

注入控制铜蒸气激光方向性时间过程测量

张 勇 梁培辉 任 虹 雷建求 叶 韧

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 实验研究了注入控制对铜蒸气激光非稳腔输出光束质量的影响, 从输出光发散角时间分辨过程的测量结果说明注入光加速了被注入腔内激光发散角的减小过程。由于被注入腔内放大自发辐射的存在, 为得到较好的注入控制效果, 注入光的脉宽和进入被注入腔的延时必须恰当。

关键词 注入控制, 非稳腔, 发散角, 铜蒸气激光。

很多研究报道都说明注入控制技术能够提高脉宽在数十纳秒量级的短脉冲激光的方向性^[1, 2]。本文介绍用铜蒸气激光器研究的短脉冲激光注入控制实验结果。

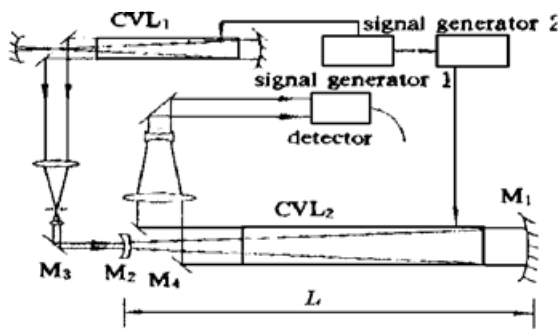


Fig. 1 Schematic diagram of the optical setup of the injection controlled copper vapor laser system

铜激光包含波长为 510.6 nm 的绿光和 578.2 nm 的黄光, 为使结果更准确, 实验中谐振腔镜均对黄光全透, 而在注入、输出光路上都加上透绿反黄镜, 以尽量消除黄光在系统中的影响。实验光路如图 1 示, 其中激光器均为纵向放电的铜蒸气激光器。

注入光由一放电管口径为 17 mm 的激光器 CVL₁ 产生, 其最大输出功率约 1 W。该激光器所采用的谐振腔取为平行平板腔(P-PR)和放大率 $M = 70$ 的非稳腔(UR)两种, 以产生两种方向性差别很大的注入光。注入光在进入被注入腔前先经过了滤波和缩束, 以滤去杂散光, 并使注入光口径与被注入腔相匹配。图 1 中 CVL₂ 是一口径为 34 mm、最大输出功率约 5 W 的铜激光器。实验中被注入腔的放大率取为 10 和 60 两种。被注入腔的后腔镜为对绿光全反射的, 曲率半径为 -5000 mm 的凹面镜。为使注入光能进入被注入腔, 前腔镜被设计成凹凸镜, 其凸面对绿光的反射率为 50%, 凹面对绿光全透。透镜的焦距为 -500 mm 和 -83 mm 两种, 分别对应于 $M = 10$ 和 60 的非稳腔, 这样注入光进入被注入腔后可与腔内的基横模沿相同的路径振荡。由于注入光经过多个透镜和反射镜的反射, 实际注入到被注入腔的功率将大大减小。图 1 中的信号发生器 1 直接控制激光器 CVL₁ 的放电过程, 同时通过输出触发信号到信号发生器 2, 使得激光器 CVL₂ 的放电时间稍后于激光器 CVL₁, 以使注入光进入被注入腔时激光器 CVL₂ 的增益介质处于反转状态, 从而注入控制得以实现。

以下实验结果中,除特别说明外,注入延时均处于最佳延时。输出光束发散角的测量采用套孔法,以总功率的 80% 处的发散角作为特征发散角。

被注入腔放大率分别取为 10 和 60,以发散角为 1.5 和 0.18 mrad 的光注入到被注入腔后,输出光的方向性列于表 1 中。由注入 1.5 mrad 光的结果看,输出光方向性比无注入情况均有所提高。而当注入光发散角为 0.18 mrad 时(约 2.5 倍衍射极限),输出光发散角均提高到 0.1 mrad 左右(2.7 倍衍射极限),在现有测量精度之内,被注入腔放大率 $M = 10$ 与 60 的区别不大。考虑到光束的口径由注入时的 17 mm 增加到输出时的 34 mm,理论上输出发散角应相应减半,即 0.09 mrad,说明此时的注入控制结果基本上由注入光决定。

Table 1. (unit: mrad)

| slave laser (CVL ₂) | UR ($M = 10$) | | UR ($M = 60$) | |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| master laser (CVL ₁) | P-PR | UR ($M = 70$) | P-PR | UR ($M = 70$) |
| injection | 1.5 | 0.18 | 1.5 | 0.18 |
| output (no inj) | 1.3 | 1.3 | 0.32 | 0.32 |
| output (with inj) | 0.56 | 0.1 | 0.15 | 0.1 |

为了进一步了解控制过程中方向性的演化过程,测量了输出光在不同发散角内光强的时间变化过程,即以一口径为 d 的小孔置于输出光经聚焦后的焦点上,测量透过光的强度 $I_a(t)$,再除以总光强 $I(t)$,得到相对于该小孔的透过率

$$T(t) = \frac{I_a(t)}{I(t)} \quad (1)$$

由此,即可由下式计算出发散角的时间分辨过程^[3]。

$$\theta(t) = \frac{d}{f \sqrt{-\ln[1 - T(t)]}} \quad (2)$$

式中 f 为对输出光束聚焦的透镜的焦距, d 为焦点上小孔的直径。(2) 式要求光束远场呈高斯型分布,这在一般情况下是可以满足的。当小孔口径过大时, $T(t) \cong 1$, 测量结果将粗略到不足以反映发散角的时间分辨过程; 而若过小, 测量结果只能反映极低发散角内的情况, 且小孔位置调整困难, 易造成很大误差。实验中所用的小孔口径为 1.02 mm。图 2 给出 $M = 10$ 的被注入腔在无注入及注入光发散角分别为 1.5 和 0.18 mrad 时输出光发散角的时间变化过程, 无注入时的聚焦透镜焦距 $f = 3$ m, 有注入时 $f = 10$ m。

无注入时输出光由放大自发辐射的不断振荡放大产生,在激光形成之初光的发散角很大; 由于非稳腔的作用,激光在腔内每经过一程渡越,发散角都有一定程度的下降。注入控制情况下,注入光发散角远小于被注入腔内的放大自发辐射,故被注入腔内激光方向性的演化从一比较高的起点开始,输出光方向性也将大为提高。图 2 中曲线 2 比较明显地显示了这一过程。注入光方向性约为 1.5 mrad。注入控制后输出光发散角自 0.85 mrad 开始,每经过一程渡越,发散角都有一定程度下降。当注入光方向性很好时,因受注入光发散角的限制,输出光发散角不再因被注入腔的作用而减小,如图中曲线 3 示。由于腔内存在着放大自发辐射,发散角在达到一最小值后又开始缓慢上升。

注入光进入被注入腔的时间对注入控制的效果有着重要影响。用 $M = 60$ 的被注入腔测量了不同延时下输出光发散角的演化过程,如图 3 示。与图 2 中曲线 3 一样,在最佳延时下,输出光发散角(曲线 1)到达一定值后即开始缓慢上升,表明腔内由自发辐射振荡产生的噪声光(放大自发辐射)比注入放大光增长更快。噪声光的快速增长可以归结为以下几点原因: 1)

被注入腔的调节依无注入时输出功率最大为准,注入光在空间上与注入腔不可能百分之百地耦合,故注入光的生长相比于放大自发辐射受到较大限制;2)腔内放大自发辐射除与注入光一样因受激辐射而放大外,激发态铜原子极强的自发辐射使之获得更多的能量来源;3)注入放大光有增益饱和,而噪声光没有。这一点起着比较主要的作用,这在本文作者以前从功率角度的数值模拟和实验中已有所说明^[4]。

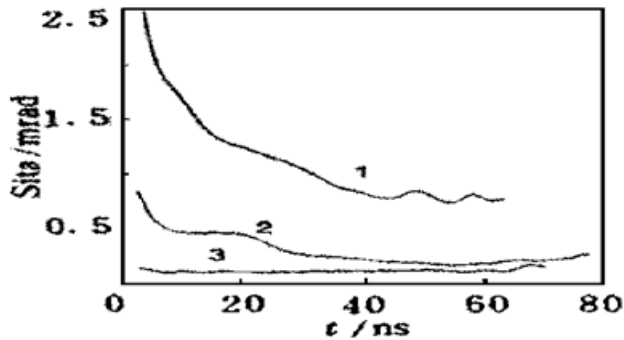


Fig. 2 The temporal evolution of output beam divergence. (1) without injection; (2) with injection, $\theta_m = 1.5$ mrad; (3) with injection, $\theta_m = 0.18$ mrad

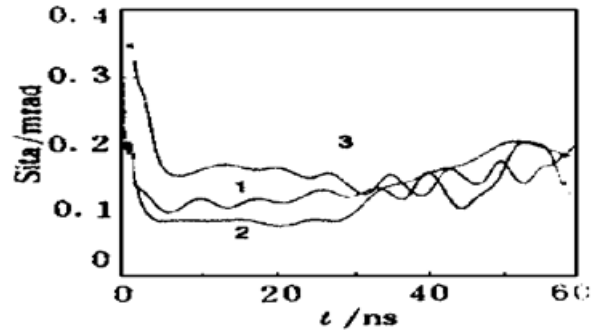


Fig. 3 The temporal evolution of output beam divergence. (1) at optimal delay, relative delay $t_d = 0$ ns; (2) at shortage delay, $t_d = -14$ ns; (3) at excessive delay, $t_d = 26$ ns

当注入光进入被注入腔过早时(称之为欠延时),输出结果如图3中曲线2所示。此时被注入腔内自发辐射很小,输出光发散角很快达到比最佳延时更小的值,之后由于注入光消失,噪声光得以更快发展,发散角上升比最佳延时下的要快,由此说明注入光脉宽不可过短;而当注入光进入过晚(称之为过延时),被注入腔由自激振荡已产生一定强度的光,其发散角很大,在注入光的作用下,发散角立即减小,但仍大于最佳延时下的发散角。由于自激振荡光随渡越次数的增加发散角减小,总输出光的发散角呈逐渐减小的趋势。

图3中各曲线均有些起伏,其周期等于光在被注入腔内单程渡越的时间,这是由注入放大光和放大自发辐射在腔内分别放大输出造成的。上述实验结果表明,短脉冲的非稳腔输出光方向性都要经历一个由差变好的过程,注入控制中,由于注入光的引入,这一过程被加速了,从而大大提高了输出光束的质量。当注入光方向性接近于衍射极限时,输出光方向性主要由注入光方向性决定。但因被注入腔内始终存在放大自发辐射,注入控制输出光的光束质量总逊于注入光,这一点在注入延时不当时表现得更加明显。

参 考 文 献

- [1] J. Goldhar, W. R. Rapoport, J. R. Murray, An injection-locked unstable resonator rare-gas halide discharge laser of narrow linewidth and high spatial quality. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **16**(2) : 235~241
- [2] 梁培辉, 任虹, 沈琪敏等, 注入锁定铜蒸气激光器的实验研究. *光学学报*, 1987, **7**(9) : 783~787
- [3] Lei Jianqiu, Liang Peihui, Shen Qimin, Using an aperture to measure the divergence evolution of injection-locked copper vapor laser pulse. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(15) : 483~487
- [4] 张勇, 梁培辉, 雷建求等, 注入锁定铜蒸气激光器中自发辐射的影响. *中国激光*, 1997, **24**(9) : 769~773

Time Resolved Beam-Quality of Copper Vapor Laser with Injection Controlling

Zhang Yong Liang Peihui Ren Hong Lei Jianqiu Ye Ren

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 12 February 1997; revised 13 May 1997)

Abstract The beam-quality of an unstable resonator copper vapor laser with injection controlling has been studied experimently. Measurement results of the time resolved beam divergence shows that the injected signal accelerates the improvement course of unstable resonator output. Because of the exist of amplified spontaneous emission, when the injected beam is near the diffraction limit, the pulse width of the injected laser and delay time must be appropriate for obtaining ideal output performance.

Key words injection controlling, unstable resonator, divergent angle, copper vapor laser.