

## 10.6 $\mu\text{m}$ 激光斯塔克盒稳频系统

胡渝 朱大勇 叶乃琼 李贤

(电子科技大学, 成都, 610054)

**提要:** 本文报道在常规 10.6 $\mu\text{m}$  激光系统中采用斯塔克盒(Stark cell)建立的 10.6 $\mu\text{m}$  双光路斯塔克盒稳频外差系统, 并根据阿仑方差评定及计算机实时处理方法测定了系统的频率稳定性, 其结果为长期稳定性可达  $3.5 \times 10^{-10}$  (取样时间 1s),  $4 \times 10^{-10}$  (取样时间 10s) 及短期稳定性达  $1.57 \times 10^{-9}$  (取样时间 1ms)。

**关键词:** 斯塔克吸收效应, 吸收系数, 稳频, 频率长期稳定性, 阿仑方差

### Frequency stabilization system of 10.6 $\mu\text{m}$ laser with a Stark cell

Hu Yu, Zhu Dayong, Ye Naiqun, Li Xian

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu)

**Abstract:** 10.6 $\mu\text{m}$  heterodyne frequency stabilization systems of two lasers with a  $\text{NH}_2\text{D}$  Stark cell is presented. The frequency stability of this system is measured with Allen variance method and computer processing on time. The measuring results is that long-term and short-term frequency stability is better than  $3 \times 10^{-10}$  and  $1.57 \times 10^{-9}$  when the sampling time is 1s and 1ms respectively.

**Key words:** Stark absorption effect, absorption coefficient, frequency stabilization, long-term stability, short-term stability, Allen variance

### 一、引言

从 70 年代开始世界各发达国家相继开展了激光雷达、制导、测距、通信等研究, 其中许多系统采用了 10.6 $\mu\text{m}$  波段的  $\text{CO}_2$  激光外差探测技术, 故激光稳频及频率自动跟踪成为人们关注的重要研究课题。

利用斯塔克吸收效应稳定 10.6 $\mu\text{m}$  激光频率<sup>[1~3]</sup>, 具有高稳定度, 其频率偏差只有十几 kHz, 长期稳定性可达  $10^{-10}$ , 同时输出光强无调制现象, 并可方便地实现频率自动跟踪。因此, 对  $\text{CO}_2$  激光外差系统中采用斯塔克盒(Stark cell)稳频越来越受到人们重视。文献[4]曾较全面、完整地报道了“10.6 $\mu\text{m}$  近地卫星通信系统”, 该系统采用  $\text{CO}_2$  波导激光器和 Stark cell 稳频及频率自动跟踪技术, 达到数据率为 300 Mbit/s 的系统容量和  $3.5 \times 10^{-9}$  的频率稳定性。80 年代美国及加拿大又先后采用斯塔克盒分别稳定本振激光器及 TEACO<sub>2</sub> 激光器<sup>[3,5]</sup>, 得到了频率长期稳定性优于  $10^{-8}$  量级。1983 年我们曾采用氟化氘( $\text{NH}_2\text{D}$ )斯塔克盒稳定  $\text{CO}_2$  激光频率, 粗略测得其长期频率稳定性可优于  $10^{-9}$  的结果<sup>[6]</sup>。1988 年在国内首次实

现了 CO<sub>2</sub> 激光双光路稳频系统,该系统采用两束激光外差拍频,用阿仑方差评定,计算机实时处理方法,测得激光频率长期和短期稳定性,测试结果均优于目前国外已公布的同类系统的指标。本文将对该系统的理论分析、实验系统及测试结果进行论述。

## 二、理论分析

图 1 给出了 10.6 μm 激光斯塔克盒稳频原理方框图。其中所用 CO<sub>2</sub> 激光器调谐于 P(20)

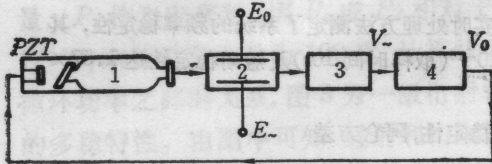


图 1 10.6 μm 斯塔克盒稳频原理方框图

1—CO<sub>2</sub> 激光器; 2—NH<sub>2</sub>D Stark 盒; 3—热释电探测器; 4—伺服系统, E<sub>0</sub>, E<sub>~</sub> 分别为盒上直流及交流调制电压电场 V<sub>~</sub>, V<sub>0</sub>—误差信号的交流、直流电压

支(10.6 μm)。采用充有 NH<sub>2</sub>D 气体的斯塔克盒,它相当于一个频率敏感元件。计算表明<sup>[1]</sup>,当外加直流电场 E=3570 V/cm, NH<sub>2</sub>D 分子的 J=4 转动能级的吸收分量与 CO<sub>2</sub> 激光器 P(20) 支线中心频率重合,产生强烈的共振吸收。改变斯塔克盒上的外加电压,可实现连续控制激光器频率,并得到相应变化规律的吸收系数。由于所采用的斯塔克盒内气体压强较低(1Torr NH<sub>2</sub>D 气体),其

吸收线宽主要由多普勒加宽 Δν<sub>D</sub> 决定,并可认为吸收系数 α 与外加电压产生的激光频偏 Δν' 呈高斯线性函数关系,如图 2 所示。

若在斯塔克盒上加以一个频率为 ω<sub>m</sub> 的正弦调制信号,设为 V=V<sub>m</sub> cos ω<sub>m</sub>t, 则其相应的斯塔克盒的吸收系数及通过盒的透射光强将随激光频率作相应的变化。采用热释电探测器(LiTaO<sub>3</sub>)探测斯塔克盒的透射光强,其输出信号仅与光强的时间变化分量有关,即输出电压信号 u(t) 正比于光强 I(ν, t) 及斯塔克盒吸收系数 α(ν, t) 随时间的变化,即

$$u(t) \propto \frac{dI(\nu, t)}{dt} \propto \frac{d\alpha(\nu, t)}{dt} \quad (1)$$

我们将 u(t) 作为误差信号加到激光器压电陶瓷 PZT 上,即可达到对激光频率的控制。当 ν=ν<sub>0</sub> 时,即激光振荡频率为吸收中心频率时,由图 2 可知,探测器输出信号频率为调制频率 ω<sub>m</sub> 的倍频,该倍频信号可以用来监测斯塔克盒及系统工作情况。若 ν≠ν<sub>0</sub>,激光频率偏离吸收

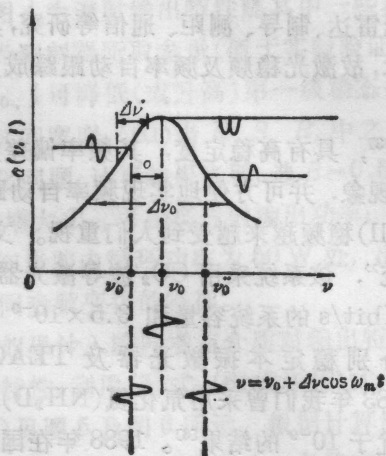


图 2 斯塔克盒吸收系数 α(ν, t) 与激光频偏关系

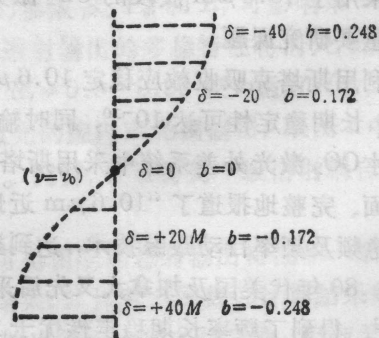


图 3 探测器输出误差信号与频偏的关系曲线

中心频率  $\delta$  时, 探测器输出信号按调制信号频率  $\omega_m$  作周期变化。我们所采用的伺服系统将基波与谐波分离, 并将基波信号作为误差信号加至激光器 PZT 上, 以控制激光振荡频率恢复至中心频率  $\nu_0$  处。实验与计算表明, 在振荡频率偏离中心频率  $\pm 26$  MHz 情况下探测器输出的误差信号与偏离中心频率的频偏  $\delta$  具有准线性关系, 用计算机数值解得到误差信号与频偏的关系如图 3 所示。

### 三、实验系统

图 4 所示为双光路斯塔克盒 10.6 μm 稳频系统方框图。为测量系统的频率稳定性, 采用时域法测量系统的频率变化  $\Delta\nu$ 。具体讲是将两束经稳频的激光进行外差拍频得到中频信号, 测量该中频信号的频率变化, 即代表  $\Delta\nu$ 。通常频率的变化包括有频率随时间的线性漂移及频率随时间的瞬时起伏, 后者为一个无规变化, 它是由系统中各种不稳定因素引起的, 必须采用随机过程处理方法, 求出其起伏方差。分析表明, 阿仑方差则是较好的计算方法<sup>[7,8]</sup>。若设取样周期为  $T$  且等于取样时间  $\tau$ , 取样次数  $N=2$  时, 采用完全同型的激光器, 外界条件完全相同时, 则每支激光器频率稳定性可表示为

$$S = \frac{\delta(\tau)}{\sqrt{2\nu}} = \frac{1}{\sqrt{2\nu}} \sqrt{\frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M (f_i - f_{i-1})^2} \quad (2)$$

式中  $M$  为取样组数,  $\bar{\nu}$  为激光器标称频率,  $f_i$  为第  $i$  次取样频率。

表 1 斯塔克盒主要性能参数

参 数	FSC-1型斯塔克盒
NH <sub>3</sub> :ND <sub>3</sub>	1:1
气 压	133Pa
最大吸收	7%
击穿电压	>600V
谐振电压	P(20):390V

2. 光电稳频伺服系统及微弱误差信号的提取。实验和分析表明, 调制频率较高, 斯塔克盒的鉴频灵敏度也较高, 然而, 在采用低频响应好的室温工作的热释电探测器探测误差信号时, 频率不可选得太高, 故必须仔细、恰当地选择调制频率。为了提取弱至 10 μV 数量级的误差信号, 还需采用极低噪声、适当带宽的前置放大器及锁相技术, 以便较好地抑制噪声, 减小对稳频系统的干扰。在锁相技术中, 需适当选择时间常数, 既能快速稳定和控制激光频率, 又能适应整个系统响应时间。为了系统调测方便, 伺服回路还可监测斯塔克盒二次倍频信号, 以利

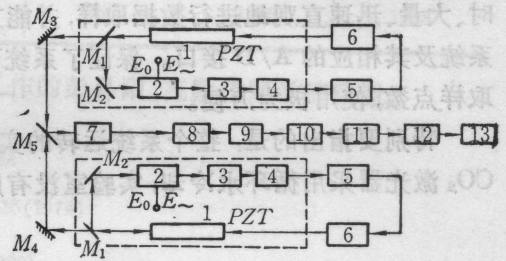


图 4 10.6 μm 双光路斯塔克盒稳频系统

1—CO<sub>2</sub> 激光器; 2—NH<sub>2</sub>D 斯塔克盒; 3—热释电探测器 (LiTaO<sub>3</sub>); 4—低噪声前置放大器; 5—锁相放大器; 6—直流放大器; 7—77K—HgCdTe 探测器; 8—低噪声前置放大器; 9—频率计; 10—A/D 转换器; 11—Apple-II 计算机; 12—显示器; 13—打印机; M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>—全反射镜; M<sub>1</sub>—透镜; M<sub>5</sub>—一分束片

根据测试要求系统应包括以下几个关键的部件, 现分述如下:

1. NH<sub>2</sub>D 斯塔克盒: 它是稳频系统频率敏感元件, 其质量直接影响稳频系统性能。通常要求它具有高的击穿电压、高的吸收系数及长寿命。这些指标均与斯塔克盒的结构设计、制作工艺及 NH<sub>2</sub>D 工作气体浓度及纯度有密切关系。我们自制的斯塔克盒其主要参数见表 1。

于斯塔克盒工作点的正确选择。最后还要提到,所用探测器具有室温工作特点,避免了液氮致冷的探测方法,这给系统调测、使用带来极大的好处,但该类器件具有  $10^{13} \Omega$  的高阻特点,因此,整个伺服系统必须良好接地和屏蔽,以防止 50 Hz 及外界电的干扰,才能保证系统稳定工作。

3. 双光路外差拍频系统。我们选用了两只质量较好的单频、单模的全石英玻璃结构的半外腔  $\text{CO}_2$  激光器;并用两只性能相同的斯塔克盒组成稳频系统以进行外差拍频。对光外差回路中的光功率,空间光场的匹配、调准及光外差的信噪比作了较深入的分析、计算<sup>[9]</sup>,并将结果应用于实际调整中,获得了调整方便、迅速、信噪比高的满意结果。所得的光外差中频信号再经过电子学系统处理,以达到驱动计数器正常工作。

4. 计算机实时测量和数据处理装置。为满足阿仑方差的计算及实际测量的要求,需实时、大量、迅速直观地进行数据取样,并能方便地直接显示、打印。为此建立了计算机实时处理系统及其相应的 A/D 接口。保证了系统可以任意选择取样时间(1 ms~10 s)及任意连续选择取样点数,使用极为方便。

特别要指出的是:整个系统运转的实验室位于七层高楼上,无任何恒温及特殊防震措施; $\text{CO}_2$  激光器采用循环水冷却;实验室没有屏蔽装置;采用一般电源供电,得到了满意结果。

#### 四、测试 结 果

表2、3分别给出了连续锁定 1 小时的长期频率稳定性及不同取样时间测得的系统稳定性。

表 2 系统长期频率稳定性

取样时间	取样次数 (次)	取样间隔 (分)	拍频频率平均值 (MHz)	稳定性
1s	300	7	37.608	$3.24 \times 10^{-10}$
1s	300	7	37.294	$3.26 \times 10^{-10}$
1s	300	7	37.357	$2.93 \times 10^{-10}$
1s	300	7	27.393	$3.27 \times 10^{-10}$
1s	300	7	37.209	$3.49 \times 10^{-10}$
1s	300	7	37.171	$2.80 \times 10^{-10}$

表 3 不同取样时间频率稳定性

取样时间	拍频频率平均值 (MHz)	稳定性
10s	36.908	$4.04 \times 10^{-10}$
1s	36.925	$2.32 \times 10^{-10}$
100 ms	36.947	$6.47 \times 10^{-10}$
10 ms	36.790	$1.72 \times 10^{-9}$
1 ms	36.836	$1.57 \times 10^{-9}$

#### 五、结 束 语

实验与分析表明,采用  $\text{NH}_2\text{D}$  斯塔克盒的  $10.6 \mu\text{m}$  稳频系统,在近工程的环境条件下能够获得满意的频率稳定性。采用光外差拍频,阿仑方差评定,计算机实时处理可方便、迅速、直观、准确地测定激光器频率稳定性。本系统经过大量反复的测量,其长期频率稳定性达到  $3.5 \times 10^{-10}$ (取样时间 1s),  $4 \times 10^{-10}$ (取样时间 10s),短期稳定性达到  $1.57 \times 10^{-9}$ (取样时间 1ms) 的满意结果。表 4 给出了国内外同类斯塔克稳频系统的指标比较情况。

最后,仅向在整个工作中给以多方面指导和帮助的白相龙高级工程师、华喆年高级工程师、

表 4 腔外斯塔克盒非饱和吸收稳定  $\text{CO}_2$  激光频率国内外指标比较

参数	国 家					
	美国	美国	加拿大	加拿大	中国 (电子科大)	中国 (电子科大)
长期频率稳定	$\pm 3.5 \times 10^{-9}$	$\pm 3.5 \times 10^{-9}$	$\pm 1.06 \times 10^{-8}$	$\pm 5.3 \times 10^{-8}$	$\pm 1.2 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-10}$ (取样时间 1s)
短期频率稳定性	—	—	—	—	—	$1.5 \times 10^{-9}$ (取样时间 1ms)
测试方法	拍频信号的 轨迹估计	—	—	拍频信号 轨迹估计	误差信号 轨迹估计	光外差拍频, 阿仑方差评定
发表时间	1974	1977	1980	1981	1983	1988

冯志超教授以及在整个工作中作了大量理论和实际工作的彭昇阳、范勤儒同学等致谢。

## 参 考 文 献

- 1 T. A. Nussmeier, R. L. Abrams, *Appl. Phys. Lett.*, **25**(10), 615(1974)
- 2 A. R. Johnston *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **19**(12), 505(1971)
- 3 P. W. Pace *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16**(9), 937(1980)
- 4 J. H. Mcelroy *et al.*, *Proc. IEEE*, **65**(2), 238(1977)
- 5 P. Lavigne *et al.*, AD-A104 734/9(1982)
- 6 朱大勇, 苏心智, 中国激光, **10**(12), 829(1983)
- 7 D. W. Allan *et al.*, *Proc. IEEE*, **54**, 221~230(1966)
- 8 J. A. Barnes *et al.*, *IEEE Instrum. Mess.*, **IM-2D**, 105~120(1971)
- 9 彭昇阳 *et al.*, 激光技术, **11**(5), 53(1987)

(上接第 128 页)

而使腔内  $\text{TEACO}_2$  管放电时只能运转于单纵模。此外, 腔内配有 GaAs 锁模元件、限横模光阑和腔外选脉冲开关使该振荡器输出单个 2 ns 的单模光脉冲。

## 参 考 文 献

- 1 庄斗南 *et al.* 中国激光, **13**(6), 381(1986)
- 2 Dounan Zhang *et al.*, CLEO'88, April 25~29, 1988, Anaheim, California, USA
- 3 Franzen D. L., Dang G. W., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-14**(6), 402(1978)
- 4 Brazovski, V. E. *et al.*, *Sov. Quamt. Electr.*, (2), 251(1977)
- 5 Sutlon D. G., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-12**, 315(1976)
- 6 Byer R. L. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 463(1972)
- 7 Final Research Report of Los Alamos Lab., USA 1983
- 8 Zhuang Dounan *et al.* *Chinese Phys. -- Lasers*, **13**(4), 284(1986)
- 9 Armandillo E. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **42**(10), 860(1983)
- 10 庄斗南 *et al.*, 光学仪器, **8**(3), 35(1986)
- 11 Tomov I. V. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 747(1977)
- 12 丁爱臻, 庄斗南 *et al.*, 中国激光, **7**(12), 9(1980)
- 13 庄斗南 *et al.*, 中国激光, **7**(2), 33(1980)