

连续波选频 CO₂ 激光器的研究*

周锦文 齐继兰 单焕炎 游 幼

提 要

本文讨论了提高连续波选频 CO₂ 激光器输出功率的原理。光束从光栅的零级反射输出。放电管长度为 1.6 m, 在 9.4 μm 和 10.4 μm 振转带的 P 支和 R 支处获得了 80 条以上的单谱线调谐。在 9.4 μm 带 R 支处最大输出功率达 64 W。采用了热稳定性良好的硅基底光栅。

一、引 言

自从 CO₂ 激光器发明后不久,人们就开始进行选频(线调谐)的研究。为了使激光输出能集中到某一条(或某一些)预选的跃迁波长上,在腔内可采用波长选择吸收器^[1]、光栅^[2-4]、法布里-珀罗标准具^[5]等色散元件。最广泛采用的方法是把光栅作为谐振腔的一个端反射镜来选择波长,同时用压电陶瓷来改变谐振腔的长度,使之达到输出最大。

近年来,连续波选频 CO₂ 激光器在激光光谱学、激光化学、激光探测大气污染等研究领域中的应用,要求提高激光器的输出功率和扩大调谐范围。

本文报道了我们在近期工作中取得的良好进展,分析了采用光栅选频的 CO₂ 激光器的工作机理,说明了大幅度地提高选频输出功率的可能性。在 1.6 m 放电长度上,获得了 64 W 的最高输出功率,获得的谱线数目超过 80 条。

二、原 理

CO₂ 激光器在 9.1 到 11 μm 范围内约有 110 条谱线,分属于 [00°1—10°0] 和 [00°1—02°0] 振转跃迁的 P 支和 R 支。由于同一振动能级的各转动子能级之间转动弛豫十分迅速,因此,在振转跃迁之间存在着激烈的竞争。通常的 CO₂ 激光器,发射谱线在增益最高的 10.6 μm 附近,随谐振腔长度的变化而随机地变化。正确地设计激光谐振腔和恰当地运用衍射光栅,可以将媒质激活能量的一小部分(对弱线)或一大部分(对强线)集中到一条预先选定的激光跃迁上输出。Rigrod^[6] 对均匀加宽线型的激光媒质的理论计算,可以用来近似地描述 CO₂ 激光器中输出功率与激光参量的关系。忽略激光在激活媒质中的损耗,并假定所有的损耗都发生在镜面上,则输出功率表示式为:

$$I_{\text{out}} = I_s [g_0 L + \ln(r_1 r_2)^{1/2}] r_1^{1/2} t_2 / [r_1^{1/2} + r_2^{1/2}] [1 - (r_1 r_2)^{1/2}] \quad (1)$$

式中 I_{out} ——从镜子“2”透过的输出功率;

* 1978 年 12 月 5 日收到。

I_s ——饱和功率参量;
 r_1 ——镜子“1”的反射率;
 r_2 ——镜子“2”的反射率;
 t_2 ——镜子“2”的透过率;
 g_0 ——小信号增益系数;
 L ——放电长度.

对于选频器件通常是将衍射光栅作为镜子“1”,采用具有部分透过率的介质膜反射镜作为镜子“2”,激光从镜子“2”输出.光栅的一级衍射效率 R_1 ,即式(1)中的 r_1 ,对输出功率有很大的影响,在效率低的情况下,输出功率小,并且调谐范围也小.设光栅的各级衍射效率分别为 $R_0, R_1, R_2, \dots, R_{-1}, R_{-2}, \dots$, 损耗为 α 则

$$R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_{-1} + R_{-2} + \dots + \alpha = 1 \quad (2)$$

关于光栅的衍射计算表明:若光栅刻线间距 d 满足下列条件时,

$$0.5\lambda < d < 1.5\lambda \quad (3)$$

则只有一级和零级衍射,这时

$$R_1 + R_0 + \alpha = 1 \quad (4)$$

零级衍射 R_0 和损耗 α 不能完全消除,它的数值取决于光栅的刻制工艺.在我们的实验条件下,在 9 到 11 μm 范围, R_1 约在 60 到 80% 之间.

选频激光器的另一种输出耦合方案是从光栅的零级衍射耦合输出^[3].这时谐振腔的另一端镜子采用镀金的全反射凹面镜.忽略掉金镜上的损失,假定 NaCl 窗上的损失为 β ,并假定光栅上刻线满足(3)式,我们可将输出功率的公式(1)改写成:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{out}} &= I_s(g_0L + \ln \sqrt{R_1})R_0/(\alpha + \beta + R_0) \\
 &= (I_sg_0L) \left(1 + \frac{\ln \sqrt{R_1}}{g_0L}\right) \left(\frac{R_0}{\alpha + \beta + R_0}\right)
 \end{aligned} \quad (5)$$

下面讨论(5)式的物理意义:式中第一项 I_sg_0L 为饱和输出(极限)功率,代表总的激活能,与激光器的气体成分和放电条件有关,与放电长度成正比.对于 CO_2 , I_s 和 g_0 对不同的跃迁线是不同的.式中的第二项反映激光器中增益饱和的程度.当 R_1 提高时,总激活能中贡献给受激辐射的比例增加.式中的第三项代表耦合输出在总的受激辐射中所占的比例.(剩下的那部分损失在光栅和 NaCl 窗上)对于高增益情况,例如四个支的峰值附近,当放电长度足够长时, $g_0L \gg |\ln R_1|$, 第二项接近 1, 输出功率取决于比值 $R_0/(\alpha + \beta + R_0)$, 提高 R_1 也有一定的作用.可以预计,当损耗比零级衍射小很多时,媒质的激活能的大部分可以集中到一条跃迁线上.对于低增益情形,例如高 J 值和低 J 值的振-转跃迁线 $g_0L \sim |\ln R_1|$, 除了比值 $R_0/(\alpha + \beta + R_0)$ 仍起重要作用外,提高 R_1 将有重要作用.

G. J. Ernstand^[4] 等在腔中增加一个与光轴垂直的部分反射镜与光栅组成复合的法布里-珀罗系统,其反射率的极大值为 R_m :

$$\sqrt{R_m} = \frac{\sqrt{R} + \sqrt{R_1}}{1 + \sqrt{RR_1}} \quad (6)$$

式中 R 为垂直镜的反射率. 忽略垂直镜的损耗, 复合腔输出功率的表示式为:

$$I_{\text{out}} = I_s [g_0 L + \ln \sqrt{R_m}] \frac{R_0}{R_0 + \alpha}. \quad (7)$$

将上式与 (5) 式对比, 可以知道垂直镜的作用. 由于 R_m 大于 R_1 , 所以用 R_m 代替 R_1 (文献 [4] 忽略了垂直镜上的损耗) 可使 I_{out} 有显著的提高, 对于低增益弱线情况, 则提高更多.

三、实验方法

激光器示意图如图 1 所示. 图 1(a) 表示用部分透射凹面锗镜输出耦合的情形, 锗镜的曲率半径为 3 m, 凹面镀增反膜, 另一面镀增透膜. 图 1(b), (c) 是采用镀金全反射凹面镜, 曲率半径为 8 m, 激光由光栅输出.

器件是采用典型的封离型 CO₂ 激光器^[7], 放电区长度为 1.6 m, 管径为 12 mm, 凹面镜与光栅距离约为 2 m. 当凹面镜的曲率半径为 8 m 时, 在凹面镜处 TEM_{00} 模光斑直径约为 8 mm, 在光栅处的光斑直径约为 7 mm, 因此激光模式与管径的匹配较好.

对光栅安置和调整的要求是:

(1) 光栅的刻线与光栅转盘的转轴严格平行.

(2) 光栅的刻线与激光管轴严格垂直.

(3) 光栅的刻线与布儒斯特窗片的法线近似地垂直.

条件 (1)、(2) 必须严格保证, 其对准误差应在通常的球面-平面谐振腔对准容差范围之内. 条件 (3) 较易满足, 一般在 1° 之内即已足够. 为了保证条件 (1), 在将光栅安装于光栅转台上时, 用一个 6328 Å He-Ne 激光器进行校准, 通过仔细调整光栅的位置, 使刻线与转轴平行. 为了保证条件 (2), 光栅基底加工成平行平面的, 平行度在 20'' 之内. 对光方法是, 把光栅的背面作为谐振腔的一个镜子, 采用平行光管, 用典型的校准谐振腔的技术调整光栅转台, 使光栅与管轴保持严格垂直, 记录下光栅转台的角度读数, 作为光栅转角的零点. 然后旋转光栅至所选择的激光跃迁. 激光跃迁波长与光栅转角的关系为:

$$2d \sin \alpha = \lambda \quad (8)$$

根据此式, 从光栅台的角度读数, 可直接计算出激光跃迁波长.

上述对光技术简便可靠, 并且能直接根据光栅转角读出输出波长. 我们采用了多种光栅, 在图 1 的三种结构中进行了实验, 其中三块光栅的参数如下:

1# 光栅: 玻璃基底, 原刻光栅, 刻线 66 条/mm.

2# 光栅: 铜基底, 复制光栅, 刻线 80 条/mm.

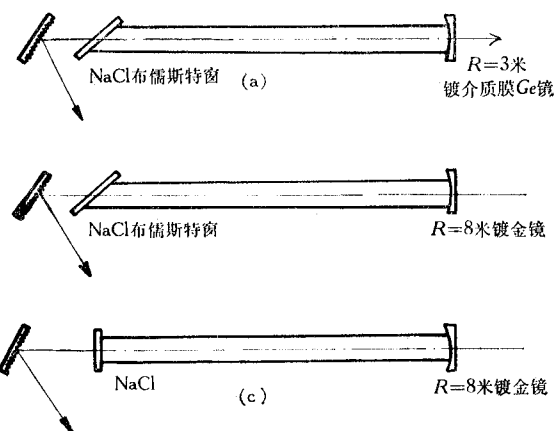


图 1 选频激光器示意图

3[#] 光栅: 硅基底, 原刻光栅, 刻线 100 条/mm.

光栅的闪耀波长均为 10.6 μm .

四、实验结果及讨论

(一) 光栅条数的影响

在 66 条/mm 的 1[#] 光栅的情形下, 在 9.4 μm 带观察到正 2 级和负 1 级的激光输出, 并且其强度与零级输出相近. 在 10.4 μm 带负 1 级和正 2 级消失. 对于 80 条/mm 与 100 条/mm 的情形, 只有零级和 1 级衍射, 上述实验结果与 (3) 式一致. 负 1 级和正 2 级的存在降低了光栅的 1 级和零级的效率. 等效于增加了光栅的附加损耗.

(二) 零级耦合方案与 1 级耦合方案的比较

采用 1 级耦合方案 [如图 1(a)], 用 1[#] 光栅作实验, 激光输出功率最高只有十多瓦, 并且同时有零级输出. 采用零级耦合输出 [如图 1(b) 和 (c)], 提高了腔的 Q 值, 功率提高 1 倍. 表 1 的第 1 行列举了采用 3[#] 光栅时的实验结果, 在四个支峰值输出均为 40 W 左右, 调谐谱线约 70 条.

表 1

光 栅	各支峰值输出功率(W)				窗结构	谱线总数 (条)
	10.4 μm 带 P 支	10.4 μm 带 R 支	9.4 μm 带 P 支	9.4 μm 带 R 支		
3 [#] 100 条/mm	42	38	42	42	布儒斯特窗	约70
1 [#] 66 条/mm	21	—	28	21	⊥ 窗	>60
2 [#] 80 条/mm	27	43	64	60	⊥ 窗	>80
3 [#] 100 条/mm	40	46	53	54	⊥ 窗	>80

(三) 复合腔作用和存在的问题

采用复合腔方案时, 对垂直镜的反射率 R 的限制是要求在无光栅时, 最强线振荡也不能发生. 在我们的 1.6m 实验管的情况下, 要求 R 为 20% 左右. 采用氯化钠平行平晶作为垂直镜进行了初步实验, 表 1 列举了三种光栅的实验结果. 实验结果表明: (1) 对于弱线, 复合腔对提高输出功率有明显的作用, 并且采用复合腔可将调谐范围扩大. 将表 1 的第 1 行与第 4 行对比, 在 10.4 μm 带 P 支峰值功率没有增长, 而在 9.4 μm 带的 R 支功率从 42W 提高到 54W, 增加了 12W. (2) 复合腔的作用与光栅反射率随波长变化关系很大, 对于表 1 的第 3 行, 采用 2[#] 光栅时, 10.4 μm 带 P 支功率仅 27W, 而 9.4 μm 带 P 支却高达 64W, 其原因是 2[#] 光栅在 10.4 μm 带的零级耦合太弱. (3) 氯化钠平晶的厚度约为 4—5mm, 因此这个标准具的光谱间隔约为 0.7cm^{-1} , 其反射率在 0—15% 之间, 随入射波长而变, 对于 9.1 到 11 μm 范围的 110 条激光跃迁线, 该标准具的反射率是随机变化的, 因此复合腔作用的大小对不同的线也是随机变化的. 因此在选频时, 发现对不同的跃迁线功率有很大的起伏. 并且在高 J 值弱线范围发生“跳线”现象 (即有的跃迁线不振荡). 这种起伏和“跳线”现象使得标准具不适宜作为复合腔的垂直镜. 如果能采用一面镀增透膜的 ZnSe 平镜作为垂直镜, 可以较好地实现复合腔结构.

(四) 光栅基底材料的选择

玻璃基底不能承受太大的功率密度, 在功率超过 10W 时光栅表面就被烧坏, 形成白斑, 进一步提高功率时, 就炸裂。表 1 第 2 行就是因为在进行 10.4 μm 带 R 支实验时 1# 光栅炸裂而使实验中断。铜基底的复制光栅也不能承受太大的功率。复制光栅由于在光栅面与基底之间有有机膜层, 热导率很低, 而且又不耐高温, 所以只能承受 50W/cm² 的功率密度。较好的是硅基底的原刻光栅 (3# 光栅)。硅的热传导与金属相似, 比玻璃高 100 多倍, 它又比金属容易加工成高质量的光学表面, 所以它是良好的基底材料。它长期工作, 温度上升不显著。采用水冷, 预计可在每平方厘米几百瓦的功率密度下工作。

(五) 光栅闪耀波长的选择

上述实验中采用的光栅都在 10.6 μm 附近闪耀。表 1 中的数据表明, 除第 1 行 4 个峰值功率相近以外, 其它 3 行都是 10.4 μm 带的 P 支功率最小 (虽然 10.6 μm 处增益最高), 其原因是在 10.6 μm 处, 零级耦合率较低。改变闪耀波长可以在 10.6 μm 处得到更高的输出功率。

五、结 束 语

本文分析了选频 CO₂ 激光器的工作机理, 说明了大幅度地提高选频输出功率的可能性。采用 1.6m 长的封离型器件, 在一系列的实验中, 最佳的实验结果如表 1 中第 4 行所示。在 10.4 μm 带和 9.4 μm 带的 P 支和 R 支输出峰值功率分别为 40W, 46W, 53W 和 54W。调谐谱线数目超过 80 条, 这些实验表明, 将选频器件的功率提高到接近非选频器件的功率是可能的。

光栅由长春光机所和北京第二光学仪器厂提供, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] P. L. Hanst and J. A. Morreal. *Appl. Opt.*, 8 (1969), 109.
- [2] G. Moeller and J. Dane. Rigden. *Appl. Phys. Lett.*, 8 (1966), 69.
- [3] T. M. Hard. *Appl. Opt.*, 9 (1970), 1825.
- [4] G. J. Ernstand and W. J. Wittenman. *IEEE. J. Quant. Electron.*, QE-7 (1971), 484.
- [5] C. Meyer, C. Rossetti and P. Barchewitz, *IEEE. J. Quant. Electron.*, QE-6 (1970), 179.
- [6] W. W. Rigrod, *J. Appl. Phys.*, 36 (1965), 2487. 朱曾如, 激光物理, 国防工业出版社, 1974 年, 第 230 页.
- [7] 中国科学院电子学研究所五室一组, 封离型 CO₂ 激光器, 激光, 1974 年, 第 1 期, 第 21 页.