

# 射频激励双通道不等长电极波导 CO<sub>2</sub> 激光器的外差频率调制研究

王 骥 田兆硕 李自勤 王雨三

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 报道了采用不等长电极结构的射频激励双通道波导 CO<sub>2</sub> 激光器, 通过调节射频电源功率的方法可以调谐双通道输出激光的外差频率, 其调谐率约为 0.1 MHz/W。在未采取任何稳频措施时, 其短期外差频率稳定性可达  $10^{-10}$ 。还在理论上分析了射频功率调谐外差频率的原理。

**关键词** 双通道不等长电极, 射频激励波导 CO<sub>2</sub> 激光器, 外差频率调制。

## 1 引 言

具有高外差频率稳定性的激光光源已广泛应用在激光雷达、高分辨分子光谱学、计量测试、气体成分分析等许多领域<sup>[1-3]</sup>。目前, 为获得高频率稳定的外差信号, 多采用两台独立的激光器, 装配较为复杂的稳频装置及偏频锁定装置, 使激光器体积较大, 造价高。1990 年 Abramki 等人<sup>[4]</sup>报道了采用射频激励波导 CO<sub>2</sub> 激光器列阵获得外差信号的方法, 通过调节输出镜角度达到了调节外差频率的目的, 并且短期外差频率稳定性可达  $10^{-10}$ 。1991 年他们又报道了采用附加射频功率调制方法获得外差频率调制<sup>[5]</sup>。

为了给相干激光雷达提供小型紧凑、高外差频率稳定度理想的光源, 我们在以上研究成果的基础上, 设计了双通道不等长电极射频激励波导 CO<sub>2</sub> 激光器。其中长通道输出激光功率高, 作为主振激光器; 短通道输出激光功率较低, 作为本振激光器。通过直接调节激光器射频注入功率的方法可以调谐两通道输出激光的外差频率, 其外差频率稳定度可达  $10^{-10}$ 。

## 2 射频功率外差调制原理分析

进行射频功率外差调制的激光器结构如图 1 所示。其中双通道的上下铝电极各为一体, 长通道长 400 mm, 短通道长 200 mm, 波导截面 2.25 mm × 2.25 mm, 两波导通道间距 14 mm。上下电极压紧三片 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片构成两个不等长波导通道。为减少传输损耗, 短电极通道前压有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷块。根据理论分析, 上下电极间并联 7 个等值的谐振电感, 并联谐振于射频源频率。实验测得电压沿电极纵向分布均匀<sup>[6]</sup>。两通道共用反射率为 99% 的硅全反镜, 距两通道波导口 10 mm (见图 2)。输出镜反射率为 90%, 距双通道输出端波导口 10 mm。全反镜及输出镜压紧氟橡胶 O 型圈进行密封, 并可以调节角度。

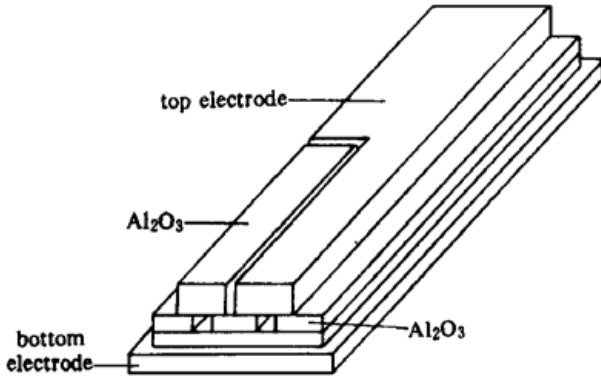


Fig. 1 Structure of the laser

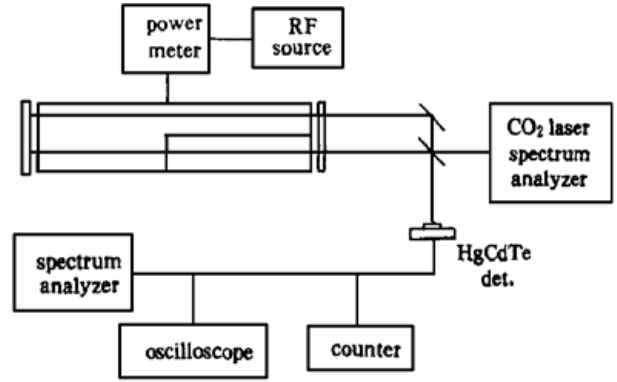


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement

根据理论分析, 激光器的频率漂移  $\Delta\nu$  受腔长变化  $\Delta L$  及工作气体折射率变化  $\Delta n$  的影响可表示为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\nu = -\nu_0 \left( \frac{\Delta n}{n_0} + \frac{\Delta L}{L} \right), \tag{1}$$

式中  $n_0$  为工作气体折射率平均值,  $L$  为腔长。腔长的变化主要受环境振动、外界温度变化、声波干扰等因素的影响。由于双通道激光谐振腔共用全反镜及输出镜, 因此腔长近似相等, 并且两通道间隔较近, 所以受这些影响而产生的腔长变化趋势是一致的。这样就使两通道激光外差频率几乎不受腔长变化的影响。另外因加在两通道上的电压相等, 当射频注入功率变化时, 两通道气体放电等离子体折射率变化相等。但由于两通道不等长, 由 (1) 式推出, 两通道激光因折射率变化而产生的外差频率漂移为:

$$\Delta\nu_c = \mp \nu_0 \frac{\Delta n}{2n}. \tag{2}$$

当长通道激光频率  $\nu_l$  大于短通道输出激光频率  $\nu_s$  时,  $\Delta\nu_c$  为负; 当  $\nu_l$  小于  $\nu_s$  时,  $\Delta\nu_c$  为正。腔内工作气体折射率可表示为<sup>[5]</sup>:

$$n = 1 + \sum_i \frac{\alpha_i}{2\epsilon_0} N_i - \frac{n_e e^2}{8\pi\epsilon_0 m \nu_0}, \tag{3}$$

式中  $N_i$  为各气体成分粒子数密度,  $\alpha_i$  为各种气体极化率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数。式中最后一项是由于等离子体电子数变化而产生的折射率变化。其中  $N_e$  为电子密度<sup>[8]</sup>,  $m$  为电子质量,  $\nu_0$  为激光频率。当射频注入功率变化时, 引起工作气体温度发生变化,  $\text{CO}_2$  分子离解率也发生变化, 并导致各气体组分平均极化率发生变化。因此由于 (3) 式第二项引起的频率漂移为:

$$\frac{d\nu_{c1}}{dW} = + \frac{\nu_0 \bar{\alpha} P}{2\epsilon_0 k T} \left( \frac{1}{T} \frac{dT}{dW} - \frac{1}{\bar{\alpha}} \frac{d\bar{\alpha}}{dW} \right), \tag{4}$$

式中  $\bar{\alpha}$  为平均极化率,  $T$  为工作气体温度,  $P$  为充气气压。括号中第二项为  $\text{CO}_2$  气体离解率引起平均极化率变化, 从而使频率漂移。由于等离子体温度随注入功率增加而增加,  $\text{CO}_2$  离解也逐渐增加, 导致平均极化率微弱减小, 因此总效果是激光功率随注入功率增加而增加。由 (3) 式最后一项引起的频率变化为:

$$\frac{d\nu_{c2}}{dW} = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m \nu_0} \frac{dN_e}{dW}, \tag{5}$$

将 (4) 式、(5) 式代入 (2) 式可得出由折射率变化而引起的外差频率变化为:

$$\frac{d\nu_s}{dW} = \pm \frac{1}{2} \left[ \frac{\nu_0 \bar{\alpha} P}{2\epsilon_0 k T} \left( \frac{1}{T} \frac{dT}{dW} - \frac{1}{\bar{\alpha}} \frac{d\bar{\alpha}}{dW} \right) + \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m \nu_0} \frac{dN_e}{dW} \right]. \quad (6)$$

当长通道输出激光频率  $\nu_l$  大于短通道输出激光频率  $\nu_s$  时, (6) 式为正, 当  $\nu_l$  小于  $\nu_s$  时, (6) 式为负。式中由电子密度变化引起的频率变化小于总频率变化量的 0.5%, 可以忽略<sup>[5]</sup>。

由于双通道不等长共用同一谐振腔, 可以补偿由于腔长变化而引起的外差频率变化, 并可以部分补偿由于折射率变化而引起的外差频率变化[据(2)式], 所以其外差频率稳定度很高, 激光器频率偏差可以用双取样阿仑方差表示:

$$\sigma^2(2, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\nu_{2i} - \nu_{2i-1}}{2} \right)^2, \quad (7)$$

式中  $\nu_{2i}$ 、 $\nu_{2i-1}$  为在取样平均时间  $\tau$  内连续测量两个相邻的激光外差频率,  $N$  为激光外差频率对数, 则激光器的外差频率稳定度为:

$$S = \frac{\sqrt{\sigma^2(2, \tau)}}{\nu_0}. \quad (8)$$

### 3 实验结果及讨论

实验装置如图 2 所示。实验中激光器充入混合气体气压比例为  $P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{N}_2} \cdot P_{\text{He}} = 1 \cdot 1 \cdot 3$ , 充气气压为 8 kPa, 射频电源频率为 120 MHz, 输出功率 0~320 W 可调。通过微调移动全反镜或微调全反镜角度可以容易获得两个不等长通道同时输出同一支激光。典型情况下, 长通道输出  $P(20)$  支激光功率 8 W, 短通道输出  $P(20)$  支激光为 1 W。两通道激光合束后, 经衰减入射到液氮冷却带宽为 300 MHz 的 Hg Cd Te 光伏探测器上, 经前置放大器放大后由 TR4110M 频谱分析仪观测其频谱, 数字频率计记录外差频率, 由带宽为 1 GHz 的 TDS684A 数字存储示波器观察外差波形。由 (6) 式可知, 当长通道激光频率  $\nu_l$  大于短通道输出激光频率  $\nu_s$  时, 外差频率随着射频注入功率增加而增加, 实验结果如图 3 所示, 外差频率变化量为 0.086 MHz/W。当  $\nu_l$  小于  $\nu_s$  时, 其外差频率随着射频注入功率增加而减小, 实验结果如图 4 所示, 外差频率变化量为 0.1 MHz/W。

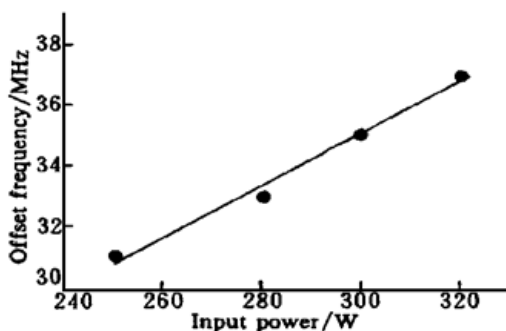


Fig. 3 Offset frequency vs input power for  $\nu_l > \nu_s$  at the pressure of 8 kPa

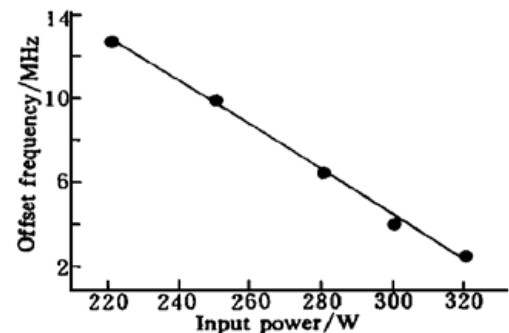


Fig. 4 Offset frequency vs input power for  $\nu_l < \nu_s$  at the pressure of 8 kPa

在本实验条件下, 假设激光器波导通道轴向热力学温度值  $T$  为 650 K<sup>[5]</sup>, CO<sub>2</sub> 近似有 60% 分解<sup>[9]</sup>, 估算出  $\bar{\alpha} = 1 \times 10^{-40}$ ,  $d\bar{\alpha}/dW = 2 \times 10^{-44}$ ,  $dT/dW = 1 \text{ K/W}$ 。由 (6) 式可得出外差频率变化为 0.13 MHz/W, 比实验结果略高。作者认为这主要是由于忽略短电极通道内未放电部分温度变化而引起的。

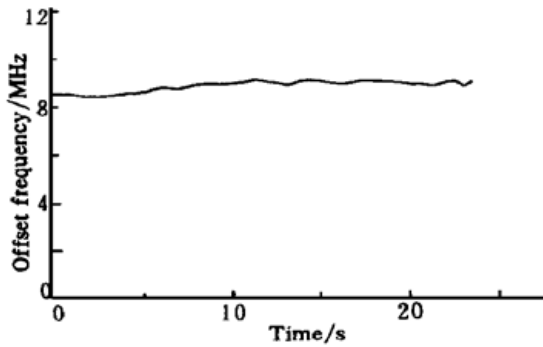


Fig. 5 Variation of offset frequency vs time

当射频注入功率固定不变时,测得其外差频率随时间变化如图 5 所示。在 25 秒内外差频率漂移量小于 0.5 MHz,在取样时间间隔 200 ms 时,取 200 个激光外差频率,由 (7) 式、(8) 式可计算出短期外差频率稳定度可达到  $6 \times 10^{-10}$ 。因此采用双通道不等长电极射频波导的激光器不仅可以获得很高的频率稳定度,而且还可以方便地用调节射频源功率的方法调谐外差频率。

### 参 考 文 献

- [1] Pearson G N, Rye B J. Frequency fidelity of a compact CO<sub>2</sub> Doppler lidar transmitter. *Appl. Opt.*, 1992, **31** (30): 6475~ 6484
- [2] 蔡善时, 计世藩. 激光相干成像雷达在精确制导中的应用前景. *红外激光与技术*, 1991, **20** (2): 13~ 17
- [3] 文东旭, 郭静如. 红外激光外差气体分析仪信号分析. *光学学报*, 1983, **3** (2): 138~ 145
- [4] Abramski K M, Colley A D, Baker H J *et al.*. Offset frequency stabilization of RF excited waveguide CO<sub>2</sub> laser arrays. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26** (4): 711~ 717
- [5] Colley A D, Abramski K M, Baker H J *et al.*. Discharge-induced frequency modulation of RF excited waveguide lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27** (7): 1939~ 1945
- [6] 田兆硕, 王雨三, 刘逢梅等. 射频波导激光器电极参数的测量. *中国激光*, 1999, **A26** (2): 135~ 140
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈家骅. *激光原理*. 北京: 国防工业出版社, 1987: 195~ 201
- [8] Griffith G A. Transverse RF plasma discharge characterization for CO<sub>2</sub> waveguide laser. *Proc. SPIE*, 1980, **227**: 6~ 11
- [9] McArthur, B A, Tulip J. CO<sub>2</sub> dissociation in sealed RF-excited CO<sub>2</sub> waveguide lasers. *Rev. Scient. Instrum.*, 1988, **59** (5): 712~ 715

## Study of Offset Frequency Modulation of RF Excited Waveguide CO<sub>2</sub> Laser with Two Unequally Long Electrode Channels

Wang Qi Tin Zhaoshuo Li Ziqin Wang Yusan

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 25 May 1999; revised 29 August 1999)

**Abstract** Rf excited two-channels waveguide CO<sub>2</sub> laser with the construction of unequally long electrode is present. The offset frequency of laser from the two channels can be changed by adjusting the RF input power, the slope of the tuning is about 0.1 MHz/W. The offset frequency stability of short term can be up to the order of  $10^{-10}$  without any additional measure being taken to stabilize the frequency. In addition, a theoretical analysis is made for the offset frequency being tuned by RF input power.

**Key words** two unequally long electrode channels, RF excited waveguide CO<sub>2</sub> laser, modulation of offset frequency.