

# 自滤波铜蒸气激光器的研究

任虹 梁培辉 叶韧 华仁忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 为获得接近衍射极限发散角的铜激光, 设计了共焦及平凹二种自滤波非稳腔并研究了它们的输出特性, 分别获得了发散角为 2.5 倍及 1.4 倍衍射极限的铜激光.

**关键词** 铜蒸气激光, 自滤波非稳腔, 发散角.

## 1 引 言

铜蒸气激光器(CVL)是一种高重复频率、高增益、短脉冲的激光器, 其输出为 510.6 nm 及 578.2 nm 双波长激光. 目前铜蒸气激光器正处在一个从研究到实用的阶段. 随着单台铜蒸气激光器输出功率的不断提高, 它展现了广泛的应用前景, 如: 激光分离同位素、激光倍频、激光精密加工及激光医学, 在各项应用中, 改善铜蒸气激光器输出光的方向性已成为提高效率的关键. 1989年 Bhatnagar 等人首先将自滤波非稳腔(简称 SFUR)应用于铜蒸气激光器中, 获得了约 2 倍衍射极限发散角(以 FWHM 为标准)的铜激光<sup>[1]</sup>, 以后采用自滤波非稳腔的铜蒸气激光器受到了人们的关注<sup>[2~4]</sup>. 本文以获取接近衍射极限发散角的铜激光为目的, 在充分利用激活区的前提下, 设计了二种自滤波非稳腔, 并实验比较了非稳腔及二种自滤波非稳腔的输出特性, 为各项应用提供了选择最佳谐振腔的依据.

## 2 自滤波非稳腔的结构特点及设计

普通自滤波非稳腔的结构如图 1(a)所示, 其特点是在实共焦非稳腔的焦点处放置一个滤波小孔 FA, 当平面波通过小孔 FA, 由凹面镜 M<sub>2</sub> 聚焦返回, 若小孔 FA 的直径为爱里斑时, 激光在腔内往返一次就能获得发散角为衍射极限的激光输出. 小孔直径  $d$  由下式表示:

$$d = (2.44 \lambda f_2)^{1/2}. \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $f_2$  为凹面镜 M<sub>2</sub> 的焦距. 根据 Siegman 的研究结果<sup>[5]</sup>, 光束从 M<sub>2</sub> 返回小孔 FA 到达凹面镜 M<sub>1</sub> 的光斑直径  $\phi$  由下式给出:

$$\phi = a d(f_1/f_2),$$

系数  $a$  通常取 1.5. 式中  $f_1$  为凹面镜 M<sub>1</sub> 的焦距.

\* 本课题获国家自然科学基金资助.

收稿日期: 1994年4月27日

为了让光束尽可能充满整个激活区域, 获得较高的激光输出,  $\phi$  值应等于激光管的直径  $D$ , 即:

$$D = a d (f_1/f_2) \quad (2)$$

作者采用的铜蒸气激光器的管径为 20 mm, 若取  $f_1 = 1750$  mm, 由(1)、(2)式可得:

$$d = 0.16 \text{ mm}; \quad f_2 = 22 \text{ mm}$$

由于这种普通的自滤波非稳腔的放大倍率  $M$  很高(约 94), 滤波小孔很小, 因此发散角接近衍射极限的输出光功率很弱, 为了减小腔的损耗, 提高接近衍射限发散角的输出光功率, 作者用平面反射镜取代凹面镜  $M_1$ , 组成平凹自滤波非稳腔<sup>[6]</sup>, 其结构如图 1(c)所示, 对于这种结构的自滤波非稳腔, 根据几何光学原理, (2)式可修正为:

$$D = 2a d (L_1/f_2) \quad (3)$$

式中  $L_1$  为平面反射镜到滤波小孔 FA 之间的距离. 若取  $L_1 = 1500$  mm, 由(1)、(3)式可得:

$$d = 0.28 \text{ mm}; \quad f_2 = 63 \text{ mm}$$

基于同样的考虑, Nikonchuk 等人在普通自滤波非稳腔的基础上提出了另一种改型的自滤波非稳腔<sup>[3]</sup>, 称为改型共焦自滤波非稳腔, 如图 1(b)所示, 其结构特点是在普通自滤波非稳腔中, 将滤波小孔移至紧靠凹面镜  $M_2$  处, 这是因为同样直径的滤波小孔放在紧靠凹面镜  $M_2$  处比放在  $M_2$  的焦点处可获得较大光斑的输出光束<sup>[3]</sup>, 即(2)式中系数  $a$  较大, 因此在设计改型共焦自滤波非稳腔时, 以普通自滤波非稳腔为参考, 相应降低自滤波非稳腔的放大倍率, 同时略微扩大滤波孔径. 这样做的优点是降低了腔的损耗, 增加了

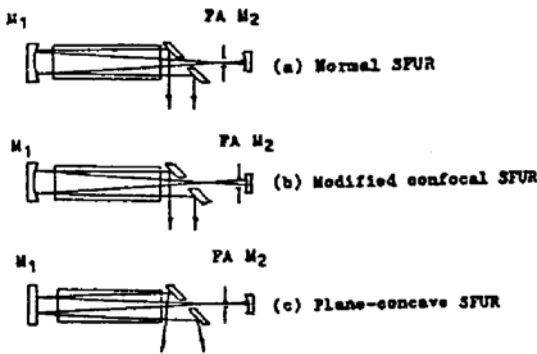


Fig. 1 Three types of SFUR

腔内激光反馈, 因此改型共焦自滤波非稳腔能获得较高的输出光功率, 虽然腔的选模能力略有下降, 但光束发散角依然接近衍射极限.

改型共焦自滤波非稳腔与平凹自滤波非稳腔相比, 前者为平行光输出, 后者为发散光输出, 其输出光可视为在滤波小孔处发出的点光源, 因此在激光器输出端, 可用焦距  $f = 2L_1$  的透镜将光束准直.

### 3 实验结果及讨论

本文使用的铜蒸气激光器其激活区长 580 mm, 直径为 20 mm, 放电重复频率为 6 kHz, 输入电压约 4.5 kV, 电流约 0.5 A, 缓冲气体氩气气压约 5000 Pa. 激光功率采用 Coherent 公司制造的 LM100 型功率计测量. 光束发散角采用“套孔法”测量. 本文所指的衍射极限发散角为全角,  $\theta = 0.063$  mrad. 由于爱里斑内的光强百分比为 84%, 故定义光束发散角为包含输出功率 80% 所对应的发散角. 在文献[1,4]中, 发散角采用光强的半高宽(FWHM)作为标准, 在近似高斯分布时, 其光束发散角为包含输出功率 51% 所对应的发散角.

### 3.1 改型共焦自滤波非稳腔与与负支非稳腔的比较

实验选用放大倍率  $M = 70$  的负支非稳腔(简称 NBUR), 凹面镜  $M_1$  及  $M_2$  的焦距分别为 1750 mm 及 25 mm, 激光输出采用一块  $45^\circ$  放置的斜孔全反板, 斜孔的直径为 1.5 mm. 首先测量了  $M = 70$  的负支非稳腔的输出光方向性曲线, 如图 2 的曲线 c 所示, 然后在负支非稳腔中将滤波小孔放在紧靠  $M_2$  处, 形成改型共焦自滤波非稳腔, 在相同实验条件下分别测量了二种滤波孔径 0.22 mm 及 0.35 mm 的改型共焦自滤波非稳腔的输出光方向性曲线, 如图 2 中曲线 a, b 所示. 为了更直观地了解改型共焦自滤波非稳腔的优点, 同时测量了  $M = 140$  的负支非稳腔及稳腔(简称 SR)的输出光功率及发散角, 将上述测量结果一并列于表 1. 由图 2 及表 1 可得出三点结论.

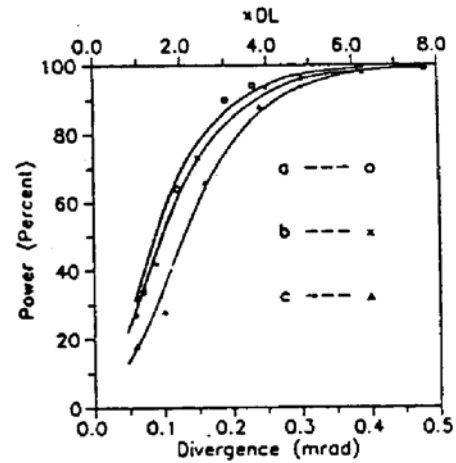


Fig. 2 Ratio of  $P_i$  to  $P_0$  versus divergence, where  $P_i$  is the power transmitted through apertures of various sizes and  $P_0$  is the power with divergence  $\leq 0.5$  mrad.

a —  $M = 70$ ,  $d = 0.22$  mm, modified confocal SFUR; b —  $M = 70$ ,  $d = 0.35$  mm, modified confocal SFUR; c —  $M = 70$ , NBUR

Table 1 Comparison of NBUR and modified confocal SFURs at the same operation condition

	NBUR $M = 70$	NBUR $M = 140$	M-C SFUR $M = 70, d = 0.22$ mm	M-C SFUR $M = 70, d = 0.35$ mm	SR
Divergency (mrad)	0.21	0.20	0.16	0.18	11
Diffraction Limit (times)	3.3	3.2	2.5	2.9	172
Laser Power (W) $\leq 0.5$ mrad	1.8	1.1	1.3	1.6	
Laser Power (W) $\leq 20$ mrad	2.9	2.5	2.4	2.6	4.0

1) 无论是采用负支非稳腔还是自滤波非稳腔, 铜蒸气激光器的输出光都由两部分组成, 一部分是放大的自发辐射, 发散角在  $0 \sim 20$  mrad 的范围内, 它是由铜蒸气激光器的高增益特性及腔的高损耗引起; 另一部份是经过谐振腔振荡后输出的激光, 其发散角在  $0 \sim 0.5$  mrad 范围内. 本文所测的方向性曲线是针对  $0.5$  mrad 以下的激光. 与稳腔相比,  $M = 70$  的负支非稳腔的输出效率为 45%;  $M = 70$  滤波孔径为 0.22 mm 的改型共焦自滤波非稳腔的输出效率为 33%.

2) 在改型共焦自滤波非稳腔中, 增大滤波孔径, 输出光发散角随之变大, 输出光功率也随之增加, 直至达到采用相同放大倍率的负支非稳腔的输出光发散角及输出光功率.

3) 在高增益铜蒸气激光器中, 采用高放大倍率的自滤波非稳腔能有效地改善光束方向性, 但在发散角达到几倍衍射极限以后, 要进一步改善光束方向性, 采用自滤波非稳腔是一

种行之有效的办法, 它能达到比采用更高放大倍率的负支非稳腔更佳的效果. 将  $M = 70$  滤波孔径为  $0.22 \text{ mm}$  的改型共焦自滤波非稳腔与  $M = 140$  的负支非稳腔相比, 前者获得了  $0.16 \text{ mrad}$  (约 2.5 倍衍射极限) 的发散角, 比后者减小了 25%, 而且前者的输出光功率为  $1.3 \text{ W}$  比后者高了 15%. 这一结果表明: 同样是获得发散角接近衍射极限的光束, 采用改型共焦自滤波非稳腔比采用负支非稳腔能够得到更高的输出光功率.

对上述结果作者认为: 光束在负支非稳腔中的往返次数可由下式给出:

$$K = 1 + (\ln M_0 / \ln M), \quad (4)$$

式中  $M_0 = (D^2/2\lambda f_1)$ , 若  $M = 140$ , 则  $k = 2.3$ ; 若  $M = 70$ , 则  $k = 2.1$ . 由此可知: ① 光线在负支非稳腔中至少往返二次才获得发散角为衍射极限的激光输出, 因此采用负支非稳腔的输出光发散角必然是由第一与第二次往返腔内的输出光发散角的平均. 而自滤波非稳腔只需在腔内往返一次便可获得衍射极限的发散角, 因此在获得相同输出光功率时, 采用自滤波非稳腔比采用负支非稳腔能获得更低的光束发散角. ② 在负支非稳腔结构中,  $M = 70$  与  $M = 140$  相比, 光线在腔内往返数之差很小, 因此光束发散角的改善也极其微弱.

### 3.2 改型共焦自滤波非稳腔与平凹自滤波非稳腔的比较

首次将平凹自滤波非稳腔用于铜蒸气激光器中,  $M_2$  选用焦距为  $f_2 = 65 \text{ mm}$  的凹面镜,  $M_1$  为平面全反镜, 它与  $M_2$  的焦点之间的距离  $L_1 = 1500 \text{ mm}$ , 孔径  $d = 0.32 \text{ mm}$  的滤波小孔放在  $M_2$  的焦点处, 这种平凹自滤波非稳腔的放大倍率  $M = 46$ .

实验测量了改型共焦及平凹二种自滤波非稳腔的方向性曲线, 如图 3 曲线 a, b 所示, 这里光束发散导致口径扩大的因素已消除. 表 2 列出了这两种自滤波非稳腔的输出光功率及发散角. 从图 3 及表 2 可得出二点结论.

Table 2 Comparison of modified confocal and plane-concave SFURs at the same operation condition

	M-C SFUR	P-C SFUR
	$M = 70, d = 0.22 \text{ mm}$	$M = 46, d = 0.32 \text{ mm}$
Divergency (mrad)	0.16	0.09
Diffraction Limit (times)	2.5	1.4
Laser Power (W) $\leq 0.5 \text{ mrad}$	0.84	0.69

1) 采用平凹自滤波非稳腔的输出光方向性比采用改型共焦自滤波非稳腔的输出光方向性有显著改善, 前者输出光的发散角达  $0.09 \text{ mrad}$  (约 1.4 倍衍射极限), 比后者减小了 44%.

2) 尽管平凹自滤波非稳腔的输出效率是改型共焦自滤波非稳腔的 82%, 但在衍射极限发散角内的激光功率约比改型共焦自滤波非稳腔高一倍, 前者为  $0.48 \text{ W}$ , 后者仅为  $0.26 \text{ W}$ . 这表明: 在一些对功率密度有较高要求的铜激光倍频, 激光精密加工等应用中,

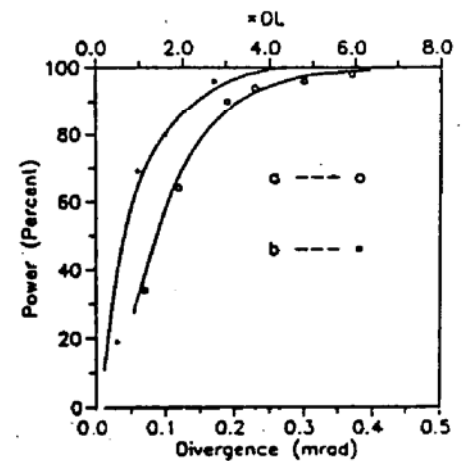


Fig. 3 Ratio of  $P_i$  to  $P_0$  versus divergence, where  $P_i$  is the power transmitted through apertures of various sizes and  $P_0$  is the total power with divergence  $\leq 0.5 \text{ mrad}$ .

a —  $M = 70, d = 0.22 \text{ mm}$ , modified confocal SFUR

b —  $M = 46, d = 0.32 \text{ mm}$ , plane-concave SFUR

采用平凹自滤波非稳腔可提高应用效率.

## 4 结 论

1) 对于高增益的脉冲激光器, 如铜蒸气激光器, 准分子激光器, 要获得发散角接近衍射极限的激光, 采用自滤波非稳腔是一种理想的方案, 同样是获得衍射极限发散角, 采用自滤波非稳腔比采用负支非稳腔能提取更高的激光功率.

2) 平凹自滤波非稳腔比改型共焦自滤波非稳腔能获得更小的光束发散角, 尽管前者的输出功率低于后者, 但在衍射极限发散角内的激光功率却大于后者.

3) 首次将平凹自滤波非稳腔用于铜蒸气激光器中, 获得了发散角为 1.4 倍衍射极限的铜激光 0.69 W. 与稳腔输出功率相比, 效率为 17%.

## 参 考 文 献

- [1] R. Bhatnagar, S. K. Dixi, B. Singh *et al.*, Performance of a copper vapor laser with self filtered unstable resonator. *Opt. Commun.*, 1989, 74(1/2): 93
- [2] R. Pin, R. Salimbeni, G. Toci *et al.*, High efficiency diffraction limited operation of a copper vapor laser. *Opt. Commun.*, 1991, 81(1/2): 138
- [3] Michael Nikonchuk, Ruslan Okunev, Igor Polyakov, Copper vapor laser with self-filtering unstable resonator. *Proc. SPIE*, 1990, 1225: 419
- [4] S. K. Dixi, J. K. Mittal, B. Singh *et al.*, A generalized diffraction filtered resonator with a copper vapor laser. *Opt. Commun.*, 1993, 98(1~3): 91
- [5] A. E. Siegman, Performance limitations of the self-filtering unstable resonator. *Opt. Commun.*, 1992, 88(4~6): 295
- [6] Chen Jiawen, A. Luches, V. Nossisi *et al.*, High optical quality laser beams with confocal and non confocal SFUR schemes. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(4): 289

## Investigation of Copper Vapor Laser with Self-Filtering Resonator

Ren Hong      Liang Peihui      Ye Ren      Hua Renzhong

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

(Received 27 April 1994)

**Abstract** In order to obtain output laser of near diffraction limit divergence, output properties of a modified confocal and a plane-concave self-filtering unstable resonator have been investigated. The copper vapor lasers with 2.5 times and 1.4 times diffraction limit divergence thereby were achieved respectively.

**Key words** copper vapor laser, self-filtering unstable resonator, divergence.