

# 横向塞曼激光器的实验研究

巴恩旭 杨性愉 刘玉照 关信安  
(南开大学物理系)

## 提 要

本文研究了  $6328 \text{ \AA}$  He-Ne<sup>20</sup> 横向塞曼激光器的两类 S 曲线, 并给出了拍频幅度与调谐腔损耗、总气压、组分比之间的关系; 给出了最佳磁场; 观测了波形畸变与中心拍频值的关系; 确定了中心拍频的最佳选择; 采用压电陶瓷控制实现稳频, 频率稳定度可达  $2.5 \times 10^{-9}$ 。

## 一、实验装置

图1是观察横向塞曼激光器纵模频谱分布、 $\pi$ 和 $\sigma$ 两成份之间的拍频、拍频调谐曲线以及稳频的实验装置图。采用  $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$  的铁氧体磁铁16块并列作为磁场的一个极, 用这样相同的两组给出横向磁场。中心磁场在长250mm范围内保持均匀, 不均匀度 $<5\%$ , 通过调节两块磁铁的位置, 中心磁场可在  $55 \sim 520$  (高斯) 之间变化。激光器为  $6328 \text{ \AA}$  He-Ne<sup>20</sup> 内腔式, 腔长为  $25 \sim 30 \text{ cm}$  和  $15 \text{ cm}$  两种。

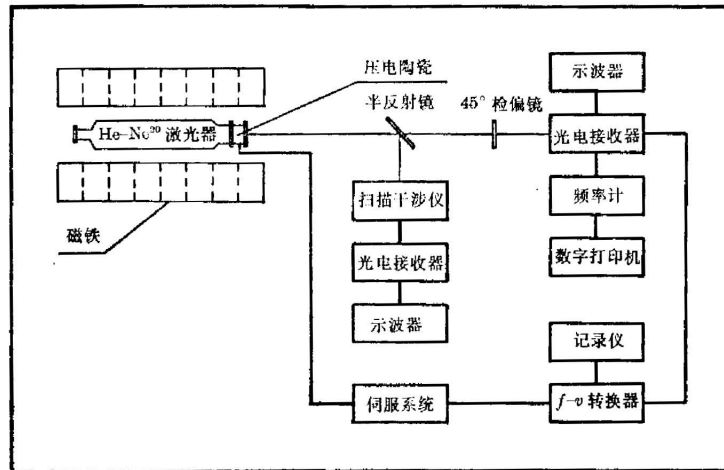


图1 实验装置图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

激光束通过半反射镜分为两路: 一路用于观察纵模频谱分布; 另一路通过方位角为  $45^\circ$  的检偏镜之后, 由光电接收器接收。输入示波器可观察到光拍, 输入频率计和打印机可读出和记录拍频, 经频率~电压转换器可由记录仪画出拍频调谐曲线, 经伺服系统可控制压电陶瓷以稳定频率。

## 二、拍频调谐曲线

$\pi$ 、 $\sigma$  两个成分之间的频差是由以下三个因素共同造成的, 谐振腔的端镜双折射, 激活介质的磁感应双折射, 依赖于腔调谐的模牵引和模排斥。在横磁场下, 激活介质的磁感应双折射的快轴垂直于磁场方向, 引起  $\pi$ 、 $\sigma$  之间的频差为  $f_{bm}$  ( $f_{bm} > 0$ )。在磁场强度为 300 Gauss 左右, 实验测定  $f_{bm}$  约为 8 kHz(参见图 2)。

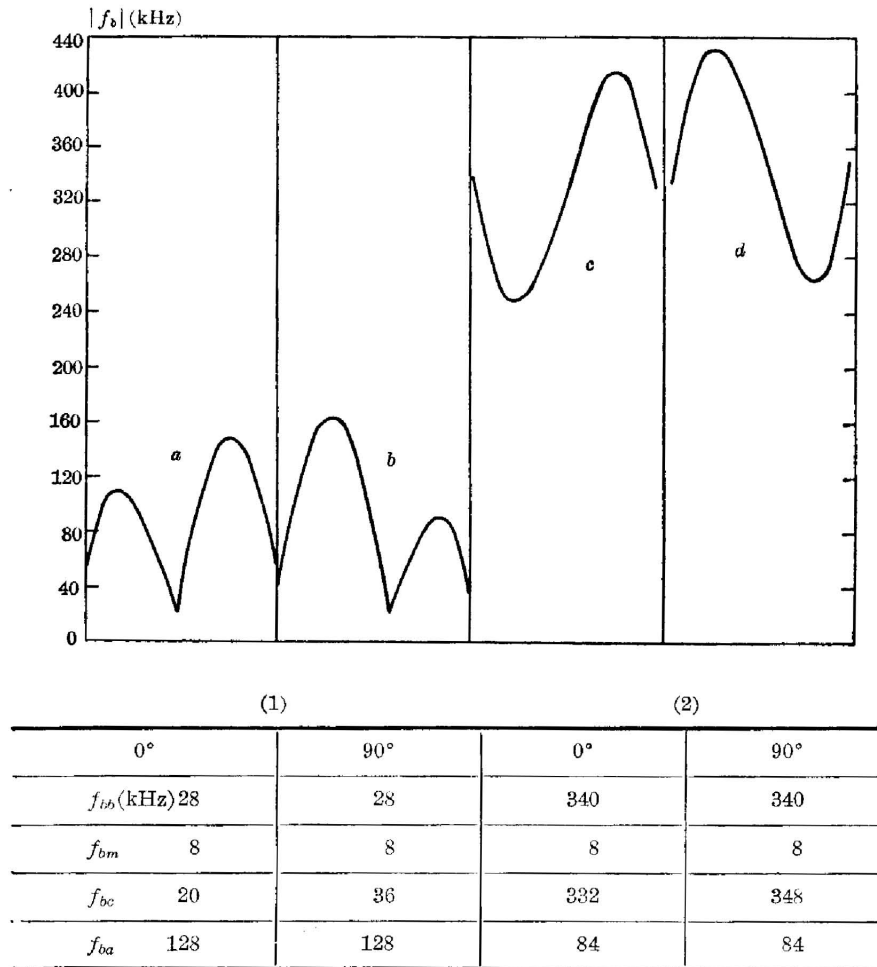


图 2 用记录仪画出的二类 S 曲线,  $L=25$  cm,  $H=310$  Gauss

Fig. 2 Two types of S-curve plotted by recorder,  $L=25$  cm,  $H=310$  Gauss

端镜双折射和激活介质的磁感应双折射给出中心拍频  $f_{bc}$  的大小, 即给出拍频调谐曲线的基准线。有以下关系式:

$$f_{(bc)\theta} = f_{bb} \cos(2\theta) - f_{bm} \quad (\theta \text{ 位置}), \quad (1)$$

$$f_{(bc)0^\circ} = f_{bb} - f_{bm} \quad (0^\circ \text{ 位置}), \quad (2)$$

$$f_{(bc)90^\circ} = -f_{bb} - f_{bm} \quad (90^\circ \text{ 位置}). \quad (3)$$

当然实际观察到的只能是正值  $|f_{bc}|$ 。其中  $f_{bb}$  是主偏振轴(端镜双折射的快轴)与磁场方向平行时  $\pi$  和  $\sigma$  成分的频差, 且  $f_{bb} > 0$ ,  $\theta$  为主偏振轴与磁场方向间的夹角。

图 2 表示用 X-Y 记录仪得到的拍频调谐曲线。0° 位置呈 S 形(如图中曲线  $a, c$ ), 90° 位置呈倒 S 形(曲线  $b, d$ ), 并且在每对曲线中, S 形曲线位于相应的倒 S 形曲线和下方  $2f_{bm}$  处[由公式(2), (3)很容易理解]。由此, 可从实验上确定  $f_{bm}$  的值。我们把拍频调谐曲线分为两类, 如图 2 所示。第一类(如曲线  $a, b$ ):  $f_{bc} < f_{ba}$ , S 和倒 S 曲线为双峰, 有一主最大、次最大, 并且

$$f_{ba} = \frac{1}{2}(f_{\pm} + f_{*}), \quad f_{bc} = \frac{1}{2}(f_{\pm} - f_{*}), \quad (4)$$

第二类(如曲线  $c, d$ ):  $f_{bc} > f_{ba}$ , S 和倒 S 曲线为单峰, 有一极大、极小, 并且

$$f_{ba} = \frac{1}{2}(f_{\text{极大}} - f_{\text{极小}}), \quad f_{bc} = \frac{1}{2}(f_{\text{极大}} + f_{\text{极小}})。 \quad (5)$$

### 三、拍频振幅和损耗、总气压、组分比之间的关系

横向塞曼激光器  $\pi$ 、 $\sigma$  两成分之间的频差为<sup>[4]</sup>:

$$f = \nu_x - \nu_\sigma = F_1(\sigma_x - \sigma_\sigma + \rho_\sigma I_\sigma - \rho_x I_x + \tau_{\sigma x} I_x - \tau_{x\sigma} I_\sigma), \quad (6)$$

式中  $F_1 = \frac{\gamma p}{2Q} = \frac{c\eta(a+T)}{8\pi nL}$ , 这里  $a$  为光腔的非透射损耗因子,  $T$  为光腔的输出反射镜透射

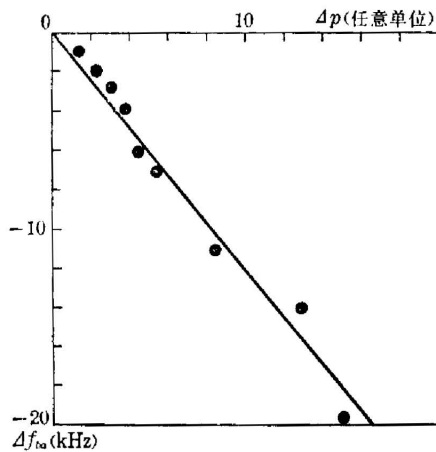


图 3 拍频振幅变化量和输出功率变化量  $\Delta p$  的关系

Fig. 3 Variable of beat frequency amplitude vs. variable of output power

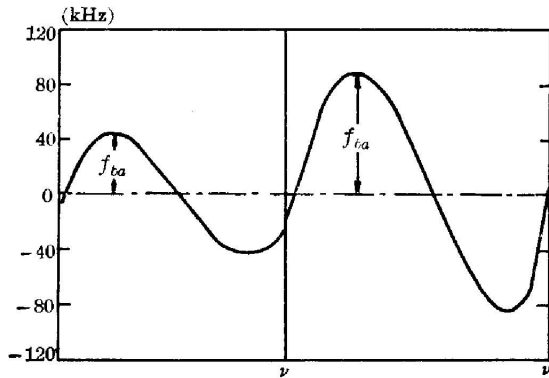
率,  $\eta$  为相对激发度,  $n$  为折射率,  $L$  为腔长。激光器处于稳定工作状态以后, 假设放电电流、气体温度、相对激发度  $\eta$  为固定值, (6)式表明拍频振幅  $f_{ba}$  和损耗  $a$  成线性关系。由(6)式得:

$$\Delta f = \frac{c\eta}{8\pi nL} (\sigma_x - \sigma_\sigma + \rho_\sigma I_\sigma - \rho_x I_x + \tau_{\sigma x} I_x - \tau_{x\sigma} I_\sigma) \Delta a。 \quad (7)$$

采用腔长  $L = 25.5$  cm 的 He-Ne<sup>20</sup> 激光器,  $H = 310$  Gauss, 激光管工作 1 小时以后, 测出拍频振幅变化量  $\Delta f_{ba}$  和输出功率变化量  $\Delta P$  之间的关系, 如图 3 所示。

可以看出图 3 的实验曲线和理论公式(6)、(7)相一致。

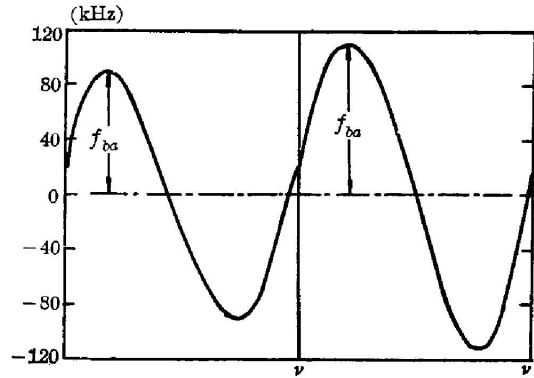
图 4 和图 5 分别是反映拍频幅度与总气压和组分比之间关系的实测曲线。腔长均为 24 cm, 输出功率约为 2 mW, 图 4 的中心拍频为 344 kHz, 组分比是 7:1, 图 5 的中心拍频为 192 Hz, 总气压为 2.85 Torr。可以看出, 在其它条件相同时, 适当减小总气压或适当减小 He 与 Ne 的组分比, 均可增大拍频幅度。



(a) 总气压 5 Torr,  $f_{ba}=45$  (kHz)  
 (b) 总气压 3.54 Torr,  $f_{ba}=87$  (kHz)  
 腔长 (24 cm), 输出功率 (2mW),  
 中心拍频 (344 kHz), 组份比 (7:1)

图 4 拍频振幅  $f_{ba}$  和总气压的关系

Fig. 4 Beat frequency amplitude  $f_{ba}$   
 vs. total pressure



(a) 组份比 7:1,  $f_{ba}=92$  (kHz)  
 (b) 组份比 4:1,  $f_{ba}=112$  (kHz)  
 腔长 (24 cm), 输出功率 (2 mW),  
 中心拍频 (192 kHz), 总气压 (2.85 Torr)

图 5 拍频振幅  $f_{ba}$  和组份比的关系

Fig. 5 Beat frequency amplitude  $f_{ba}$   
 vs. constituent ratio

#### 四、最佳磁场

对于腔长  $L=25$  cm 左右, 有 2~3 个纵模的 He-Ne<sup>20</sup> 激光器, 需要选择横向磁场为特征磁场, 以实现单纵模化<sup>[2,3]</sup>。对于腔长  $L=15$  cm 左右, 有 1~2 个纵模的 He-Ne<sup>20</sup> 激光器, 加横向磁场以后, 纵模频谱分布曲线和宽度虽也变窄, 但横崩溃效应并不显著, 如图 6 所示。在稳频中单纵模化并不是一个突出的问题。此时磁场的选择可作如下考虑:

实验测得拍频振幅  $f_{ba}$  和磁场  $H$  之间的关系如图 7 所示。可以看出, 当  $H=190$  Gauss 时, 拍频振幅  $f_{ba}$  有最大值, 而且曲线在最大值附近缓慢变化。也就是说磁场强度  $H$  在相当大的变化范围内 (如 180~200 Gauss) 几乎都能使拍频振幅  $f_{ba}$  保持为最大值。而且从图 6 还可看出, 当  $H=190$  Gauss 时, 纵模频谱分布曲线的宽度也比较小, 这时保证单模输出也是有利的。建议取  $H_{最佳}=180\sim 200$  Gauss, 这在实验上比特征磁场更容易实现。

#### 五、激光管取向, 中心拍频的选择与波形畸变, 零拍频之间的关系

从实验中观察到,  $\pi$  和  $\sigma$  间的光拍波形与拍频大小有直接关系: 当频差比较小时 (如小于 100 kHz), 光拍的波形发生畸变; 当频差比较大时, 光拍的波形无畸变。

图 8 和图 9 是对应中心拍频不同的两支 S 曲线和不同拍频的光拍波形图。可以明显看出, 不论那一支 S 曲线, 只要拍频比较小, 对应的的光拍波形畸变就比较大。而且从图 8(b) 还可看出, 尽管将激光器稳定在拍频中心, 但由于中心拍频  $f_{bc}=38$  (kHz) 比较小, 所以光拍的波形畸变同样很大。光拍的波形畸变影响横向塞曼激光器的应用, 需要尽量消除。为了减小稳定的拍频中心的光拍波形畸变, 就需要使中心拍频  $f_{bc}$  的值足够大。另外, 如果激光器

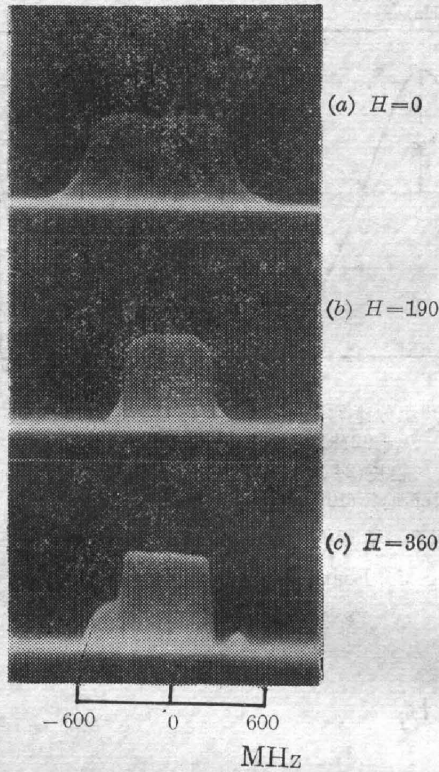


图 6  $L=15\text{ cm}$  时, 纵模频谱分布曲线的形状随横向磁场的变化  
 Fig. 6 Variation of longitudinal mode frequency distribution with transverse magnetic field

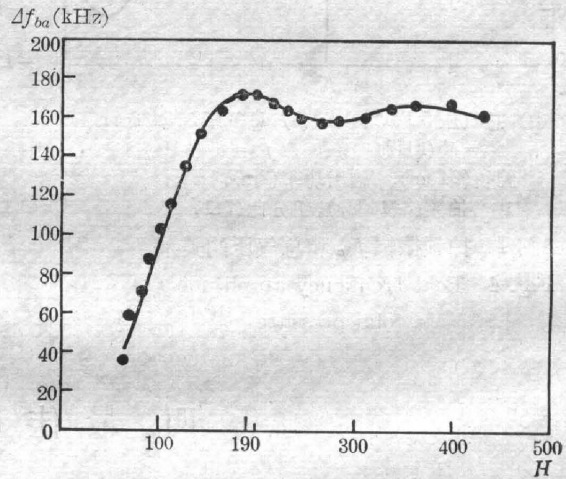


图 7 腔长  $L=15\text{ cm}$  的 He-Ne<sup>20</sup> 激光器, 拍频振幅  $f_{ba}$  和  $H$  之间的关系,  $H=190\text{ Gauss}$  为最佳磁场  
 Fig. 7  $f_{ba}$  vs.  $H$  for cavity length  $L=15\text{ cm}$ . The optimum magnetic field  $H=190\text{ Gauss}$

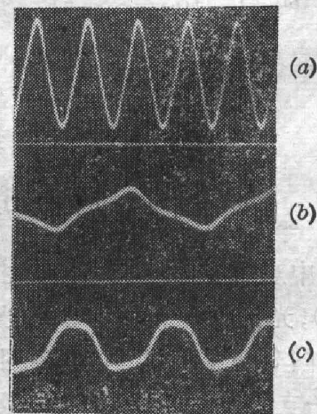
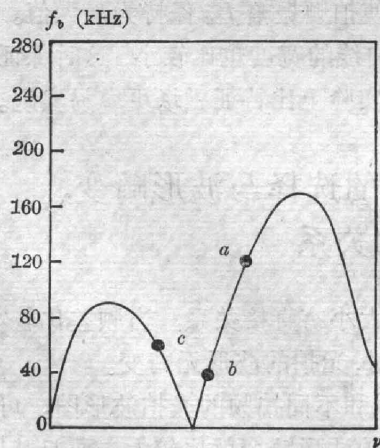


图 8 中心拍频  $f_{bc}=38\text{ kHz}$  时, 不同拍频对应的光拍波形  
 Fig. 8 Various beat traces in case of central beat various frequency  $f_{bc}=38\text{ kHz}$  for  
 (a)  $f=120\text{ kHz}$ ; (b)  $f=38\text{ kHz}$ ; (c)  $f=60\text{ kHz}$

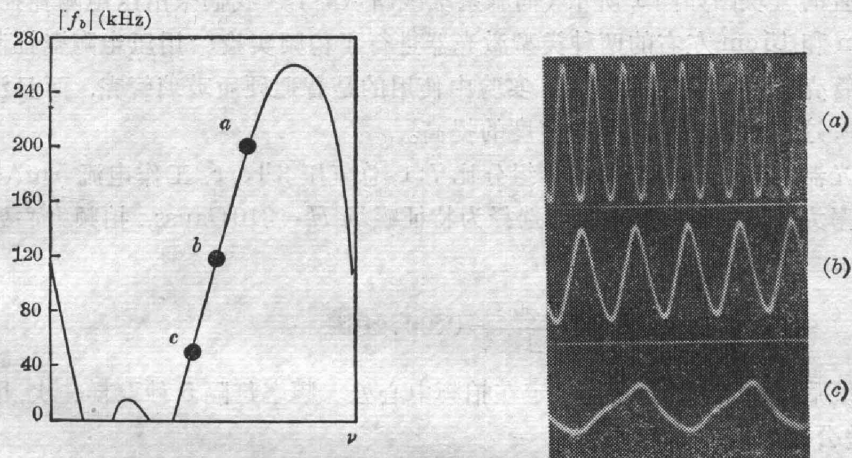


图9 中心拍频  $f_{bc}=119$  kHz 时, 不同拍频对应的光拍波形  
 Fig. 9 Various beat traces in case of central beat frequency  
 $f_{bc}=119$  kHz for (a)  $f=200$  kHz; (b)  $f=119$  kHz; (c)  $f=50$  kHz

从  $0^\circ$  或  $90^\circ$  位置旋转, 中心拍频  $f_{bc}$  的值就会减小, 使波形畸变增大。

具有双峰的 S 曲线出现零拍频区(参见图 2), 在零拍频区, 由于成为单一频率振荡, 光拍消失了, 也就不能进行稳频控制。如果能使中心拍频  $f_{bc}$  大于拍频振幅  $f_{ba}$ , 就可避免在 S 曲线中出现零拍频区。

另一方面, 在实验中容易观察到, 当中心拍频  $f_{bc}$  特别大时(如大于 300 kHz), 如果激光管从  $0^\circ$  或  $90^\circ$  位置转动到一定角度, S 曲线就消失了, 在整个调谐范围都成为单一频率振荡。所以从这一方面来讲, 又不希望中心拍频  $f_{bc}$  特别大。因此横向塞曼激光器应当在  $0^\circ$  或  $90^\circ$  位置工作, 选择中心拍频  $f_{bc}$  的值足够大(如 100~300 kHz)比较合适。由(2)、(3)式可知, 中心拍频  $f_{bc}$  的值主要由端镜双折射造成的频差  $f_{b0}$  所决定。

## 六、稳 频

横向塞曼激光器的稳频原理与兰姆凹陷、纵向塞曼的稳频原理不同, 后两者均需要有调制信号。对于单模的 He-Ne<sup>20</sup> 横向塞曼激光器, 其  $\pi$  和  $\sigma$  两个成分的拍频调谐曲线为 S 形或倒 S 形。利用这一特点, 我们将拍频信号经频率  $f \sim$  电压  $V$  转换作为误差信号来控制压电陶瓷。这样误差信号  $V$  和腔调谐频率  $\nu$  的关系亦为 S 形或倒 S 形。由于误差信号在频率稳定点附近单调线性变化, 导致振荡频率偏离的大小和方向由误差信号的大小同时给出, 而毋需另加调制信号来鉴别偏离的方向。

在兰姆凹陷和纵向塞曼稳频中, 原子跃迁中心成为频率稳定点。可是在横向塞曼稳频中, 并不存在这样一个特殊的点。显然, 这时频率再现性是不利的。为了提高频率再现性, 首先需要保证充入同位素 Ne<sup>20</sup> 的丰度, 从而使增益曲线不发生频率漂移<sup>[4]</sup>。同时从拍频调谐曲线可以看出, 拍频中心两侧的曲线对称, 且接近直线变化, 斜率最大。所以拍频中心是 S 曲线上的最佳点, 应当选为频率稳定点。而且拍频中心是不同振幅的 S 曲线的交点, 选择拍频中心作为频率稳定点还可以减小频率稳定点对拍频振幅变化的依赖性。

稳频装置的方块图如图 1 所示(伺服系统线路从略)。我们采用压电陶瓷控制的方法,对腔长 25 cm 和 15 cm 左右的两种类型激光器进行了稳频实验。用压电陶瓷控制最好采用低膨胀材料管壳。由于条件的限制,实验中使用的是普通硬质玻璃管壳,而且没有任何恒温、绝热措施,这当然影响了频率稳定度的提高。

选用激光器的腔长  $L=25.5$  cm, 组分比 7:1, 总气压 3 Torr, 工作电流 5 mA, 不加磁场时的输出功率为 2.5 mW, 横向磁场选择为特征磁场  $H=310$  Gauss, 拍频中心处的 S 曲线斜率为:

$$\frac{\Delta\nu}{\Delta f_b} = 0.96 \times 10^3. \quad (8)$$

接通伺服系统后, 调节控制旋钮使稳定在拍频中心处。频率每隔 5 秒取样一次, 用打印机记录, 由均方差公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

计算拍频的波动, 然后由(8)式估算光频的波动。1 小时的稳频实验结果绘于图 10。频率稳定度可达  $3.5 \times 10^{-9}$ , 输出功率为 2.45 mW。

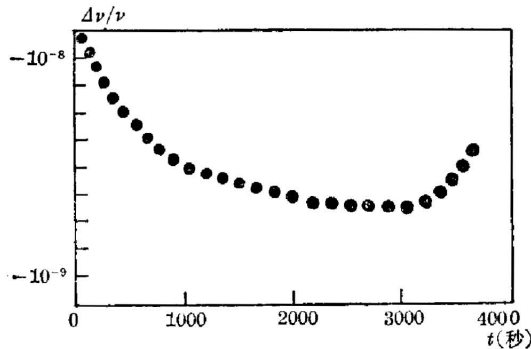


图 10  $L=25.5$  cm, 1 小时的光频稳定度  
Fig. 10 Optical frequency stability  
for  $L=25.5$  cm

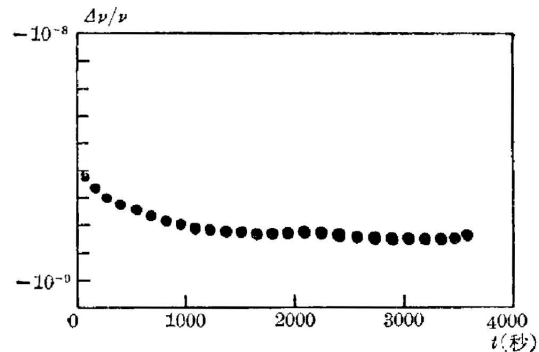


图 11  $L=15$  cm, 1 小时的光频稳定度  
Fig. 11 Optical frequency stability  
for  $L=15$  cm

选用激光器的腔长  $L=15$  cm, 组分比 7:1, 总气压 3 Torr, 工作电流 5 mA, 不加磁场时的输出功率为 0.6 mW。横向磁场选择为最佳磁场  $H=190$  Gauss, 拍频中心处的 S 曲线斜率  $\frac{\Delta\nu}{\Delta f_b} = 0.80 \times 10^3$ , 用和上面同样的方法, 可以由拍频变化的均方差, 利用 S 曲线的斜率, 来估算光频的波动。一小时的稳频实验结果绘于图 11, 频率稳定度可达  $2.5 \times 10^{-9}$ , 输出功率为 0.6 mW。

总之, 横向塞曼激光器可以提供同时具有两个正交偏振分量的光, 其间频差可以在几十千赫到几百千赫之间调谐, 且具有相当高的频率稳定度, 其频率再现性仍然是有待深入研究的问题。但仅就其已达到的高频率稳定度这一点, 在相对测量中仍不失为一个很有价值的新颖激光光源。

## 参 考 文 献

- [1] 巴恩旭, 杨性愉; 《物理学报》(待发表)  
[2] J. B. Ferguson, R. H. Morris; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 18 (Sep), 2924.  
[3] N. Umeda, M. Tsukiji *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 3 (Feb), 442.  
[4] 高崎宏, 梅田伦弘; *Optics E*, 1981, **19**, No. 6 (Jun), 66.

**Experimental study of transverse Zeeman laser**

BA ENXU YANG XINYU LU YUZHAO AND GUAN XINAN  
(Nankai University)

(Received 28 March; revised 21 November 1983)

**Abstract**

This paper studies two types of beat frequency tuning curve of 6328 Å He-Ne<sup>20</sup> transverse Zeeman laser. Relations of amplitude of beat frequency with cavity loss, total pressure and mixing ratio are given. The optimum magnetic field is introduced. The experimental phenomena of waveform distortion are observed. Choice of central beat frequency is studied. By PZT control the frequency stabilization is realized. Frequency stability of  $2.5 \times 10^{-9}$  can be achieved.