

选频 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器

费林 王克俊 诸旭辉*

提要: 我们研制了一台 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器, 测量到激光谱线 80 条, 其中 40 条是 $^{14}\text{CO}_2$ 00 0 1-(10 0 , 02 0) $_1$ 带的激光跃迁谱线, 强线输出功率达 4.0 W 以上; 实验还观察到同位素的竞争效应, 发现即使 $^{14}\text{CO}_2$ 成份低于 $^{12}\text{CO}_2$, 其激光辐射仍占优势。

A $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ isotope laser

Fei Lin, Wang Kejun, Zhu Xuhui

Abstract: A $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ isotope laser has been developed and 80 laser lines were measured. 40 lines originated from lasing transition of 00 0 1-(10 0 , 02 0) $_1$ band of $^{14}\text{CO}_2$ and the strongest line output power was over 4.0 W. The competition effect between isotopes were experimentally observed and domination of lasing radiation of $^{14}\text{CO}_2$ were found even if the content of $^{14}\text{CO}_2$ was less than $^{12}\text{CO}_2$.

一、引言

自 1964 年 Patel^[1] 发明了 CO_2 激光器后, 1966 年, Wieder 和 Mccurdy^[2,3] 用 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ 做出了第一台 CO_2 同位素激光器, 随后 Jacobs 和 Bowers^[4]、Siddoway^[5] 分别做出了 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{14}\text{CO}_2$ 的激光器。以后, 人们对纯同位素的各种 CO_2 激光跃迁谱线做了大量的计算、测量和研究。本文介绍我们对一台 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器的研究结果。

二、实验装置

实验装置示意图如图 1。本实验采用的是一米长的水冷石英玻璃放电管, 内径

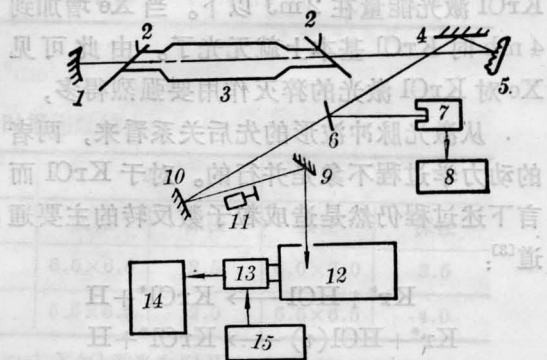


图 1 实验装置

- 1—镀金全反射镜 ($B=3\text{m}$ 或 $B=5\text{m}$); 2—NaCl 晶体布氏窗; 3—石英玻璃放电管; 4—镀铝平面反射镜; 5—平面光栅; 6—镀铝平面反射镜 (测功率时放上); 7—碳斗; 8—功率显示器; 9、10—均为镀铝平面镜; 11—斩波器; 12—红外光栅光谱仪; 13—热释电探测器; 14—示波器; 15—直流稳压电源

收稿日期: 1984 年 9 月 19 日。

* 北京原子能研究所。

10 mm, 放电区长 85 cm, 两端为 NaCl 晶体的布氏窗片。选用全外腔式结构, 一端用镀金反射镜, 曲率半径为 3 m 或 5 m, 另一端系平面光栅, 由零级耦合输出激光。80 线/mm 金属光栅闪耀波长为 $11 \mu\text{m}$, 75 线/mm 金属光栅闪耀波长为 $10 \mu\text{m}$, 腔长 173 cm。激光输出经斩波器及铝平面反射镜, 照射到分辨率为 0.25 cm^{-1} 的红外光谱仪上, 用 RO-L 热释电红外探测器探测激光谱线的相对强度, 用功率计测量激光功率。实验中所用的 $^{14}\text{CO}_2$ 放射性气体, 丰度约为 60%, 是中国科学院原子能研究所制作提供的。采用特殊的真空配气系统, 将 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 的混合气体以及 N_2 和 He 充入管中; 用液氮冷却回收 $^{14}\text{CO}_2$ 气体, 残余部分用填有 NaOH 的冷井处理。

三、实验结果和讨论

1. 激光谱线的测量

在工作电流 $I = 8 \text{ mA}$, 放电电压 16.5 kV, 腔内总气压 $18.7 \pm 0.2 \text{ Torr}$, $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4.2$, $^{14}\text{CO}_2:^{12}\text{CO}_2 = 60\%:40\%$ 条件下, 我们用 80 线/mm 的金属光栅选频, 观察到了 $^{14}\text{CO}_2$ 的 $00^0_1-(10^0_0, 02^0_0)_I$ 带(下文中简称 I 带) P 支 [$P(4) \sim P(42)$] 和 R 支 [$R(4) \sim R(42)$] 的激光跃迁谱线共 40 条, 其中的一条谱线 $P(4)$, $\tilde{\nu} = 862.97 \text{ cm}^{-1}$, 据我们所知是以前从未观测到的, 该波数与美国林肯实验室的 Freed 等人发表的计算值十分符合。另外还测到 $^{12}\text{CO}_2$ 的 I 带 P 支 [$P(10) \sim P(34)$] 和 R 支 [$R(12) \sim R(28)$] 的激光跃迁谱线 22 条。表 1 给出了 $^{14}\text{CO}_2$ 的谱线测量值和 Freed 等人用拍频法所得到的测量值。从表 1 所见二者结果是一致的。 $^{14}\text{CO}_2$ 的强支线 $P(20)$ 、 $R(20)$ 输出功率均在 4.0 W 以上, 并可进一步提高。

当改用 75 线/mm 金属光栅选频时, 我们进一步测到 $^{12}\text{CO}_2 00^0_1-(10^0_0, 02^0_0)_{II}$ 带

表 1 $^{14}\text{CO}_2$ 激光谱线

00 ⁰ ₁ -(10 ⁰ ₀ , 02 ⁰ ₀) _I					
R 支			P 支		
LINE	测量值 ±0.25 [cm ⁻¹]	文献值 ^[6] [cm ⁻¹]	LINE	测量值 ±0.25 [cm ⁻¹]	文献值 ^[6] [cm ⁻¹]
4	869.96	869.69	4	862.97	862.99*
6	871.44	871.47	6	861.42	861.40
8	873.04	871.96	8	859.78	859.79
10	874.32	874.43	10	858.14	858.16
12	875.81	875.88	12	856.52	856.52
14	877.32	877.32	14	854.79	854.86
16	878.61	878.74	16	853.18	853.18
18	880.35	880.15	18	851.58	851.48
20	881.55	881.54	20	849.78	849.78
22	882.86	882.91	22	848.00	848.06
24	884.28	884.27	24	846.32	846.32
26	885.60	885.61	26	844.55	844.56
28	886.93	886.93	28	842.80	842.79
30	888.26	888.23	30	841.05	841.00
32	889.59	889.52	32	839.21	839.20
34	890.93	890.79	34	837.39	837.37
36	892.17	892.04	36	835.57	835.54
38	893.40	893.28	38	833.67	833.68
40	894.65	894.50	40	831.88	831.81
42	895.78	895.70	42	830.00	829.93

* 系计算值

P 支 [$P(12) \sim P(30)$] 和 R 支 [$R(12) \sim R(24)$] 的激光谱线 17 条, 还增测到了 $^{12}\text{CO}_2$ I 带 R(10) 线。由于光栅闪耀波长为 $10 \mu\text{m}$, 不利于 $^{14}\text{CO}_2$ 的激光振荡, 所以 $^{14}\text{CO}_2$ 的激光输出谱线略有减少。又因光栅零级耦合输出率减小, $^{12}\text{CO}_2$ 和 $^{14}\text{CO}_2$ 的激光输出功率均有明显下降, 但 $^{14}\text{CO}_2$ 的各激光强度仍比 $^{12}\text{CO}_2$ 的各对应线强得多。

我们的实验中始终没有观察到 $^{14}\text{CO}_2 00^0_1-(10^0_0, 02^0_0)_{II}$ 带的激光跃迁, 说明该

带增益系数太小。这与文献 [7] 所给出的结果是一致的。表 2 列出了文献 [7] 各种纯同位素的小信号增益系数。从表中可见 $^{14}\text{CO}_2$ 用 $00^01-(10^00, 02^00)_{II}$ 带的增益系数是十分小的。其增益系数小的主要原因是费米共振效应起了决定的作用 [8]。

表 2

带	小信号增益	$^{12}\text{CO}_2$	$^{13}\text{CO}_2$	$^{14}\text{CO}_2$
I	$\alpha_0(\% \text{cm}^{-1})$	1.07	0.64	0.55
II	$\alpha_0(\% \text{cm}^{-1})$	0.9	0.26	0.099
测量	$\frac{\alpha_0 - I}{\alpha_0 - II}$	1.2	2.5	5.6

2. 同位素竞争效应

从图 2 中可以看出 $^{14}\text{CO}_2$ I 带的激光谱线比 $^{12}\text{CO}_2$ 的对应带激光谱线出得多，而且强。当我们改变 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 的比例后，发现尽管 $^{14}\text{CO}_2$ 的成分由 60% 降低到 40%，而且光栅闪耀波长为 $10 \mu\text{m}$ ，不利于 $^{14}\text{CO}_2$ 激光振荡的情况下， $^{14}\text{CO}_2$ 的激光输出谱线仍变化不大，激光辐射始终占优势，例如 $^{14}\text{CO}_2$ 的 I 带 $R(20)$ 比 $^{12}\text{CO}_2$ 的 $R(20)$ 输出功率仍大三倍。

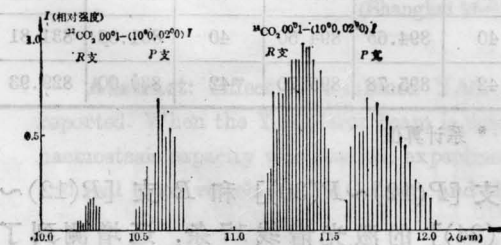


图 2 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器的谱线分布

$I = 8 \text{ mA}$ $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4.2$

总气压 $18.2 \pm 0.2 \text{ Torr}$

$^{14}\text{CO}_2: ^{12}\text{CO}_2 = 60\%:40\%$

镀金反射镜 ($R=3\text{m}$) + 80 线/mm 金属光栅

(闪耀波长 $11 \mu\text{m}$)

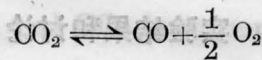
从表 2 中可以看出，在 $^{12}\text{CO}_2$ 和 $^{14}\text{CO}_2$ 单独存在的情况下， $^{12}\text{CO}_2$ I 带 $P(20)$ 的小信号增益系数比 $^{14}\text{CO}_2$ 相应的谱带小信号增益系

数约大一倍，而当 $^{12}\text{CO}_2$ 和 $^{14}\text{CO}_2$ 气体混合时，实验观察到的现象却与此恰恰相反。

我们认为这是同位素竞争效应所造成的。Green 等人 [9] 在 $^{12}\text{CO}_2$ - $^{13}\text{CO}_2$ 同位素激光器中也观察到了类似的同位素竞争效应。他们的理论解释同样也适用于我们 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器的情况。

CO_2 两种同位素之间的共振能量交换几率是很大的 [10, 11]，因而它们之间有良好的耦合。在 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 的激光上能级 (00^01) 各自实现粒子数反转的同时，激光上能级同位素分子之间亦会很快地达到玻尔兹曼平衡。而 $^{14}\text{CO}_2$ 激光上能级的振动能约比 $^{12}\text{CO}_2$ 激光上能级的振动能低 123 cm^{-1} [5]，因此玻尔兹曼分布将更有利于 $^{14}\text{CO}_2$ 激光上能级的粒子数分布。

此外在放电过程中 CO_2 将会发生分解，



分解形成的 CO 同位素分子亦会与 CO_2 同位素分子发生能量交换。根据 J. Siddoway [5] 所发表的 CO_2 同位素分子的能级值，E. Plyer [12] 等人给出的 CO 同位素第一振动激发态的能级值，以及 Herzberg 关于同位素分子振动能的计算，我们估计 $^{12}\text{CO}(\nu=$

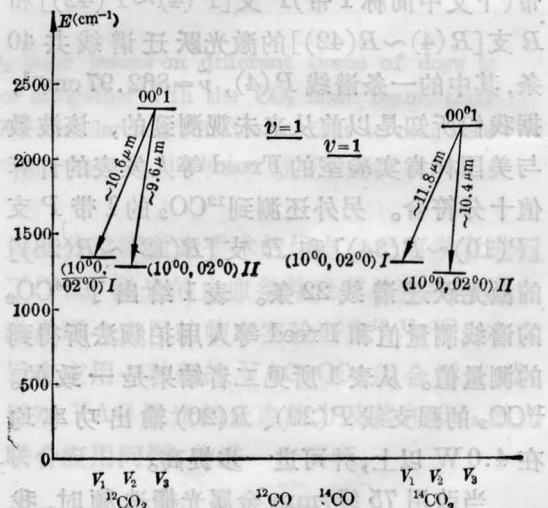


图 3 CO_2 同位素振动能级简图

1) 和 $^{14}\text{CO}(v=1)$ 的振动能级比 $^{14}\text{CO}_2(00^01)$ 的振动能级分别低 83 cm^{-1} 和 172 cm^{-1} 左右,^[12] 而比 $^{12}\text{CO}_2(00^01)$ 的振动能级分别低 206 cm^{-1} ^[12] 和 295 cm^{-1} 。如图 3 所示, ^{12}CO 和 ^{14}CO 的振动能级更接近 $^{14}\text{CO}_2(00^01)$ 的振动能级, 进一步有利于 $^{14}\text{CO}_2$ 激光上能级的粒子数分布。最终的结果是 $^{14}\text{CO}_2$ 的激光辐射跃迁在 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光振荡器中占优势。

四、结 束 语

我们研制了一台选频 $^{14}\text{CO}_2$ - $^{12}\text{CO}_2$ 同位素激光器, 使通常 $^{12}\text{CO}_2$ 激光器的光谱范围从 $9\sim 11\ \mu\text{m}$, 扩展到了 $9\sim 12\ \mu\text{m}$ 。

同位素竞争效应的存在使我们看到混合式的 CO_2 同位素激光器不仅可以比各种纯 CO_2 同位素的激光器有更大的谱线输出范围, 而且可以节省十分昂贵的稀有同位素 $^{14}\text{CO}_2$ 或 $^{13}\text{CO}_2$, 如果把 $^{14}\text{CO}_2$ 、 $^{13}\text{CO}_2$ 和 $^{12}\text{CO}_2$ 三者由小到大的一定比例混合起来, 也许可以获得更多的激光输出谱线。

作者对吴映菊、吕善华和梁明清等同志在技术上给予的帮助, 表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] G. K. N. Patel; *Phys. Rev.*, 1964, **136**, No. 5A, 1187~1193.
- [2] I. Wieder, G. B. McCurdy; *Phys. Rev. Lett.*, 1966, **16**, No.13, 565~567.
- [3] G. B. McCurdy, I. Wieder; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, **QE-2**, 385~387.
- [4] G. B. Jacobs, H. C. Bowers; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 6, 2692~2693.
- [5] J. C. Siddoway; *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**, 4854~4855.
- [6] Charles Freed *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**, No. 11, 1195.
- [7] Charles Freed; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**, No. 8, 1220~1228.
- [8] M. Silver *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, 4566~4568.
- [9] W. H. Green, W. T. Whitney; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, No. 1, 437.
- [10] J. C. Stephenson *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1968, **48**, 4790.
- [11] R. D. Sharma; *Phys. Rev.*, 1969, **177**, 102.
- [12] E. K. Plyer *et al.*; *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, (us), 1955, **55**, 183.