW}$

#### 四、注入锁定后输出光的方向性

我们采用“套孔法”测量激光的发散角<sup>[4]</sup>, 以输出能量的  $80\%$  计算, 首先测出注入光的发散角为  $1.0\text{ mrad}$ , 图 4 为注入锁定后激光的方向性曲线以及激光器  $L_2$  单独振荡时激光的方

向性曲线,由图4可知,不加注入光时平行平面腔的输出光发散角为7.8 mrad,加注入光后输出光的发散角为1.1 mrad。这是因为注入锁定激光器是由注入光起振的,而平行平面腔的振荡器是由自发辐射受激光放大产生的,因此注入锁定激光器能充分抑制自发辐射的起振,使极大部分的输出光由注入光受激放大而产生,所以注入锁定后激光的方向性基本上受注入光控制。

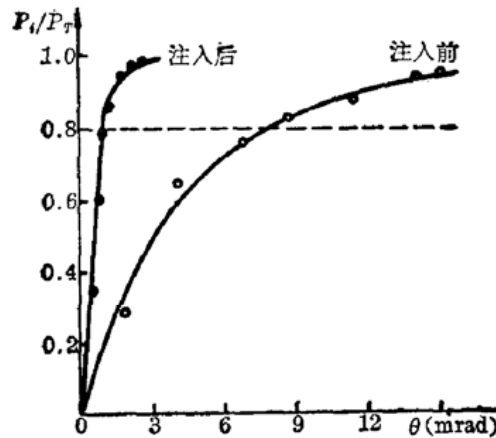


图4 注入前与注入后输出激光的方向性曲线。 $V=5.4\text{ kV}$ ;  $I=0.54\text{ A}$ ;  $P_{N_0}=40\text{ Torr}$ ;  $P_{in}=15\text{ mW}$

### 五、注入光的功率、偏振度对输出光的影响

为了能够更准确地了解注入光的控制能力,在光路中加上  $A_1$ 、 $A_2$ , 采用  $P$  分量的偏振光注入, 然后测量注入锁定后输出光的偏振度。图5为实验结果,  $P_{in}$  为实际注入光功率。由

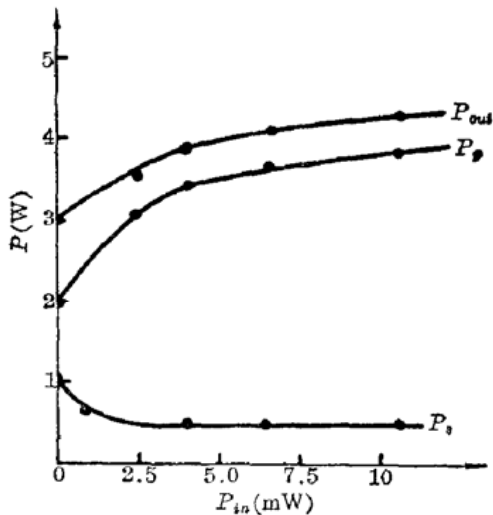


图5 注入锁定的输出功率与  $P$  分量注入光功率的关系曲线

$V=5.4\text{ kV}$   $I=0.54\text{ A}$   $P_{N_0}=40\text{ Torr}$

图5可知: (1) 当达到饱和输出功率时(以最大输出功率的95%计算)注入锁定激光器需要的注入功率为10 mW, 而行波放大的输入功率则需要200 mW<sup>[4]</sup>, 这是由于注入光提前注入, 在腔内多次往返, 不断得到放大, 在功率放大前腔内已达到较高的功率密度, 因此注入锁定激光器对注入光功率要求甚低; (2) 不加注入光时,  $P$  分量的偏振度为0.30, 若移去  $45^\circ$  放置的耦合平板  $M_6$ , 则偏振度为0, 这表明平行平面腔输出的激光为自然光, 插入  $45^\circ$  平板后, 由于  $P$  分量的透过率高于  $S$  分量, 因此输出为部分偏振光; (3) 当用  $P$  分量的偏振光注入时, 在注入功率为12.5 mW时, 测出输出光  $P$  分量的偏振度为0.78, 偏振度的提高反映出输出光是受控的, 然而输出光中始终有一小部分  $S$  分量的光, 原因有二个: (i) 铜蒸气激光器的输出为黄、绿双色光, 实验中  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_7$  均为对510.6 nm全反, 对578.2 nm增透, 在注入光中, 黄光的成份极少, 因此注入锁定输出光中有一部分在腔内振荡的黄光是不受控的, 因此在输出的  $S$  分量中黄光较多。 (ii) 注入光的光轴与振荡腔的光轴难以调整得严格重合, 这会引引起一部分  $S$

分量中黄光较多。(ii) 注入光的光轴与振荡腔的光轴难以调整得严格重合, 这会引引起一部分  $S$

分量的光沿着腔轴方向振荡输出; (4) 用  $P$  分量的偏振光注入, 其提取效率为 43% (从 3.0 W 提高到 4.3 W), 它比图 3 中用自然光注入提取效率要高。这是因为  $P$  分量的偏振光对  $45^\circ$  平板的透过率为 0.98, 而自然光为 0.90, 因此用  $P$  分量的偏振光注入时, 平板  $M_6$  的插入损耗最小, 提高功率最大。

## 六、小 结

上述的实验和分析表明, 平行平面腔内注入锁定铜蒸气激光器具有五个特点: (1) 类似于放大器, 其出光阈值低于振荡器, 输出光的方向性由注入光决定, 因而能充分提取空间体积内的反转粒子数; (2) 类同振荡器, 能在腔内多次振荡放大, 因此所需的注入光功率远远小于行波放大的输入光功率; (3) 注入光在达到反转粒子数峰值以前注入振荡器, 从而加宽了输出光的脉宽, 这样就在较宽的时间范围内抑制高阶模 (包括放大的自发辐射) 的竞争; (4) 采用  $P$  分量的偏振光注入, 由于插入损耗最小, 故激光功率提高最多, 而且输出光的偏振度也能大大提高。(5) 延时漂移对输出功率的影响远不如行波放大那样灵敏。

## 参 考 文 献

- 1 V. V. Zubov *et al.*, *Sov. J. Quant. Electr.*, **16**(12), 1606(1986)
- 2 V. P. Pelyaev *et al.*, *Sov. J. Quant. Electr.*, **15**(1), 40(1985)
- 3 梁培辉 *et al.*, *中国激光*, **14**(1), 45(1987)
- 4 梁培辉 *et al.*, *中国激光*, **14**(6), 355(1987)
- 5 M. Amit *et al.*, *Opt. Commun.*, **62**(2), 110(1987)
- 6 B. E. Warner, *Digest of CLEO'86(WE<sub>1</sub>)*
- 7 G. A. Maylor *et al.*, *Digest of CLEO'86(WE<sub>2</sub>)*
- 8 梁培辉 *et al.*, *光学学报*, **7**(9), 783(1987)
- 9 任虹 *et al.*, *中国激光*, **17**(1), 1(1990)

## CO<sub>2</sub> 激光治疗慢性肥大性鼻炎

上海同济医科大学附属同济医院自 1975 年起应用 15~20 W CO<sub>2</sub> 激光器对 237 例慢性肥大性鼻炎患者进行了治疗, 疗效显著。治疗的方法是: 用 2% 卡因加 1% 麻黄素将下鼻甲粘膜麻醉后, 用窥鼻器暴露下鼻甲, 将激光导光头对准病变粘膜, 开启激光器, 自下而上进行烧灼, 使之全部气化掉。若有出血, 可压迫止血, 再以低功率激光对准出血点凝固止血。治疗后鼻腔通气明显改善者 220 例, 稍有改善者 17 例。该治疗方法优于下鼻甲部分切除术等常规方法, 疗效高, 操作简便, 深受病人欢迎。

(上海同济医科大学附属同济医院医用激光研究室 葛 新)