

注入锁定铜蒸气激光器输出光脉冲方向性的时间演化过程

雷建求 梁培辉 沈琪敏 叶 韧 华仁忠

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 介绍一种采用小孔光阑穿透来测量激光脉冲方向性的时间演化过程方法, 并对放大倍率为 $M = 10$ (振荡器 $M = 30$) 的注入锁定铜激光器输出光脉冲方向性时间分辨过程进行了测量。结果表明: 在激光脉冲的形成过程中, 输出光方向性越来越好, 相应发散角由 ~ 1.0 mrad 连续地减小到 0.12 mrad。最后对实验结果进行了讨论。

关键词 激光脉冲, 发散角, 时间分辨, 铜蒸气激光器, 注入锁定

1 引言

激光方向性作为激光技术中一个重要物理参量, 它同激光功率一样, 对激光特性及其应用等起着决定性作用。铜蒸气激光器凭借其高增益、高重复频率及短脉冲输出等特性得到广泛的应用, 如光刻、倍频以及染料泵浦。在这些实际应用中, 激光方向性的好坏将直接影响到倍频效率、染料泵浦效率及光刻条纹精细度等。因此, 如何在提高输出激光功率的同时来改善其方向性是十分重要的。

对铜蒸气激光器而言, 激光发散角是指多次脉冲在时间上综合平均的结果。实际上对应脉冲上各个不同时刻, 发散角并不完全相同, 这就是所谓的脉冲方向性的时间分辨过程。通常测量激光束发散角的方法很多, 如套孔法、刀口移动法、星点法等, 然而它们都不能反映出脉冲方向性时间分辨过程。基于此, T. Omatsu^[1] 和 R. S. Hargrove^[2] 等人分别采用染料(DASBTI)对激光的饱和吸收法及条纹相机对激光脉冲发散角时间分辨进行了测量, 前者对染料流速、浓度及装置稳定性要求甚严, 因此实验结果难以满意, 后者仪器昂贵且测量范围较窄。本文介绍一种采用“小孔光阑穿透法”来测量脉冲方向性的时间分辨过程, 运用这种方法对注入锁定铜蒸气激光器输出光脉冲方向性的时间分辨过程进行了测量, 并对实验结果加以分析和讨论。

2 测量原理

激光光束发散角通常通过对远场图形即聚焦焦斑大小来测量, 若焦距为 f , 焦斑直径为 d ,

则发散角 $\theta = d/f$ 。但聚焦焦斑处强度分布并不均匀,由文献[3]可知,在激光方向性较好的前提下,可近似为高斯型分布:

$$I(r, t) = I_0(t) \exp\{-4r^2/[f\theta(t)]^2\} \quad (r \text{ 为离焦斑中心距离})$$

对于铜蒸气激光器输出光脉冲而言,其波形上各个时刻对应不同发散角,因此在聚焦焦斑处有着相异横向尺寸,置一固定孔径(D)小孔光阑于焦斑处,则任意时刻光强透过率与光脉冲处于该时刻发散角 $\theta(t)$ 存在一一对应的函数关系: $\theta(t) \sim F[T(t)]$ 。激光束聚焦焦斑直径 d 可由聚焦透镜焦距 f 及光束发散角 θ 来表示: $d = f \cdot \theta$ 。在高斯函数近似焦斑光强分布条件下,焦斑能量 $P(t)$ 与焦斑光强分布 $I(r, t)$ 关系为

$$P(t) = \int \int_s I(r, t) \cdot ds$$

各时刻通过小孔前后焦斑处光能量 $P_{in}(t)$ 、 $P_{out}(t)$ 分别为

$$P_{in}(t) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} I_0(t) \exp\{-4r^2/[f\theta(t)]^2\} r dr \cdot d\theta \quad (1)$$

$$P_{out}(t) = \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} I_0(t) \exp\{-4r^2/[f\theta(t)]^2\} r dr \cdot d\theta \quad (2)$$

则相应该时刻小孔透过率 $T(t)$

$$T(t) = \frac{P_{out}(t)}{P_{in}(t)} \quad (3)$$

合并(1)、(2)、(3)式得

$$T(t) = 1 - \exp\{-[D/f\theta(t)]^2\}$$

即光脉冲上各时刻对应的发散角与该时刻小孔透过率关系为

$$\theta(t) = \frac{D}{f \sqrt{-\ln[1 - T(t)]}} \quad (4)$$

当小孔光阑孔径较小[亦即 $D \ll f\theta(t)$]时,(4)式简化为

$$\theta(t) = \frac{D}{f \cdot \sqrt{T(t)}} \quad (5)$$

不难看出,式(5)恰好是焦斑光强在近似于均匀分布情况下光脉冲上各时刻对应的发散角与该时刻小孔透过率的关系表达式。若 $D > f\theta(t)$,则 $T = 1$,测量失去意义, $\theta(t)$ 无法确定。因此,测量必须选择适当小的孔径 D ,用公式(4)进行数据处理。

3 实验装置

实验装置如图1所示。铜蒸气激光器为重复频率6 kHz自加热式器件,放电管内径(B)为26 mm,电极间距离为890 mm,采用国产4050 A型闸流管放电,充3.99~6.65 kPa氩气作为缓冲气体。 CVL_1 和 CVL_2 分别为倍率 $M_1 = 30$ ($R_1 = 5000$ mm, $R_2 = -167$ mm), $M_2 = 10$ ($R_1' = 5000$ mm, $R_2' = -500$ mm)的望远镜式正支共焦非稳腔,用中心有 $\phi 6$ mm小孔的全反镜作为输出耦合镜, CVL_2 所需振荡光通过与主光路成 45° 的全反镜 M_1 及放大倍率为 $1/8$ 的缩孔望远镜 Teles. 1(由 L_1 和 L_2 组成)注入。两器件间的同步由脉冲驱动器调节。输出光经放大倍率为 $3/5$ 的缩孔望远镜 Teles. 2(由 L_3 和 L_4 组成)后进入测量系统。透镜 $L_5/L_6/L_7$ 的焦距分别为5 m/0.1 m/3 m。聚焦透镜 L_5 焦斑处小孔光阑上二小孔孔径分别为1.6 mm及0.6 mm。通过

Boxcar4400 来记录并计算处理快速响应光电二极管所探测的光脉冲波形(通过示波器监视), 示波器及 Boxcar 均采用外触发方式。

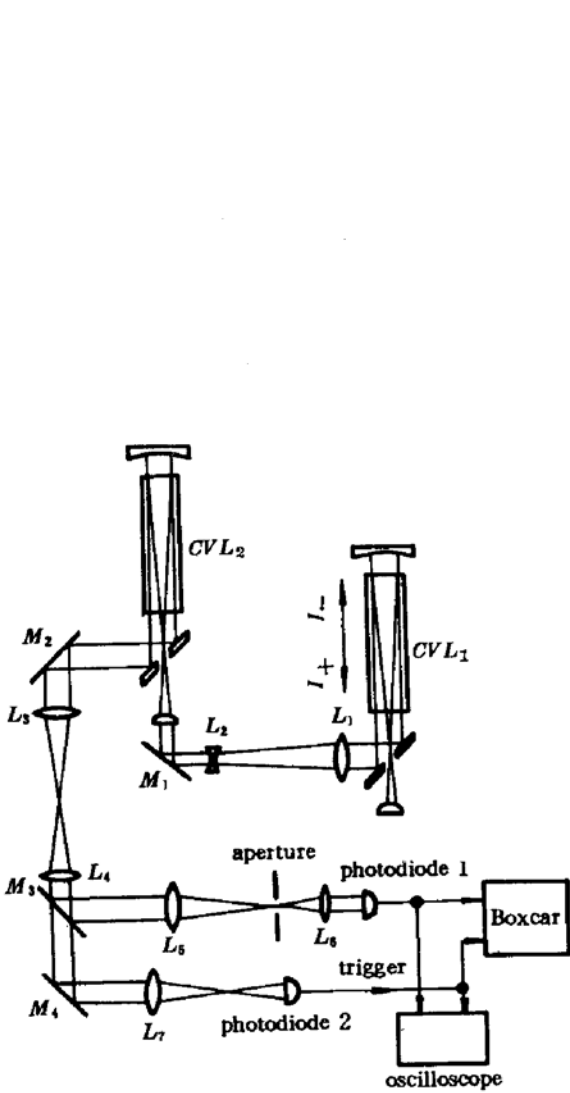


Fig. 1 Experimental arrangement for time-resolved measurement of beam divergence of the injection locking CVL by aperture method

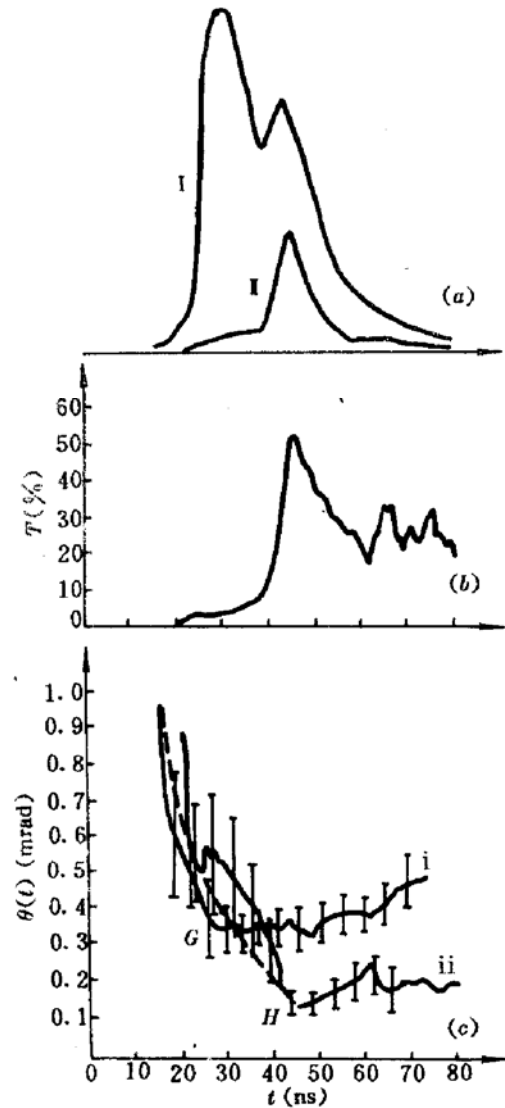


Fig. 2

(a) The temporal evolution of the pulse without passing the aperture (I) and the pulse passing the aperture $\phi 0.6 \text{ mm}$ (II); (b) The temporal evolution of the transmissivity (for $\phi 0.6 \text{ mm}$); (c) The experimental temporal evolution of the beam divergence. [measured by two different apertures, $\phi 1.6 \text{ mm}$ (i), $\phi 0.6 \text{ mm}$ (ii)]

4 实验结果与讨论

固定两台铜蒸气激光器输入电功率, 调节两脉冲驱动器间相对延时至 CVL_2 输出光方向性最佳, 此时延时相差 220 ns , “套孔法”测得其焦斑能量 80% 处对应光束发散角 0.17 mrad , Boxcar 记录脉冲信号波形如图 2(a) 所示, I、II 分别为放置小孔光阑 ($\phi 0.6 \text{ mm}$) 前后经 Boxcar 光滑平均 100 次后脉冲强度的时间波形, 且光波形 I 具有三尖峰结构。图 2 中曲线 (b) 由式 $T(t) = II_{I(t)}/I_{I(t)}$ 计算得到, 可见它是一条随时间逐渐增大的曲线, 反映出光脉冲经小孔光阑后透过率的瞬态变化: 脉冲后部透过率较其前部透过率高。实验中, 分别采用两种不同孔

径(1.6 mm/0.6 mm)的小孔光阑对 CVL_2 输出光脉冲方向性时间分辨过程进行了测量。结果如图 2(c) 所示,它表明:随着激光脉冲的建立,输出光方向性越来越好,相应发散角由 ~ 1.0 mrad 连续地减小到 0.12 mrad,且脉冲波形上三尖峰对应处发散角分别为: ~ 0.6 mrad, ~ 0.3 mrad, ~ 0.12 mrad,同时(c)中每条曲线均有一个转折点(相应曲线 G,H 两点),其对应发散角 $\theta(t) - D/f$ 反应了小孔所能测量出的最小光束发散角,亦即脉冲光波形上相应时刻发散角,这样,如果采用 n 个不同孔径小孔光阑来测量,则有 n 个转折点,对应光脉冲上 n 个不同时刻,光滑连接 n 个点,该连线近似反映脉冲光波形发散角时间分辨过程。显然,实验点愈多,精确度愈高。实际上,只要小孔孔径选取得当,采用一个小孔便可得出近似结果,图 2(c) 表明,在误差范围内,实验曲线 ii 与曲线 i 的变化趋势一致。

激光器的注入锁定过程极其复杂^[5],但从其脉冲建立过程来看,我们将它分为两部分:由自发辐射开始起振 CVL_1 以及由注入光开始起振 CVL_2 。激光器输出光脉冲由每往返一次光迭加而成,当激活介质增益较高时,输出光脉冲呈现出多尖峰结构且相邻尖峰的间距正好是光在腔内往返一次所花的时间 $2L/c$ (~ 15 ns)。本质上,注入锁定激光器与单台激光器独立振荡类同,只不过起振光为注入激光。

由于 CVL 放电管口径较大,腔的菲涅尔数远大于 1,腔内衍射效应忽略,因此可以通过腔内几何光学成像理论来分析输出光方向性^[6]。如图 1 所示,设 I_+ 、 I_- 为腔内相向传播两自发辐射光,则 I_- 在腔内一个来回后发散角可由下式求得:

$$\theta_1^- = B/(2L - L^2/f_1)$$

D 为放电管直径, L 为腔长,光在非稳腔内每来回一次发散角改善 M 倍。这样光在腔内来回 n 次后发散角变为:

$$\theta_n^- = B/M^{n-1}(2L - L^2/f_1)$$

设光在腔内往返 n 次达衍射极限 θ_n^- ($2.44\lambda/B$),则由上式得出 $n = 2.58$ ($M = 30, L = 2.4$ m, $B = 26$ mm, $\lambda = 510.6$ nm),即光在腔内往返不到三次便可达到衍射极限,我们可以理解腔内激光脉冲形成过程为发散角由自发辐射开始向衍射极限过渡的过程。

同理, I_+ 在腔内往返 n 次后发散角由式 $\theta_n^+ = B/(M^n L)$ 决定,由于自发辐射光方向性差且单程功率放大较小, I_+ 经凸透镜反射后损耗很大,因此在腔内竞争处于劣势,难以形成输出峰,只有当增益继续升高时,尖峰方能出现,且处于离 I_- 输出尖峰 L/c 处,强度较小。由于实验中器件增益系数的限制,此峰并不明显。

假定 CVL_1 输出光发散角为 θ_0 ,则经缩孔望远镜 Teles. 1 缩束后注入光在 CVL_2 内 n 个来回后发散角变为

$$\theta_n = \theta_0/M_2^{n-1}(2 - L/f_1) \quad (6)$$

显然只有发散张角小于 B/L (11.6 mrad) 时光才能在 CVL_2 腔内形成一个往返,相应的 $\theta_0 = B/(8L) = 1.45$ mrad,这样 CVL_1 输出光脉冲上发散张角大于 1.45 mrad 的光经 CVL_2 后绝大部分损耗掉,同时由于延时的调节,此部分光并无放大效果,因此 CVL_2 输出光脉冲波形起始峰强度很弱,且其发散角已被压缩(~ 1 mrad)。

从注入锁定激光器光脉冲的建立过程来看,其输出光脉冲光波形上的第二峰系由注入光第一峰在 CVL_2 腔中第二个往返与第二峰在 CVL_2 中第一个往返输出光迭加而成,同样第三峰为注入光脉冲上第一峰在 CVL_2 中第三次往返、第二峰在 CVL_2 中第二次往返及第三峰在 CVL_2 中第一次往返输出光迭加而成。因此,注入锁定激光器输出光各峰对应发散角的改善并非 M

倍, 这点与谐振腔独立振荡时有所区别。

调节延时旋钮直至 CVL_2 输出激光最强, 此时两激光器间相对延时相差 232 ns, 这与输出光方向性最佳时比较, 过延时 12 ns 左右(近似于光在腔内一个来回时间), 且输出光功率下降较小。与通常采用高倍率自滤波非稳腔结构相比较, 本质上都是将脉冲波形上方向性较差的前部分滤去, 但是后者以大幅度增加腔内损耗, 牺牲输出光功率为前提, 而注入锁定靠延时调节使得注入光脉冲上方向性较差的前部(包括 ASE)欠延时, 在腔内难以得到放大, 方向性较好的后部在腔内起振, 从而输出光方向性得到大大改善, 同时激光输出功率下降很少且脉宽加宽。

通过对实验结果的分析, 即使接近衍射极限的光注入至 CVL_2 , 其输出光发散角也未必达到衍射极限, 同时从图 2(c) 看出转折点后段曲线波动较大, 除了实验误差外, 主要与腔内光学非均匀性、热透镜效应、ASE 抑制不完全以及光路上散射, 特别是与激光管两窗口沾污的散射等原因有关, 另外, 机械振动也是一个不可忽视的因素。

本实验结果及测量方法对高增益激光器(如准分子激光器及其它金属蒸气激光器等)特性研究具有较重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 T. Omatsu *et al.*. *Opt. Commun.*, 1991, 85(4): 343
- 2 R. S. Hargrove *et al.*. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, QE-15: 1228
- 3 梁培辉等. 中国激光专集, 1990, 17: 50
- 4 O. I. Buzhinskii *et al.*. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1980, 10(12): 1548
- 5 A. E. Siegman. *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, CA, 1986
- 6 A. A. Isaev *et al.*. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1980, 10(3): 336

Investigation of the Evolution of the Beam Divergence of Output Pulse from Injection Locking Copper Vapor Laser

Lei Jianqiu Liang Peihui Shen Qimin Ye Ren Hua Renzhong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract In this paper, a method of time-resolved divergence measurement using an aperture is reported. With this method, we measured the evolution of the beam divergence of output pulse from an injection locking copper vapor laser (CVL) of magnification $M = 10$ ($M = 30$ for oscillator). The experimental results show that the beam divergence becomes smaller and smaller reducing from ~ 1.0 mrad to 0.12 mrad. The experimental results are analysed.

Keywords laser pulse, divergence, time-resolved, copper vapor laser, injection locking