

超音速化学氧碘激光器小信号增益 二维分布的实验研究*

多丽萍 桑风亭 杨柏龄 金玉奇 孙以珠
(中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023)

提要 利用小型连续波化学氧碘激光器作探测光源,测量了几千瓦级的超音速连续波化学氧碘激光器小信号增益的二维分布。并对结果作了讨论。

关键词 氧碘激光器,小信号增益,二维分布

1 引言

连续波化学氧碘激光器是唯一的电子跃迁的化学激光器。它以高效率、大功率而倍受人们关注和重视^[1]。

随着化学氧碘激光器的不断发展,尤其是功率达到一定水平后,提高和改善光束质量就成为首要问题。研究化学氧碘激光器小信号增益分布情况是光腔设计和改善光束质量的重要依据。

研究增益的方法有很多,实验上常用的有无探测光源下的衰减法^[2]和变耦合率法^[3],有探测光源的放大法^[4,5]。所见报道的放大法测量化学氧碘激光器的增益都是用二极管激光器作探测光源,这就存在波长匹配的问题。而我们是使用小型连续波化学氧碘激光器作探测光源,波长完全一致,不存在匹配问题。这在国际上还未见报道。

本文利用经典、直观、准确的增益测量方法——放大法,测量了超音速、连续波、几千瓦级的化学氧碘激光器垂直于光轴方向的二维增益分布。并将结果同文献报道作了比较,并给出讨论。

2 实验部分

作为探测光源的小型连续波化学氧碘激光器(装置见图 1)。主要由激发态氧发生器、去水冷阱、碘蒸气发生器、碘喷管、光腔和真空排气系统等几大部分组成。我们是在输出功率约为 1 mW,稳定输出约 20 s 的情况下测量增益。

由实验得知的不同输出耦合系数 T 和对应的输出功率 P ,利用化学氧碘激光器的非均匀

* 国家自然科学基金部分资助项目。

加宽方程

$$P = \frac{1}{2}ATI_s \left[\left(\frac{gl}{\delta} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\delta = \frac{1}{2}[\alpha - \ln(1 - T)]$$

计算拟合得,腔内损耗 $\alpha = 11\%$, 饱和光强 $I_s = 2500 \text{ W/cm}^2$ 。由于饱和增益系数 $g = \frac{g_0}{1 + I/I_s}$, 其中 g_0 为小信号增益系数, I 为探测光强, 约为 0.01 W/cm^2 , 由于 $I/I_s \ll 1$, 所以测得的增益 g 为小信号增益系数 g_0 。

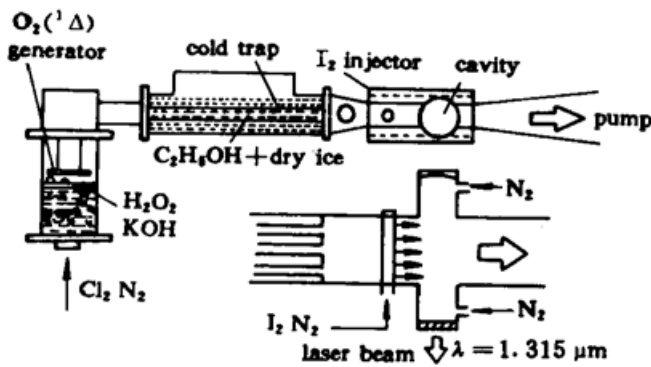


图 1 小型化学氧碘激光器结构装置示意图
Fig. 1 The setup of the small cw COIL

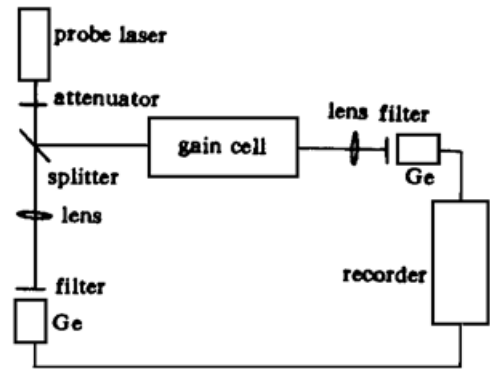


图 2 小信号增益测试光路示意图
Fig. 2 The experimental setup of gain measurement

具体测量增益的光路见图 2。我们采用的是放大法,即入射光 I_0 经过增益区后,光强为 I , 由小信号增益的定义得到

$$g = \frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0} \quad (l \text{ 为增益区长度})$$

采用双光路可同时消除探测光源的不稳定和光路系统所带来的吸收、散射等等。探测信号 I_p 和参考信号 I_r 直接由 Ge 探头接收,由记录仪连续记录。实验过程为:先使小型化学氧碘激光器出光,记录 I_p 和 I_r ,此时增益区并无增益介质。待被测主激光器开始反应,方为测增益的开始。

3 结果和讨论

测量得到的参考光 I_r 和探测光 I_p 的光强信号如图 3 所示。由于记录的两笔位置不同,对同一时刻 I_p 表现为超前 I_r 5mm。开始被测增益区并无激活介质,两信号之比趋于一常数,即为空白比。待被测主激光器运行,被放大的探测信号 I_p 为产生的增益信号。

测量超音速连续波化学氧碘激光器小信号增益的二维分布结果见表 1。由数据我们可以看出,对于 $y = 0$ 位置,小信号增益 g 随 x 是呈抛物线分布。对于 $y \neq 0$ 位置,小信号增益 g 随 x 是单调递减的。也可以说是抛物线的前移,以致于峰顶移到我们开始测试



图 3 参考信号和探测信号
Fig. 3 Reference signal and probe signal

的位置。而对于 x 每一固定点, 中心位置的增益值要高于边界位置的增益值。二维分布见图 4。

表 1 小信号增益二维结果 ($g = 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)

Table 1 The value of spatial gain ($g = 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)

x	g	40 mm	60 mm	77 mm	95 mm
y					
- 12.5 mm		0.8	0.5	0.5	0.4
0		0.9	1.0	1.1	0.8
12.5 mm		0.6	0.4	0.5	0.4

x denotes the distance from the throat center.

y denotes the distance from the center along cavity height direction.

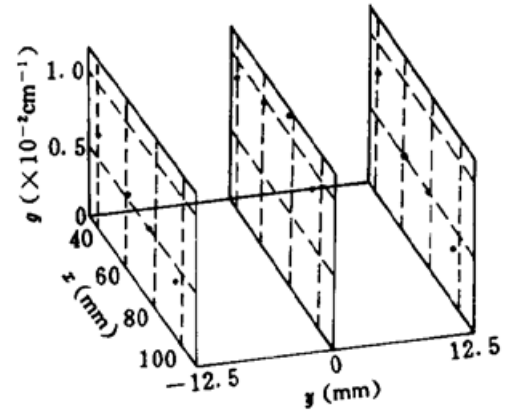


图 4 小信号增益系数的二维分布

Fig. 4 The spatial distribution of the small signal gain

这种变化趋势是可以理解的。从主气流和副气流浓度的分布情况看, 由于边界层的作用, 主气流中, 中心 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 浓度高于边界 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 浓度, 而且边界速度低于中心速度, 温度场的分布又与马赫数相关 $\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} M^2$, $M = v/a$, 也就与速度分布相关。由此可知 y 方向温度场分布是中心温度低于边界温度。尽管副气流碘沿 y 方向是多孔均匀分布, 但小信号增益和光腔温度直接相关:

$$g = \sigma([I^*] - 0.5[I])$$

$$\sigma = 7.4 \times 10^{-18} \left[\frac{300}{T} \right]^{1/2} \text{ cm}^2$$

σ 为受激发射截面。由此不难理解小信号增益在 y 方向上, 中心增益高于边界增益的情况了。

沿 x 方向的抛物线分布, 应从 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 和碘的最佳配比及混合情况加以考虑。由于 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 自淬灭作用, 即



使得 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 沿 x 方向浓度分布逐渐降低。而混合情况是随着 x 增大, 混合得越好, 增益就越高; 又 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 使增益随 x 降低, 这样就有一个增益最大的位置。要使碘分子最快解离, 激光器增益最大, 碘流量和氧浓度有如下关系^[6]

$$(n\text{I}_2)_c \equiv U_m \sqrt{\frac{D[\text{O}_2]}{k_3} \left[\frac{(K_e - 1)Y_m + 1}{K_e} \right]}$$

$(n\text{I}_2)_c$ 为碘分子流量, U_m 为主气流速度, D 为扩散系数, $[\text{O}_2]$ 为主气流中氧浓度。而 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 是氧的主要成分。设此时 $\frac{(n\text{I}_2)_c}{[\text{O}_2(^1\Delta)]^{1/2}} = \gamma$, 在 $y = 0$ 时, 开始 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 浓度较大, $\frac{(n\text{I}_2)_c}{[\text{O}_2(^1\Delta-)]^{1/2}} < \gamma$, 增益较小, 随 x 增大, $\text{O}_2(^1\Delta)$ 浓度降低, $\frac{(n\text{I}_2)_c}{[\text{O}_2(^1\Delta-)]^{1/2}} = \gamma$, 混合较均匀, 此时增益最大。 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 再降低, $\frac{(n\text{I}_2)_c}{[\text{O}_2(^1\Delta-)]^{1/2}} > \gamma$ 以后增益逐渐下降。而对于 $y \neq 0$ 位置, 边界浓度低于中心浓度, 使得在开始测量的位置, $\frac{(n\text{I}_2)_c}{[\text{O}_2(^1\Delta-)]^{1/2}}$ 就已经大于或等于 γ , 随着 x 增大, 增益随 x 当然是单调下降的。

从美国的结果^[5](见表 2) 可以看出, 化学氧碘激光器小信号增益 g 随 x 方向, y 方向的变

化趋势和我们的结果相同。

表 2 文献[5]中的结果($g=10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)
Table 2 Results from [5] ($g=10^{-2} \text{ cm}^{-1}$)

g x y	40 mm	50 mm	60 mm	90 mm
10 mm	0.5	0.5	0.3	0.3
5 mm	1.1	0.9	1.1	0.8
0	1.1	1.2	1.2	1.0
- 5 mm	1.1	1.1	1.0	0.9
- 10 mm	0.4	0.3	0.3	0.2

x denotes the distance from the throat.

y denotes the distance from the center at cavity height direction.

致谢 参加本工作的还有逢景科、王 麟、廖伟光、王冬梅、丛加刚、袁启年等同志,庄 琦研究员在工作中多次给予指导,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 西南工程物理研究院翻译. 定向能武器的科学和技术. 美国物理学会报告(1985)
- 2 Kazuhiro Watanabe, Shigeru Kashiwabara, Kiyokaw Sawai *et al.*. Small-signal gain and saturation parameter of a transverse-flow CW oxygen-iodine laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, **QE-19**(11) : 1699
- 3 Josef Schmiedberger, Jarmila Kodymova, Otoma Spalek *et al.*. Experimental study of gain and output coupling characteristics of a CW chemical oxygen-iodine laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1991, **QE-27**(6) : 1265
- 4 E. Lebiush, B. D. Barmashenko, A. Elior *et al.*. Parametric study of the gain in a small scale, grid nozzle supersonic chemical oxygen-iodine laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1995, **31**(5) : 903
- 5 R. F. Tate, B. S. Hunt, C. A. Helms *et al.*. Spatial gain measurements in a chemical oxygen iodine laser (COIL). *IEEE J. Quant. Electr.*, 1995, **31**(9) : 1632
- 6 B. D. Barmashenko, A. Elior, E. Lebiush *et al.*. Analytic and numerical solutions and comparison with experiments. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(12) : 7653

The Experimental Study of the Two-dimensional Distribution of the Small-signal Gain for Supersonic Chemical Oxygen-iodine Laser

Duo Liping Sang Fengting Yang Bailing Jin Yuqi Sun Yizhu
(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023)

Abstract In this paper, we report that a small continuous wave chemical oxygen-iodine laser (cw COIL) is used as a probe to measure the small-signal gain two-dimensional distribution for a supersonic cw COIL of several kilowatts. A discussion for the results is given.

Key words oxygen-iodine laser, small-signal gain