

寿命长输出特性好的连续CO₂调频激光器

蔡邦维 卢玉村 熊胜明*

(四川大学)

我们研制了一台用光栅选支、压电驱动改变腔长的连续CO₂调频激光器。全外腔放电管的Brewster窗和耦合输出镜均选用高光学质量的ZnSe光学元件。测量到了84条激光谱线，最强单线功率达13W，优于目前国内报导的同类器件水平。调谐宽度119MHz，与理论估算非常接近，连续使用一年多后输出仍然很好。

一、前言

激光化学、激光光谱等研究工作都非常迫切需要寿命长、输出稳定、光束质量高、结构紧凑实用的调谐激光器件。过去使用的连续CO₂调频激光器，Brewster窗多用质软、易潮解的NaCl、KCl晶体材料制作。由于它们的机械强度差，不能达到优质光学表面，且损耗又大，因此一般单线最强输出功率只能达5W左右；被潮解的粘结面极易漏气，使用寿命很短；耦合输出镜亦多采用镀增反膜的锗(Ge)镜，由于锗材料吸收系数大($2.5 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$)，导热系数低，易于发热、脱膜，使输出功率迅速下降，甚至不能振荡。为了克服上述缺点，我们采取有效的改进措施，研制成了长寿命、高输出、Litterow式的全外腔连续CO₂调频激光器。我们分别用ZnSe和Ge作输出镜进行了比较实验研究，对输出功率及调谐宽度作了估算，实验结果与计算值很接近。该器件能在9~11 μm 波长范围输出84条激光谱线，最强单线功率达13W，单线调谐宽度119MHz，优于目前国内同类器件的水平。

二、提高器件性能采取的改进措施

1. 选用高光学质量、不潮解、吸收系数低达 10^{-3}cm^{-1} 的ZnSe晶片作Brewster窗，保证输出光束质量高、密封性好且寿命长。

2. 全外腔增益放电管Litterow式的一级振荡耦合输出，其结构不仅比常用的零级输出紧凑，而且使谐振腔输出镜上的增反膜层得到空气的充分冷却，从而防止半外腔结构内放电等离子体高温使膜层破坏，导致输出下降、寿命短的致命缺点。此外，全外腔结构应用更为灵

收稿日期：1987年3月9日。

* 本校82级学生，现工作单位：中国科学院光电所。

活方便, 适宜作腔内及环形腔高灵敏度、高分辨率的激光光谱工作。

3. 耦合输出镜亦采用ZnSe晶体凹面透镜(凹面镀反射率80%的全介质增反膜), 取代了吸收系数高一个数量级、导热差、易发热变性、脱膜的锗透镜, 使输出功率和稳定性都得到提高, ZnSe元件同时可透红外光和可见光, 能方便使用He-Ne激光准直全部实验光路。

4. 增益放电管, 光栅转台, 谐振腔镜全部固定在零膨胀系数的整块花岗石底座上, 并采取隔振, 全部器件用一有机玻璃罩子罩上, 使激光器输出稳定。

三、输出功率和调谐宽度的计算

当 $T = 400\text{K}$ 、 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ 时, CO_2 的多普勒(Doppler)加宽约60MHz, 放电管内总气压 $P = 22\text{Torr}$, 管长100cm, 芯管直径 $d = 0.9\text{cm}$, 放电电极长度80cm, 内充 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} : \text{H}_2 = 1 : 1 : 8 : 0.4 : 0.1$ 五组分混合气体, 谱线的碰撞加宽为:

$$\Delta\nu_H \sim \Delta\nu_L = \frac{1}{2\pi\tau_L} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}} + \frac{1}{\tau_{\text{CO}_2-\text{N}_2}} + \frac{1}{\tau_{\text{CO}_2-\text{He}}} + \frac{1}{\tau_{\text{CO}_2-\text{Xe}}} \right) \quad (1)$$

式中, 碰撞时间由下式计算:

$$\frac{1}{\tau_L(\text{CO}_2-x)} = N_x Q_{\text{CO}_2-x} \left[\frac{8kT}{\pi} \left(\frac{1}{m_{\text{CO}_2}} + \frac{1}{m_x} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, x 气体的粒子密度为 $N_x = 9.65 \times 10^{24} \frac{P_{\text{分压}}(\text{Torr})}{T}$ 。粒子的碰撞截面为:

$$Q_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} \approx Q_{\text{CO}_2-\text{N}_2} \approx Q_{\text{CO}_2-\text{He}} \approx Q_{\text{CO}_2-\text{Xe}} \approx 10^{-18} \text{m}^2$$

式中, 玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{Jk}^{-1}$; $m_{\text{CO}_2} = 7.36 \times 10^{-26} \text{kg}$; $m_{\text{N}_2} = 4.69 \times 10^{-26} \text{kg}$; $m_{\text{He}} = 6.69 \times 10^{-27} \text{kg}$; $m_{\text{Xe}} = 2.20 \times 10^{-25} \text{kg}$ 。代入参数计算得: $\Delta\nu \sim \Delta\nu_L = 116\text{MHz}$, $\Delta\nu_H > \Delta\nu_D$, 谱线以均匀加宽为主。

以均匀加宽为主的连续 CO_2 激光器的输出功率计算式为^[1,2]:

$$P = \frac{1}{2} ST I_s \left[\frac{G_H^0(\nu_0)l}{\alpha} - 1 \right] \quad (3)$$

由稳定振荡条件:

$$G_H^0(\nu) = G_H^0(\nu_0) \frac{\left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right)^2 + \left(1 + \frac{I_s}{I_s}\right)} = 1 \quad (4)$$

解得单线调谐宽度表示式:

$$2 \left| \nu - \nu_0 \right| = \Delta\nu_H \left(\frac{G_H^0(\nu_0)l}{\alpha} - 1 - \frac{I_s}{I_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(3)式、(5)式中, $S = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ 为激光束的有效放电截面面积; $I_s = \frac{I^2}{d^2} \text{W/cm}$ 为饱和光强; $G_H^0(\nu_0) = 1.41 \times 10^{-2}/d$ 为中心频率 ν_0 的小信号增益系数; I_s 为频率 ν 的光强; $T =$

20%为输出镜透过率,工作物质长度 $l=30\text{cm}$,谐振腔长 $L=120\text{cm}$,平面光栅反射率约80%,单程损耗 $\alpha=55\%$,由(3)式估算出10P(20)的输出功率为15.7W;由(5)式算得的单线调谐宽度为 $2|v-v_0|=120\text{MHz}$ 。

四、实验装置

实验装置如图1所示。

放电管采用三层式水冷,用GG-17硬质玻璃制做,两端的ZnSe片Brewster窗尺寸为 $5.5\times 2.2\times 0.2\text{cm}^3$ 。谐振腔的一端是平面光栅1,闪烁波长 $10.6\mu\text{m}$,100线/mm,反射率约80%;另一端由曲率半径 $R=5\text{m}$ 的ZnSe平凹透镜、凹面镀80%的介质增反膜。输出镜粘贴在外直径 $\phi=2.5\text{cm}$ 、长3cm的压电陶瓷环上,由锯齿波电源11驱动。为了稳定输出,光栅台,CO₂放电管,输出镜架固定在1.4m长的整块花岗石条上,激光器全部罩上。输出激光经ZnSe分束器6分成二束,反射光束到光谱分析仪12监测波长,透射光束经斩波后,被热释电探测器接收再送入锁相放大器9,锁相放大器输出的信号送入X-Y记录仪,记录所选的单支线的调频特性谱图,用功率计13测量各激光谱线的功率。

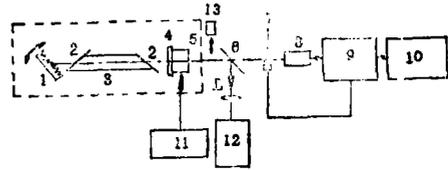


图1 实验装置图。1.平面光栅;2. ZnSe Brewster窗片;3.CO₂放电管;4. ZnSe凹面透镜;5.压电陶瓷环(PZT);6. ZnSe分束器;7.斩波器;8.热释电探测器;9.锁相放大器;10.记录仪;11.锯齿波电源;12.光谱分析仪;13.功率计

五、实验结果与讨论

1.输出波长 λ 与光栅转角 α_0 应满足闪耀光栅公式:

$$2d\sin\alpha_0 = m\lambda_0$$

式中,光栅常数 $d=0.01\text{mm}$, $m=1$ 。当放电电流 $I=15\text{mA}$,放电电压为10kV时,测量到了CO₂ 00⁰1-10⁰0带P(4)-P(44)支的21条,R(4)-R(44)的21条激光跃迁谱线;00⁰1-02⁰0带P(4)-P(44)支的20条,R(4)-R(46)的22条谱线,谱线总数共计84条。其中最大输出功率为13W,最小为0.1W,超过了近年同类型激光器的水平[3]。

为了证实用ZnSe作输出镜比用Ge材料好,我们分别用两种材料作成相同曲率半径($R=5\text{m}$),相同反射率($r_2=80\%$)的耦合输出镜,并在相同的工作条件下,测量每条线的功率,其结果列于表1。由比较表明,用ZnSe输出镜可得激光谱线84条,比用Ge镜的多2条;跃迁谱线的功率,前者比后者普遍提高很多。这是因为ZnSe输出镜凹面所镀的全介质增反膜的反射带比锗镜宽阔。用ZnSe作输出镜测得的光谱分布如图2所示,最强线10P(20),功率为13W,与用(3)式的估算值15.7W很接近,如果使用衍射效率更高的光栅,输出功率还会提高。

在相同的工作条件下,锗输出镜最强线功率达11.5W,实验证明用ZnSe作输出镜比用锗镜好。

2. 将光栅转角调到10P (20) 支线输出的固定位置再用 0~500V, 周期为10s的锯齿波电源驱动压电陶瓷环, 使谐振腔长作周期伸缩变化, 由 $\Delta\nu = \nu \cdot \Delta L/L$ 可见, 调谐腔长, 激光输出频率在谱线中心频率两翼沿增益线型连续扫描, 调谐范围为 $c/2L$, 与谐振腔相邻纵模的自由光谱范围相同。

由腔长 $L=120\text{cm}$, 相邻纵模间隔为:
 $\Delta\nu = c/2L \approx 125\text{MHz}$ 。单线单调谐宽度应与 $\Delta\nu = 125\text{MHz}$ 相比配, 由(5)式计算 $2|\nu - \nu_0| = 120\text{MHz}$ 。图3是由函数记录仪记下的10P (20) 支线激光功率随加在压电陶瓷环上的电压变化曲线。相邻两峰的间距即是纵模间隔 $\Delta\nu = 125\text{MHz}$, 以此为基准测得单线调谐宽度 $2|\nu - \nu_0| = 119\text{MHz}$, 与计算值120MHz几乎相同。调谐线不对称的原因是压电陶瓷伸缩的非线性变化。

3. 图3表明输出的激光为 TEM_{00} 模, 调谐时激光模式不发生任何变化。

4. 用ZnSe Brewster波堆作检偏器[4], 测得输出的激光束为线偏振光。

5. 该激光器连续使用一年多, 输出特性仍然很好。我们用它作了共振多程光声检测痕量气体及腔外饱和吸收光谱等研究, 都取得了满意的结果, 有关工作的总结, 我们将陆续发表。

六、结 论

实验研究表明, 用高光学质量的ZnSe作Brewster窗片, 用镀全介质增反膜的硒化锌作耦合输出镜, 所制成的全外腔连续 CO_2 调频激光器具有结构紧凑、造价低、使用寿命长、输出功率高、光束质量好的优点; 能在 $9\sim 11\mu\text{m}$ 波长范围内输出 TEM_{00} 模的84条谱线, 最强单线功率达13W, 用压电驱动改变腔长单线调谐宽度119MHz, 与腔的自由光谱范围非常接近。该器件是激光化学、激光光谱研究的合适的光源。

吕百达同志对本文提出宝贵的修改意见, 特此致谢。

表1 ZnSe和Ge输出镜各激光谱线功率的比较

		00°1-10°0				00°1-02°0			
用不同材料作输出镜的输出功率(W)									
		R支		P支		R支		P支	
线序		Ge	ZnSe	Ge	ZnSe	Ge	ZnSe	Ge	ZnSe
4		0.4	0.8	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2	0.6
6		0.4	1.6	1.4	0.8	0.6	1.7	0.4	2.5
8		1.5	6.0	2.5	5.5	1.4	5.1	1.1	7.5
10		3.0	7.0	3.0	7.2	5.1	8.2	5.1	8.2
12		4.5	10.0	5.6	8.8	5.5	9.4	7.0	9.0
14		6.5	10.5	7.0	9.8	5.7	10.8	7.2	9.2
16		9.1	10.8	7.3	10.5	7.4	11.2	7.4	10.1
18		9.5	10.5	7.6	11.5	7.6	11.4	7.5	10.6
20		9.0	13.0	11.5	13.0	8.6	12.2	8.1	11.0
22		9.3	12.5	10.0	12.8	8.2	12.0	7.2	12.6
24		8.6	12.6	7.0	11.6	8.0	12.0	6.3	11.6
26		8.5	11.0	6.6	11.2	7.1	10.5	6.1	10.5
28		8.4	9.0	5.5	10.1	6.8	9.0	6.0	10.0
30		7.5	7.6	5.2	8.0	5.5	8.5	5.7	9.6
32		6.2	6.5	4.8	7.2	5.4	8.8	4.5	9.4
34		2.6	5.2	3.2	3.4	2.4	8.1	3.3	8.5
36		1.2	1.4	1.0	1.2	0.6	7.2	1.2	7.8
38		0.5	0.8	0.4	0.5	0.3	4.2	0.6	1.5
40		0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	1.1	0.2	0.4
42		0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.4		0.2
44		0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2		
46						0	0.1		

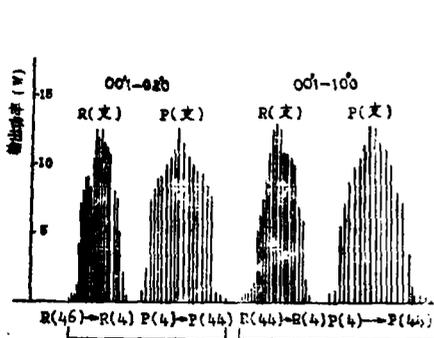


图2 光栅选支CO₂激光器发射光谱分布。CO₂:N₂:He:Xe:H₂=1:1:8:0.4:0.1; P=22Torr, I=15mA

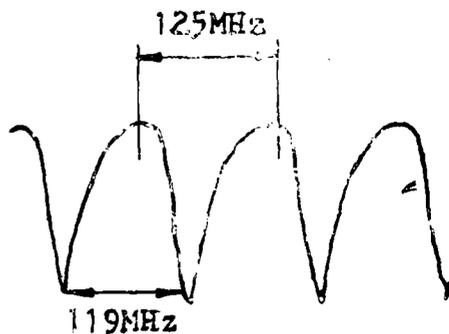


图3 10P(20)支线的调谐特性。I=15mA

参 考 文 献

- [1] Theodore S.Fahlen, Appl.Opt., 1973, Vol.12, No.10, P.2381~2384.
- [2] 周炳琨等,《激光原理》,国防工业出版社,1980年,第77~92页。
- [3] 中国电子学会、中国光学学会,《中国光电子集锦》,1985年,第216页。
- [4] 蔡邦维,《中国激光》,1985年,第12卷,第9期,第572~573页。

A CW CO₂ tunable laser characterized by a long lifetime and good output

Cai Bangwei, Lu Yacun, Xiong Shengming

(Sichuan University)

Abstract

The development of a CW CO₂ tunable laser using grating for wave selection and piezoelectric ceramic tube for cavity length tuning is reported. The high quality ZnSe optical elements are used for Brewster windows and coupled output mirrors. 84 laser lines have been measured and the output power of the strongest line is 13W, tunable frequency width being 119MHz. The experiments were in agreement with the theoretical estimation. Outputs have kept well in continuous operation for over a year.

作者简介: 蔡邦维, 男, 现年45岁, 讲师。曾参加“六五”国家科技攻关项目激光分离铀同位素研究。现从事激光器件、应用激光光谱科研及教学工作。

卢玉村, 男, 现年50岁, 副教授。“冷光镜”项目1978年获全国科学大会奖。现从事薄膜光学科研及教学工作。