

用复合腔调谐获得高功率 CW CO₂ 激光谱线的研究

何懋麒 高如芳 赵有源

(复旦大学近代物理研究所激光物理研究室)

提要: 利用普通的玻璃基板光栅构成复合腔对 CO₂ 激光器进行选频, 在高增益情况下获得 42 瓦高功率定向定位输出。谱线数目视复合腔参数而定。本文介绍复合腔调谐的基本原理和实验结果。

Investigation on obtaining high power CW CO₂ lasing branches with a tunable complex-cavity

Ho Maoqi Gao Rufang Zhao Youyuan

(Laboratory of Laser Physics, Institute of Modern Physics, Fudan University)

Abstract: Branches of a CW CO₂ laser were selected by a tunable complex-cavity composed of an ordinary glass-substrated grating. High power output up to 42 W with definite direction and location for the branches were obtained with high gain. The number of branches is dependent on the parameters of the complex-cavity. Basic principles and experimental results on tunable complex-cavity are described.

一、引言

CO₂ 激光介质在 9~11 微米波段中存在 110 多条振转跃迁谱线, 为了扩大调频范围和提高输出功率, 一般采用如图 1(a) 所示方式, 选择支线^[1,2]。或者采用如图 1(b) 所示方式, 由部分透射平面镜 M_1 与光栅组成 F-P 干涉仪, 再与全反镜 M_2 构成复合腔, 选择谱线^[3,4]。文献[3]介绍了用 NaCl 作为 M_1 的情况。但在高增益情况下, 例如近 2 米放电管的高增益支线, 如果要求高功率输出, 都遇到玻璃基板光栅的一级衍射光反射率随辐

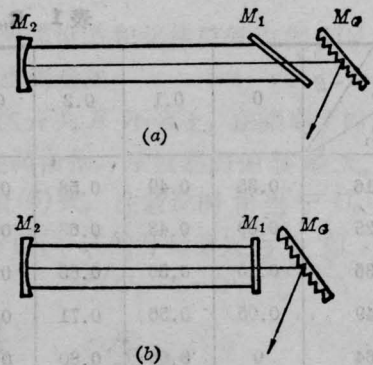


图1 CO₂ 选频谐振腔示意图

照功率密度的增加而迅速下降, 甚至烧坏的

收稿日期: 1979年11月15日。

问题,不能在高增益情况下获得高功率输出。我们试图采用图2所示方式, M_2 为部分透射锗凹面镜, M_1 为部分透射平面反射镜,适当选择它们的反射率,利用光栅调谐作用及谱线之间的竞争效应,获得了调谐的高增益谱线的高功率输出,而普通玻璃基板光栅毫无损害,这对于某些要求高功率和要求具有适当调谐范围的应用(例如光化学、同位素分离、泵浦远红外激光器等)是有一定意义的。此外激光由 M_2 输出,定向定位,结构简单。加之不用 NaCl 作窗片,器件在气候潮湿的地区亦可应用。

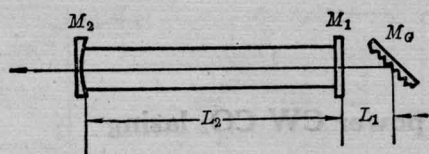


图2 复合腔选频激光器结构图

二、复合腔的分析

复合腔的基本思想是由光栅 M_G 和锗平面 M_1 构成可调高反并能承受高功率的 F-P 型色散元件,再与 M_2 构成选频谐振腔。

1. F-P 型可调高反色散元件

关于由 M_G 和 M_1 构成的 F-P 的总反射

率 R_{tot} 已由 W. J. Witteman 等人^[5]的文章给出:

$$R_{tot} = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_G})^2 + 4\sqrt{R_1 R_G} \sin^2 \alpha}{(1 - \sqrt{R_1 R_G})^2 + 4\sqrt{R_1 R_G} \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

其中 R_G 为光栅的一级衍射光反射率, R_1 为锗平面镜的反射率, α 为单程相差

$$\alpha = \frac{\omega L}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} L_1$$

ω 、 λ 分别是激光振荡的角频率和波长, c 为光速, L_1 为 M_G 与 M_1 之间的距离,如果在光栅上装压电陶瓷,可通过改变压电陶瓷上的电压改变 L_1 ,从而使 R_{tot} 改变。国产光栅的反射率 R_G 一般在 60~75% 之间,我们取 64%,对不同的 R_1 和 $\sin^2 \alpha$ 计算 R_{tot} ,如表 1。

由表 1 看出,当 $\sin^2 \alpha = 1$ 时, R_{tot} 达到极大 R_{tm} ,随 R_1 的增加 R_{tm} 接近 99%,当光栅承受功率密度增加时,反射率 R_G 下降, R_{tm} 亦将下降,图 3 指出 R_1 取不同值时 R_{tm} 随 R_G 而变化的情况。当 R_1 很低时, R_G 的下降将引起 R_{tm} 快速下降。

表 1 和图 3 指出,提高 R_1 ,控制 L_1 ,使 R_{tot} 达到极大 R_{tm} ,可以获得由光栅-锗平面所构成的 F-P 型可调高反色散元件。

表 1 R_{tot} 随 R_1 和 $\sin^2 \alpha (=S)$ 的变化表

R_{tot} \ R_1 \ S	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.16	0.35	0.49	0.58	0.64	0.69	0.73	0.75	0.78	0.80	0.81	0.83
0.25	0.09	0.48	0.63	0.68	0.73	0.77	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86
0.36	0.15	0.50	0.65	0.73	0.78	0.81	0.84	0.86	0.87	0.884	0.895
0.49	0.05	0.56	0.71	0.79	0.83	0.86	0.88	0.90	0.91	0.917	0.925
0.64	0	0.66	0.80	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.947	0.952
0.72	0.02	0.73	0.85	0.89	0.92	0.93	0.94	0.95	0.956	0.960	0.965
0.81	0.13	0.81	0.89	0.93	0.94	0.955	0.962	0.967	0.971	0.974	0.977
0.90	0.22	0.90	0.95	0.96	0.97	0.978	0.981	0.984	0.986	0.987	0.989

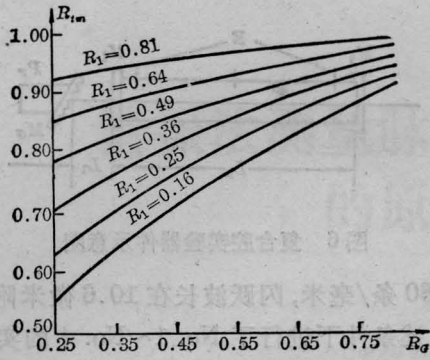


图3 总反射率极大值 R_{tm} 随光栅反射率 R_G 的变化曲线

2. 复合腔的输出功率和谱线

由 Rigrod^[6] 的关于均匀展宽谱线激光器输出功率的计算公式, 可得镜 M_2 的输出功率

$$P_2 = \frac{[g_0 L + \ln(R_{tm} R_2)^{1/2}] R_{tm}^{1/2} T_2 I_s}{(R_{tm}^{1/2} + R_2^{1/2}) [1 - (R_{tm} R_2)^{1/2}]} \quad (2)$$

由光栅零级衍射耦合输出的功率

$$P_G = \frac{[g_0 L + \ln(R_{tm} R_2)^{1/2} R_2^{1/2} T_t I_s]}{(R_{tm}^{1/2} + R_2^{1/2}) [1 - (R_{tm} R_2)^{1/2}]} \quad (3)$$

其中 $g_0 L$ 为单程增益, I_s 为饱和光强, T_2 为 M_2 的透射率, T_t 为 M_G 与 M_1 组成的 F-P 的透射率,

$$R_{tm} = 1 - T_t - \alpha_t$$

$$R_2 = 1 - T_2 - \alpha_2$$

α_t 、 α_2 分别表示 $M_G - M_1$ 与 M_2 的吸收、散射和衍射损耗。

一般情况, 如图 1(a)、(b) 工作方式, $R_2 \approx 1$, $T_2 = 0$, $P_2 = 0$ 。

当无光栅时, $R_{tm} = R_1$, $T_t = T_1$, 选取 R_1 较低, 例如 10%, 使无光栅时, M_1 的输出功率 $P_1 = P_G = 0$ 。当有光栅时, 可由 (2) 估计 M_2 输出的功率^[1, 3]。

在我们的实验中, 为使光栅免遭强光辐照而又能获得高增益谱线高功率输出, 适当提高 R_1 (例如 36% 以上), 使 R_{tm} 在 90% 以上, 降低 R_2 , 此时, 从光栅零级衍射耦合输出是很小的, 由 M_2 输出的功率较大, 数值可

由 (2) 式估计。若 R_1 、 R_2 超过 36%, 以至在无光栅时, 10.4μ 带 P_{20} 已开始振荡。在加上光栅之后, 由于工作气压一般在 10 托以上, CO_2 分子之间进行频繁的碰撞, 振转能级的跃迁之间存在着强烈的竞争^[5], 因谐振腔 Q 值和介质增益均与波长有关, 各谱线超过阈值条件的程度不同, 超过多的处于有利竞争地位而开始振荡, 处于各高能级的粒子向起振谱线的高能级转移, 加强了起振谱线的输出强度。图 4 是示意图。在无光栅时, P_{20} 附近谱线已超过阈值条件, 通过压电陶瓷控制腔长 L_2 , 就可以获得 P_{20} 激光输出, 如果加上光栅, 并调谐到例如 P_{24} 波长位置, 控制 L_1 使 R_{tot} 达到极大 R_{tm} , 调节 L_2 使振荡频率与 P_{24} 重合, P_{24} 超过阈值条件的程度 $\overline{BB'}$ 比无光栅时 P_{20} 超过阈值条件的程度 $\overline{AA'}$ 多, P_{24} 起振, 抑制了 P_{20} , 从而实现高增益高功率输出。由公式 (1)、(2) 可以看出, 当 R_1 达到 60% 后, 若再进一步提高, R_{tm} 随 R_1 增加很慢, 即 $\overline{BB'}$ 增加很慢, 而 $\overline{AA'}$ 却随 R_1 增加很快, 这样 $\overline{AA'}$ 接近 $\overline{BB'}$, 竞争谱线之间超过阈值条件程度的差别逐渐减小。光栅的调谐范围因而缩小, 最后以至消失调谐作用。

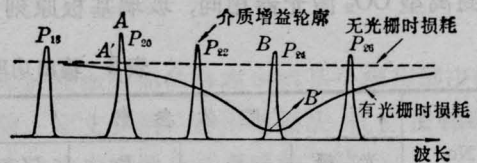


图4 谱线竞争示意图

3. 关于复合腔使光栅承受功率减小的程度, 可由 Witteman^[4] 给出的公式 (4) 和图 5 进行估计。

$$\frac{P_{grat}}{P_t} = \frac{(1 - R_1)}{(1 + \sqrt{R_1} \sqrt{R_G})^2} \quad (4)$$

P_{grat} 为光栅上辐照功率, P_t 是在 M_1 上的腔内辐照功率。很明显, 随着 R_1 的上升, P_{grat}/P_t 迅速下降, 对光栅起了保护作用。

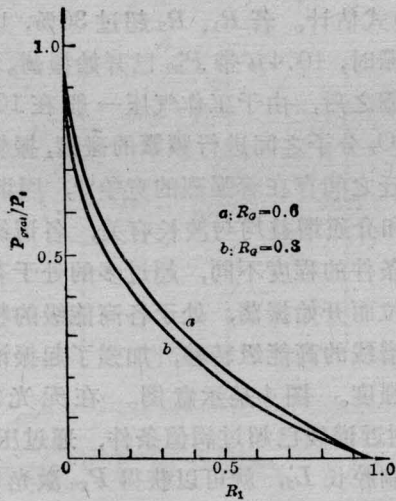


图5 光栅上相对辐照功率 R_{gross}/P_0 随 R_1 的变化曲线

三、实验结果

图6是激光器的结构示意图, 放电管长1.7米, 分两段放电, 管径13毫米, M_2 的曲率半径为5米, 其平面镀全增透膜, 凹面镀部分增反膜, M_1 为锗平面, 右边平面镀全增透膜, 以防止 M_1 两面平行而形成 F-P, 左边平面镀部分增反膜, P_r 为压电陶瓷, 长30毫米, 控制 L_1 长度, 工作气压和放电条件与一般封离型 CO_2 激光器相同, 玻璃基板原刻光

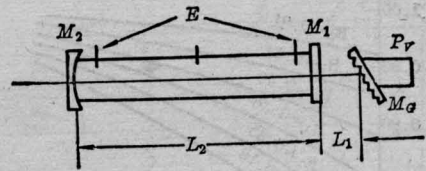


图6 复合腔实验器件示意图

栅, 80条/毫米, 闪耀波长在10.6微米附近。在上述条件下进行了 No. 1~No. 4 的实验。

为了便于比较, 我们将光栅零级衍射耦合输出的实验结果由 No. 5、No. 6 给出, 是非复合腔形式, 其结构如图7。图中 M_1 为 NaCl 布氏窗, 平面镜 M_3 与光栅成直角, 起恒偏向作用, 其交线与光栅划线平行, 并且与光栅转动的机械转轴重合, 当光栅转动时, 激光由出射缝 S 定向定位输出。

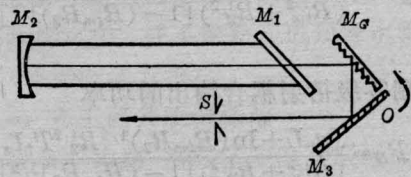


图7 零级衍射耦合输出示意图

实验结果如表2, 当光栅调谐到 P_{20} 外的某一谱线时, P_{20} 支线亦无输出。实现单支线运转。

表2 输出功率和支线总数的测量结果

实验序号 No.	腔体参数				M_2 端输出功率 (瓦)				支线总数
	光栅	R_1	R_2	L (米)	10.4P 支	10.4R 支	9.4P 支	9.4R 支	
1	无	0.60	0.60	1.7	20(P_{20})	0	0	0	1
2	有	0.60	0.60	1.7	42(P_{22})	41(R_{02})	40(P_{20})	28(R_{20})	34
3	无	0.36	0.36	1.7	10(P_{20})	0	0	0	1
4	有	0.36	0.36	1.7	30(P_{22})	24(R_{20})	17(P_{20})	14(R_{20})	40
5	无	0	1.0	0.6	0	0	0	0	0
6	有	0	1.0	0.6	4(P_{20})	3(R_{20})	3.5(P_{20})	2.8(R_{20})	68

四、讨 论

1. 在非复合腔 No. 6 实验中, 激光器刚激发时, 功率为 10 瓦, 5 分钟后下降到 4 瓦, 光栅上出现白色圆斑, 以后功率逐渐下降, 光栅上的光斑直径约为 5 毫米, 如果腔内功率是输出功率的 3 倍, 则光栅的承受功率密度极限约为 $8 \times 3/\pi \cdot \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 \approx 120$ (瓦/厘米²), 而在 No. 2 实验中, P_{22} 虽为 42 瓦, P_G 却不到 2 瓦, 因而光栅上所承受的功率密度约为 $2 \times 3/\pi \left(\frac{0.7}{2}\right)^2 \approx 16$ (瓦/厘米²), 只为光栅承受功率密度极限的 1/8, 因而光栅受到保护。

2. No. 1、No. 2 实验中, 无光栅时虽有 P_{20} 振荡, 但加光栅后 P_{20} 为零, 其它高增益支线亦无输出, 实现了高增益单支线高功率输出。进一步与 No. 3、No. 4 比较, 当 R_1 降低到 36%, R_{tm} 仍接近 90%, 激光仍由 M_2 输出, 但功率降低, 支线增加, No. 5、No. 6

更进一步说明支线增加, 功率下降的趋势。因此可以根据实际需要, 适当选择 R_1 、 R_2 , 在一定调频范围内得到高功率输出。

3. 以殷钢或石英固定腔体, 用压电陶瓷调节 L_1 、 L_2 , 可以获得稳定的单支线输出, 支线稳定性主要与支线的增益大小有关。

用复合腔选频的实验, 在高增益支线获得了高功率输出而又无损玻璃基板光栅, 这项工作在其类似的工作中有一定意义。并且输出是定向定位的, 激光器中不用易潮元件, 应用起来较为方便。但亦存在频率调谐范围较小的缺点。

参 考 文 献

- [1] E. T. Антропов, ЖПС, 1973, 18, 4.
- [2] T. M. Hard; *Appl. Opt.*, 1970, 9, 1825.
- [3] 周锦文等; 《电子学通讯》, 第一卷, 第二期, 1979, 51.
- [4] G. J. Ernst, W. J. Wittman; *IEEE J., Quant. Electr.*, 1971, QE-7, No. 10, 484.
- [5] W. J. Wittman, R. J. Carbone; *IEEE J., Quant. Electr.*, 1970, QE-6, No. 7, 462.
- [6] W. W. Rigrod; *J. Appl. Phys.*, 1965, 36, 2487.

