

自滤波振荡行波放大的铜激光系统*

任 虹 梁培辉 叶 韧 沈琪敏 雷建求

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 采用自滤波振荡, 腔内起偏, 行波放大的铜激光系统, 获得了发散角接近衍射极限, 偏振度为 97%, 绿光输出功率为 8.8 W 的铜激光, 并与非稳腔振荡行波放大的铜激光系统进行了比较。

关键词 铜激光, 自滤波, 振荡放大

1 引 言

高重复率、高平均功率、输出为黄绿双色的铜蒸气激光(简称 CVL), 其应用价值已越来越被人们认识, 现已用于激光分离同位素、激光倍频、激光加工及激光医学等项目。由于增加在衍射极限发散角内的激光功率是提高应用效率的关键, 因此高光束质量、高平均功率的 CVL 成为共同追求的目标, 尤其在铜激光倍频、激光微细加工等方面。以前人们通常采用非稳腔改善输出光的方向性, 然而在光束发散角达到几倍衍射极限以后, 即使采用更高放大倍率的非稳腔, 光束质量的改善也极其有限, 而输出光功率则大幅下降^[1]。为了获得接近衍射极限发散角的铜激光, 1989 年 R. Bhatnagar 等人首先将自滤波非稳腔(简称 SFUR)应用于 CVL^[2], 以后带有 SFUR 的 CVL 以及带 SFUR 的振荡放大系统受到了人们的广泛关注^[3~5]。本文采用 SFUR 作振荡器, 并在腔内插入起偏器, 在获得发散角为 2.5 倍衍射极限的偏振激光的基础上, 采用行波放大, 获得了高光束质量、高平均功率的偏振铜激光, 为高效铜激光倍频、激光微细加工等应用项目提供了优质光源。

2 自滤波非稳腔振荡器

为了获得接近衍射极限发散角的铜激光, 振荡器选用自滤波非稳腔(简称 SFUR), 其结构是在放大倍率 $M = 70$ 的负支非稳腔(简称 NBUR)的基础上, 将直径为 0.22 mm 的滤波小孔 FA_1 插入在紧靠后腔镜的位置上, 前后腔镜均为凹面镜, 曲率半径分别为 3500 mm 及 50 mm, 腔长为 1.7 m。实验装置如图 1 所示。由文献[1]可知, 上述 SFUR 的各参数是根据以下两条原则设计的: 1) 光束在腔内往返一次就能输出发散角接近衍射极限的激光; 2) 让光束尽可能充满整个激活区(即激光管的管径)。

* 国家自然科学基金项目。

收稿日期: 1994 年 7 月 6 日; 收到修改稿日期: 1994 年 10 月 14 日

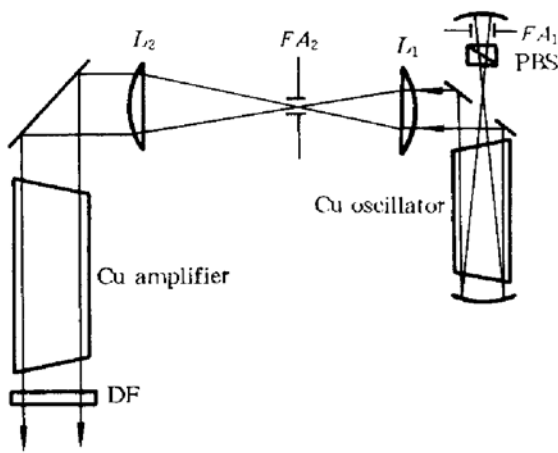


Fig. 1 Experimental setup

PBS, polarizing beam splitter; FA, filtering aperture; DF, dichromatic filter which transmits at 510.6 nm and reflects at 578.2 nm. A 2 : 3 telescope is composed of lens L_1 and lens L_2

CVL 振荡器的放电管内径及电极间距为 $\phi 20 \times 580$ mm, 重复频率为 6 kHz。采用“套孔法”测量光束方向性, 并定义光束发散角为包含输出光总功率 80% 所对应的全角发散角。在文献[2]及[3]中, 发散角以光强半高宽(FWHM)作为标准, 在光强为高斯分布时, 其光束发散角为包含输出光总功率 51% 所对应的全角发散角。本文所指的衍射极限发散角(DL)为全角, $\theta = 2.44(\lambda/D)$, $\lambda = 510.6$ (nm)。

为了将 SFUR 与 NBUR 的输出光特性进行比较, 在相同实验条件下, 分别测量了 $M = 70$ 及 $M = 140$ 的 NBUR 的输出光功率及发散角, 并测量了滤波孔径 $d = 0.22$ mm, $M = 70$ 的 SFUR 的输出光功率及方向性, 实验结果如表 1 所示。

Table 1 Comparison of the oscillators with SFUR and NBUR

	$d = 0.22$ mm, $M = 70$, SFUR	$M = 70$, NBUR	$M = 140$, NBUR
Divergence (mrad)	0.16	0.21	0.20
Divergence (TDL)	2.5	3.3	3.2
Laser power (< 0.5 mrad)(W)	1.3	1.8	1.1
Laser power (< 20 mrad)(W)	2.4	2.9	2.5

Note: TDL; time of diffraction limit.

由表 1 可知: 1) 无论是采用 NBUR 还是 SFUR, 输出光均由两部分组成——放大的自发辐射和经过谐振腔振荡的激光, 前者的发散角在 $0 \sim 20$ mrad 范围内, 而后的发散角在 $0 \sim 0.5$ mrad 范围内, 含输出光总功率 80% 所对应的全角发散角为 0.16 mrad (约 2.5 倍衍射极限); 2) 当采用 NBUR 时, 输出光发散角达到几倍衍射极限以后再提高非稳腔的放大倍率, 光束质量改善极其有限, 而输出光功率则显著下降, 将 $M = 70$ 的 NBUR 与 $M = 140$ 的 NBUR 相比, 后者的发散角仅比前者减小了 5%, 而激光功率则下降了 39%, 然而采用 $M = 70$ 的 SFUR, 其发散角比采用相同放大倍率的 NBUR 减小了 24%, 为 2.5 倍衍射极限, 其输出光功率比采用相同放大倍率的 NBUR 下降了 33%, 但比 $M = 140$ 的 NBUR 的输出光功率提高了 15%, 达到 1.3 W。这表明采用 SFUR 获得了高放大倍率的 NBUR 所达不到的效果。因此要获得接近衍射极限发散角的铜激光, 采用 SFUR 是一种较为理想的方案。

为了获得偏振光输出, 在 45° 斜孔板及滤波小孔 FA_1 之间插入一块洛匈棱镜 PBS 作为起偏器, 采用这种 SFUR, 从振荡器中获得了发散角在 0.5 mrad 以下 0.8 W 的铜激光, 黄绿光功率之比约 1 : 4, 激光偏振度为 99%。当移去洛匈棱镜后, 偏振度降到 10%, 激光功率则提高到 1.3 W。

3 铜激光振荡放大系统

铜激光放大器的放电管内径及电极间距为 $\phi 30 \times 890$ mm。调节振荡器与放大器之间的触

发延时,使放大器与振荡器同步,即行波放大后获得最大的激光功率。为了使振荡器与放大器的光束口径匹配,采用由两块焦距分别为 2 m 及 3 m 的透镜 L_1, L_2 组成扩束望远镜,并在扩束望远镜的焦点处放置滤波小孔 FA_2 ,形成空间滤波器,如图 1 所示。 FA_2 的直径取 0.8 mm,这样就滤除了发散角在 0.4 mrad 以上的超辐射。

在同步情况下,分别测量了 SFUR 振荡放大系统与 NBUR 振荡放大系统的输出特性,并在相同实验条件下,测量了放大器用作稳腔振荡时的输出光功率,此稳腔是由一块曲率半径为 5 m 的凹面全反镜与一块平板玻璃组成。实验数据列于表 2,表 2 中 P_{in} 为放大器的输入功率, P_{in_g} 为放大器的绿光输入功率, P_{out} 为放大器的输出功率, P_{out_g} 为放大器的绿光输出功率, θ 为放大器输出光的发散角, P 为放大器输出光的偏振度, P_o 为放大器作为振荡器时的输出光功率, P_{og} 为放大器作为振荡器时的输出绿光功率, η_g 为绿光的放大效率。两种振放系统中放大器的输出光方向性如图 2 所示。

Table 2 Comparison of two oscillator-amplifier systems with SFUR and NBUR

	Oscillator-amplifier system with SFUR	Oscillator-amplifier system with NBUR
P_{in} (W)	0.65	0.71
P_{in_g} (W)	0.51	0.57
P_{out} (W)	8.8	9.7
P_{out_g} (W)	6.7	7.4
θ (mrad)	0.19	0.22
(TDL)	4.6	5.3
p	97%	97%
P_o (W)	9.2	10.3
P_{og} (W)	5.9	7.0
$\eta_g = P_{out_g}/P_{og}$	114%	106%

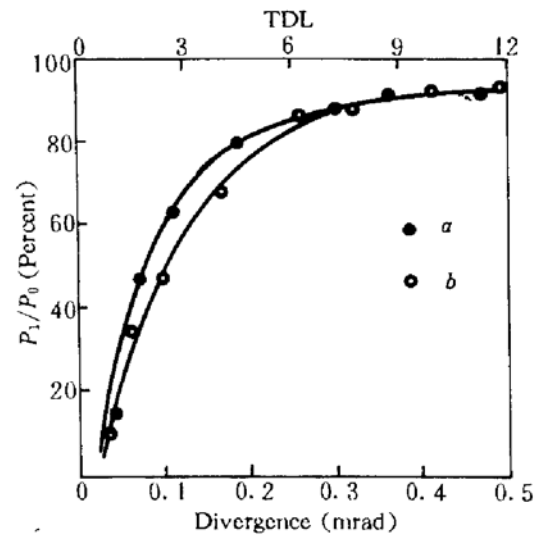


Fig. 2 Ratio of P_1 to P_0 versus divergence, where P_1 is the power transmitted through apertures of various sizes and P_0 is the total power. TDL: times of diffraction limit

a: oscillator-amplifier system with SFUR

b: oscillator-amplifier system with NBUR

由表 2 及图 2 可知: 1) 输入光中黄绿光之比接近 1:4; 2) 放大器输出的绿光功率高于放大器作为振荡器时输出的绿光功率,这表明:在我们的实验条件下,当输入光中绿光功率大于某一值(0.5 W)后,放大器中绿光达到了饱和放大,两种振放系统中绿光的放大效率分别为 114% 和 106%,而黄光的放大效率则小于 100%,这说明输入光中黄光功率太弱,还不能充分提取放大器中的黄光功率; 3) SFUR 振放系统中输出光的发散角为 0.19 mrad(约 4.6 倍衍射极限*),而 NBUR 振放系统中输出光的发散角为 0.22 mrad(约 5.3 倍衍射极限)。行波放大后光束发散角变大的原因除了黄光未达到饱和放大外,另一个重要的原因将在下面的段落中予以阐述; 4) 两种振放系统输出光的偏振度都为 97%。

为了了解空间滤波小孔 FA_2 在 SFUR 振放系统中的作用,在相同实验条件下,比较了

* * 若以光强半高宽为标准,即含输出光总功率 51% 所对应的全角发散角为 1.9 倍衍射极限。

有或无滤波小孔 FA_2 对放大器输出光功率及光束发散角的影响,实验结果列于表 3。由表 3 可知当有空间滤波小孔 FA_2 时,经行波放大后在 0.5 mrad 以下的输出光功率占总输出光功率的 92%,而无空间滤波小孔时,在 0.5 mrad 以下的输出光功率仅占总输出功率的 66%。表明在无空间滤波小孔时,放大器输出光束的方向性明显变差,这是由于振荡器输出光中放大的自发辐射超前于激光进入放大器而被放大,消耗了部分反转粒子数,以致放大器中提取的接近衍射极限的激光功率减少。因此,滤波小孔 FA_2 的选取可遵循以下两条原则:1) 滤波后,激光功率能使放大器基本达到饱和放大;2) 在放大器达到饱和放大的前提下,尽可能缩小滤波小孔的直径。

Table 3 Comparison of two oscillator-amplifier systems with FA_2 and without FA_2

	Input power (W)	Output power ($<0.5 \text{ mrad}$)(W)	Output power ($<20 \text{ mrad}$)(W)
Oscillator-amplifier system with FA_2	0.41	5.8	6.3
Oscillator-amplifier system without FA_2	0.66	4.4	6.7

为了了解输出光的时空特性,采用两个光电二极管分别接收振荡器与放大器的脉冲激光信号,并将两者的电信号输入 300 MHz 示波器的 1,2 通道,并由 1 通道触发 2 通道。在放大器与振荡器处于同步的情况下,拍摄了振荡器与放大器的输出光脉冲波形,如图 3 (a),(b) 所示。

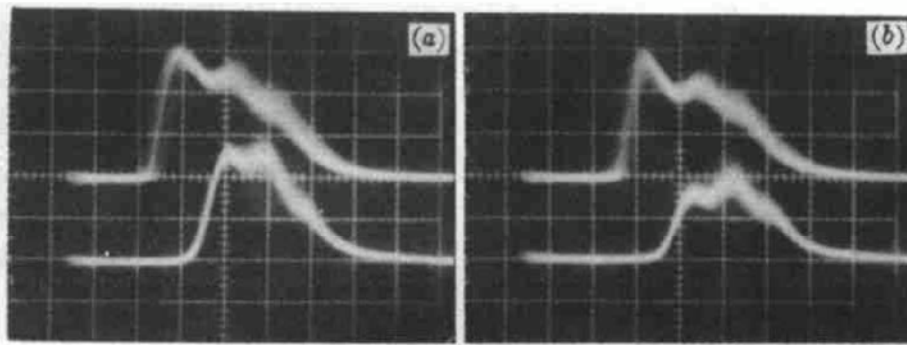


Fig. 3 Laser pulse shapes of an oscillator and an amplifier

(a) oscillator with SFUR (below) and amplifier (above); (b) oscillator with NBUR (below) and amplifier (above)

(a) 为采用 SFUR 的振荡器的光波形与行波放大后的激光波形, (b) 为采用 NBUR 的振荡器的光波形与行波放大后的激光波形。图 3(a),(b) 中下方为振荡器的激光波形,上方为放大后的激光波形。由图 3(a),(b) 可知:1) 采用 SFUR 的振荡器的输出光脉宽为 20 ns 小于采用 NBUR 的振荡器的输出光脉宽 24 ns 。而它们所对应的放大器的激光脉宽几乎相等为 25 ns ;2) 放大器的激光波形相对于振荡器的激光波形有 $\pm 3 \text{ ns}$ 的抖动,这是由于振荡器与放大器放电电路中闸流管导通的随机性引起,有关这方面的研究在文献[6]中已有详细的描述;3) 无论是采用 SFUR 还是 NBUR,振荡器输出光脉冲为双峰结构,两峰之间的时间间隔为 10 ns ,正好为光在腔内来回一次所需的时间,这与我们以前研究的结果相符^[7]。在同步条件下,放大器输出光脉冲波形也为双峰结构,第一个峰的放大倍率明显高于第二个峰,而且第一个峰的上升速率比振荡器的第一个峰的上升速率大,这引起了两个峰的时间间隔加大至 14 ns 。由此我们可以找到放大器输出光方向性较输入光方向性差的另一个原因:由我们以前的研究结果表明^[8]振荡

器输出光脉冲中第一个峰为光在腔内第一程往返输出的激光,其光束质量较第二个峰(即在腔内第二程往返输出的激光)差,而放大器又对输入光的前沿有较高的放大倍率,因此行波放大后输出光的发散角必然大于输入光的发散角。

4 结 论

1) 要获得接近衍射极限发散角的铜激光,采用 SFUR 是一种较为理想的方案,它能达到采用高放大倍率的 NBUR 所达不到的效果。

2) 采用 SFUR 振荡行波放大的铜激光系统,我们获得了高光束质量(发散角接近衍射极限),高平均功率(8.8 W),高偏振度(97%)的铜激光。

3) 采用 SFUR 的 CVL 振荡器有较强的放大的自发辐射,在振荡器与放大器之间的空间滤波器起了保证放大器输出光束质量的重要作用。

4) 在放大器与振荡器同步的条件下,由于放大器对振荡器输出光脉冲的前沿有较高的放大倍率,因此放大器输出光的方向性比振荡器输出的光方向性稍差。

参 考 文 献

- 1 任 虹,梁培辉,叶 韧等. 自滤波铜蒸气激光器的研究. 光学学报, 1994, 14(10): 1018
- 2 R. Bhatnagar, S. K. Dixit, B. Singh *et al.*. Performance of a copper vapor laser with self filtered unstable resonator. *Opt. Commun.*, 1989, 74: 93
- 3 S. K. Dixit, J. K. Mittal, B. Singh *et al.*. A generalized diffraction filtered resonator with a copper vapor laser. *Opt. Commun.*, 1993, 98: 91
- 4 Michael Nikonchuk, Ruslan Okunev, Igor Polyakov. Copper vapor laser with self-filtering unstable resonator. *SPIE*, 1990, 1225: 419
- 5 Daniel J. W. Brown, David W. Coutts. Efficient high beam quality copper vapor laser MOPA system with miniature master oscillator. in Conference of Lasers and Electro-Optics, 8, OSA Technical Digest series, 1994, Paper CFD2
- 6 任 虹,梁培辉. 铜蒸气激光链中激光脉冲抖动分析. 中国激光, 1992, 19(10): 735
- 7 任 虹,梁培辉,沈琪敏等. 腔长对铜蒸气激光输出特性的影响. 中国激光, 1989, 16(3): 164
- 8 梁培辉,任 虹,陈徐宗等. 铜蒸气激光振荡器与放大器输出光束的远场分布. 中国激光(激光器专集), 1990, 17: 53

A Cu Laser Oscillator-amplifier System with SFUR

Ren Hong Liang Peihui Ye Ren Shen Qimin Lei Jianqiu

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

Abstract Adopting an oscillator-amplifier copper vapor laser system with a self-filtering unstable resonator, we obtained laser output of 8.8 W at 510.6 nm with near diffraction-limited divergence and polarization degree of 97%. Meantime, we compared two oscillator-amplifier systems containing a self-filtering unstable resonator and a negative branch unstable resonator, respectively.

Key words Cu laser, self-filtering unstable resonator, oscillator-amplifier system