

双波长稳频 CO₂ 激光

朱 勤

(深圳大学精仪系, 深圳 518060)

王 晶

(中国科学院声学所, 北京 100080)

A dual-wavelength frequency stabilized CO₂ laser with four operating frequencies

ZHU Qin

(Department of Precision Instruments, Shenzhen University, Shengzhen 518060)

WANG Jing

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract A dual-wavelength frequency stabilized CO₂ laser with a wide band dispersion cavity is described. A sequence of four operating frequencies can be composed on only one *P-P* line pair. The signature in this multi-frequency CO₂ laser is unvaried and permanent. The frequency stabilities of simultaneous oscillations are about several parts in 10¹⁰ (sample time 10 sec.).

Key words dual-wavelength CO₂ laser, four operating frequencies, frequency stabilization, multi-wavelength interferometry

本文的研究结果和现行的 CO₂ 激光的稳频方法^[1~3]有较大不同,它只有一个 *P-P* 线对,不但有永久固定的线序(signature),而且可以在四个运转频率中快速地成对切换。此四个工作频率分属两个波长,每个波长的频率稳定度都在 10¹⁰ 量级,由四个工作频率形成的二级合成波长可达到米级。这对于无导轨的绝对距离干涉计量学极有意义。

1 基本原理

本文所研究的这种多频稳频 CO₂ 激光工作原理基于以下各点:

1.1 宽带色散腔

作者设计了一个固定调谐的宽带色散腔,它的色散特性如图 1 所示,允许两个谱线 *G*₁, *G*₂(例如 10*P*(22) 和 10*P*(20)) 同时在损耗曲线之上,故这两条谱线是可以同时起振的。究竟如

何起振取决于原始腔长及其调谐。



Fig. 1 Two lines G_1 and G_2 may oscillate
The curve α is the loss of the dispersion cavity

1.2 特定腔长条件

若我们已选定 $10P(22)$ 和 $10P(20)$ 为工作双波长。它们的谱线中心频率分别为 f_{22}, f_{20} ，并出于一些技术上的考虑使

$$f_{20} - f_{22} = \{n + (1/2)\} \cdot \{c/2[L]\}$$

此处 $n = 1, 2, 3, \dots$; $[L]$ 是光学腔长; c 为光速。此时腔的纵模排列如图 2 所示。 $(q + 1), q, (q - 1), \dots, (q - n), \dots$ ，是腔的纵模序列。若 q 模恰好位于 I_1 线中心，则按上述条件，不会有纵模位于 I_2 中心，而是某一对相邻模(如 $[q - n]$ 和 $[q - n - 1]$) 对称地跨在 I_2 中心两侧。于是我们进行腔长调谐，就有可能使 q 模， $(q - n)$ 模分别位于 A 和 A' 达到两线出光相等。反之我们朝另一方向调谐则有可能使 q 模， $(q - n - 1)$ 模分别位于 B 和 B' 处，也达到两线同时出光并且光强相等。

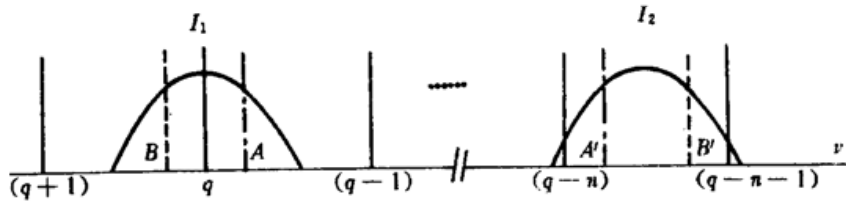


Fig. 2 Under "cavity length condition": Tuning laser cavity length, mode q and $(q - n)$ could be moved to positions A and A' respectively. In another case mode q and $(q - n - 1)$ could be moved to positions B and B' respectively

还要着重指出的是：在 $A - A'$ 状态下，若向光频增大方向调谐，光强差 $(I_2 - I_1)$ 是从负到正，而在 $B - B'$ 状态下， $(I_2 - I_1)$ 则从正到负，这就奠定了我们可以用电子伺服电路辨别 $A - A'$ 状态或 $B - B'$ 状态的基础。

按上述条件，光学腔长 $[L]$ 应为

$$2[L] = \{n + (1/2)\} \cdot \{c/(f_{20} - f_{22})\} = \{n + (1/2)\} \cdot 5.523 \text{ (mm)}$$

L 的最后选定尚需参考下一个条件。

1.3 线宽条件

由均匀展宽、非均匀展宽多种因素决定的激光线宽(实际上应考虑“出光线宽”)应和腔的纵模间隔有一定的关系，保证两谱线达到等光强时都是单纵模工作，而且使等光强点 A, A', B, B' 都能得到合适的分布。在本文的研究中纵模间隔约 170 MHz，而出光线宽受较高损耗影响约为 115 MHz。

1.4 谱线竞争的交叉耦合效应

作者详细计算了并联双跃迁系统的谱线竞争效应^[4]，并提出了以“交叉耦合效比”来描述双谱线同时振荡时它们的行为。

交叉耦合比 C_1, C_2 是

$$C_1 = \theta_{12}/\beta_1; \quad C_2 = \theta_{21}/\beta_2$$

此处 β_1, β_2 为谱线 1, 2 的自饱和系数; θ_{12}, θ_{21} 为谱线 2 对 1 (或 1 对 2) 的交叉饱和系数。

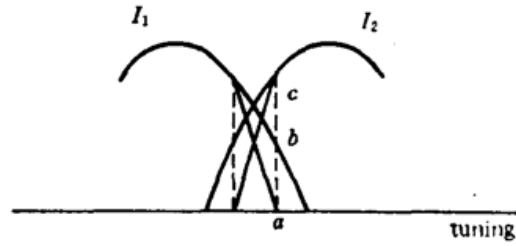


Fig. 3 Switching process of competition between two lines

图 3 表示谱线 1, 2 的光强随腔长调谐的变化, 其中细线为各谱线单独振荡时的曲线, 粗线为双谱线同时振荡时的光强曲线, 由于交叉耦合效应, 双波长同时振荡时的上升和下降都更为陡峭, 在文献[4]中已经得出

$$C_1 = ab/ac$$

这样 C_1 (及 C_2) 不但可以理论计算, 还可以实验测定。

于是图 2 中的 A, A' (或 B, B') 就不再与图 3 中细线的交点对应, 而变成粗线的交点—两谱线光强急剧上升 (及下降) 达到相等的点, 将激光器调谐在这一点上, 便得到实际的稳频判据。双波长进行同时稳频的理论依据便是基于这一谱线竞争效应之上的。

2 稳频激光器的结构组成

图 4 示出了双波长稳频 CO₂ 激光器的结构原理。一个专门设计的不锈钢光栅具有宽带色散特性, 选出 $10P(22)$ 和 $10P(20)$ 成为工作的 $P-P$ 线对, 此光栅的固定座和整个激光器的管体全都由零膨胀玻璃制成。此外, 布儒斯特窗、输出镜和阴极部分的设计都保证具有极高的热稳定性。激光器的腔长为 0.9 m, 放电管的气压为 2.39×10^3 Pa。激光器电源是恒流型, 噪音电平小于 0.1%。伺服系统由斩波器、红外探测器、锁定放大器、差动放大器、反相器、比例积分微分单元、高压放大器和压电陶瓷 (PZT) 组成。

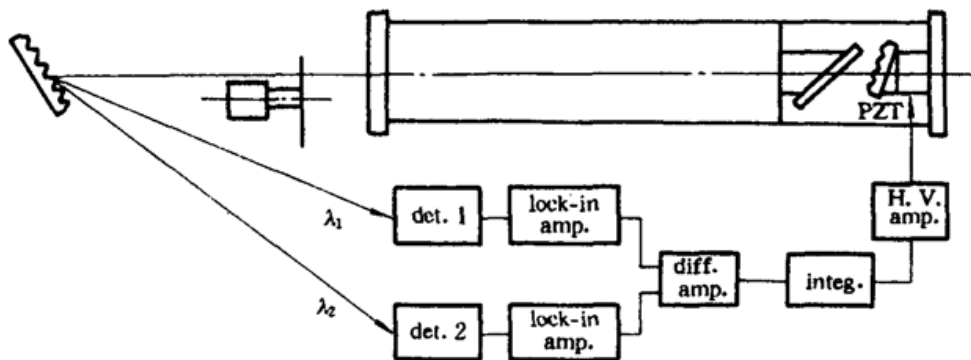


Fig. 4 Configuration of dual-wavelength frequency stabilized CO₂ laser and servo system

此处的反相器是用来选择和切换整个伺服系统, 使激光器工作在 $A - A'$ 状态或 $B - B'$ 状态 (见图 2), 即改变反相器的极性, 处于同相或反相状态达到在四个运转频率中进行成对切换, 此时压电陶瓷 PZT 上的电压值也相应地改变一个与半个纵模间隔相对应的当量。

在进行腔长调谐时可以得到两波长输出光强相互切换的曲线, 如图 5 所示, 两个对应的等光强点分别和 $A - A'$ 或 $B - B'$ 相对应, 还可以由此曲线实验测定交叉耦合比的数值。

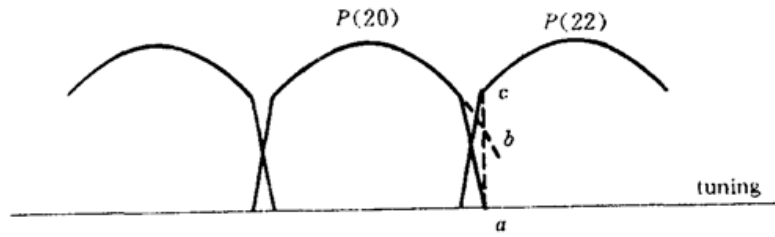


Fig. 5 Output intensity for every line in dual wavelength CO_2 stabilized laser vs tuning of cavity's length

3 双波长稳频激光器的性能

众所周知,影响 CO_2 激光器频率稳定性的因素是十分复杂的,工作气体的压力、放电管的放电电流都会引起谱线的频移,尤其是现在工作模不位于谱线中心,故模牵引和模推斥效应有重大的影响,而这两个效应与激光器的增益与损耗的变动有密切的关系,在实验中发现若损耗变化 1% 左右,它将引起工作模的移动量大约为 12 kHz。因而在系统中采取了一系列严格的措施使增益与损耗的变动降低到最低限度。例如为使衍射损耗变化最小,激光器结构各单元都选用了热稳定性极高的材料。为使布氏窗和输出窗所引起的损耗变化最小,对其采用了特殊的致冷措施。值得一提的是伺服腔长的压电陶瓷(PZT)工作伸长较大(超过 $10 \mu\text{m}$),必须在整个伸长过程中引起的倾斜小于 $0.2''$ 。

为了测量双波长稳频激光器的频率稳定度,研制了两个长度、结构基本相仿的稳频激光系统,都同时输出 $10P(22)$ 和 $10P(20)$ 两波长,对其进行 2 h 以上的拍频实验。同时发射双波长的频率稳定度为:对 $10P(22)$ 为 4.3×10^{-10} (12.2 kHz) 取样时间 10 s;对 $10P(20)$ 为 4.9×10^{-10} (13.8 kHz) 取样时间 10 s。

4 结 语

本文报道了具有四个运转频率的双波长二氧化碳稳频激光系统,由于它只采用了一个 P - P 线对,所以线序是不变的、永久的。同时由于设计时满足了特定的腔长条件。所以它的四个工作频率 f_A, f_A', f_B, f_B' (见图 2) 存在一个特殊的关系,可得一级合成波长 λ_s 为

$$\lambda_s = c / (f_{A'} - f_A)$$

另一个一级合成波长 λ_s' 为

$$\lambda_s' = c / (f_{B'} - f_B)$$

由此可以得到二级合成波长 λ_{s2} 为

$$\lambda_{s2} = \lambda_s \cdot \lambda_s' / (\lambda_s - \lambda_s')$$

根据本文所提出的腔长条件可以导出

$$\lambda_{s2} = 2[L]$$

此处,因模牵引量和模推斥量和纵模间隔相比属微量,在计算时未曾计入。

由于通常 $[L]$ 在 0.5 m 到 1 m,故二级合成波长是一个米级以上的长度值。在绝对距离干涉计量学中通常要用几个 P - P 或 P - R 线对才能实现如此长的合成波^[1~3],而本文只用了一个 P - P 线对是十分方便的,尤其是本文所报道的激光系统可以极其方便地在四个运转频率间通过电子反相电路将其成对地反复切换,具有很高的实用价值。与此同时,同时发射双波长的频

率稳定度已达 10^{-10} 量级,完全可以满足无导轨绝对距离干涉计量学和其它激光技术领域的要求。

在本文的研究过程中曾得到王大珩教授、梁晋文教授的指导帮助,谨表衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 H. Matsumoto, *Appl. Opt.*, **25**, 493~498(1986)
- 2 C. J. Walsh, *Rev. Sci. Instrum.*, **56**, 1582~1585(1985)
- 3 C. W. Gillard, *Opt. Engin.*, **22**, 348~353(1983)
- 4 朱 勤, 深圳大学学报(理工版), **8**(3~4), 15~20(1991)

(收稿日期:1992年8月31日;收到修改稿日期:1992年11月12日)