

# 用于频分复用相干光纤通信 的半导体激光器稳频系统

王力列 易玺林 谢麟振

(北京大学无线电电子学系, 北京 100871)

**提要:** 本文以 Fabry-Perot 干涉仪为鉴频器, 并利用其众多梳状透过峰, 实现了若干半导体激光器的稳频, 相对频率稳定度可达  $10^{-11}$  量级 ( $\tau=10\text{s}$ )。还实现了数个激光器对一主激光器的频率跟踪。

**关键词:** 频分多路复用, 稳频, 相对频率稳定度, Allan 方差

## Frequency stabilized semiconductor laser diode system used in frequency division multiplexing coherent optical fiber communication

Wang Lilie, Yi Xilin, Xie Linzhen

(Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** Two laser diodes (slave lasers) have been frequency-locked at the comb resonance frequencies of a Fabry-Perot interferometer. The measured frequency spacing stability is in the order of  $10^{-11}$  ( $\tau=10\text{s}$ ). Moreover the Fabry-Perot interferometer used as the reference in the experiment has been frequency-locked at a master laser beam. This technique can be applied to frequency division multiplexing coherent optical fiber communication.

**Key words:** frequency division multiplexing, frequency stabilization, frequency traceability, Allan variance

### 一、引言

相干光纤通信的频分复用技术指的是在一根光导纤维中同时传输多个不同频率的光载波。对于石英光纤, 存在着光频的低损耗“窗口”, 在光波长约为  $1.5\mu\text{m}$  时, 光纤损耗达最小, 充分利用这低耗区是理所当然的。这样, 多个光频就被限制在相对来说频带较窄的范围内。若复用路数较多, 则光频间距较小, 从而对相邻两光频的相对频率稳定度要求较高, 否则各信息通道间的“串扰”(crosstalk)将趋严重而影响复用通信质量。

本文对多个半导体激光器进行稳频、频率跟踪实验, 并测算出表征频率稳定度的 Allan

方差值<sup>[3]</sup>, 讨论了光频间的相对频率稳定度。

## 二、稳频方法及实验装置

实现多激光器稳频, 目前主要有两种方法。Baehus 等<sup>[2]</sup>和 Shimosaka 等<sup>[3]</sup>所用的方法具有较宽的捕捉范围, 且与受控激光器是否被调制无关。但此方法需要一个在很宽范围频率内连续可调的半导体激光器, FDM 系统复用路数也将受到该激光器频率可调范围的限制; 同时, 该系统甚为复杂, 其频率稳定度以及可靠性并不十分优良(闭环后之频率稳定度为几十 MHz 左右, 相当于  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  量级)。近来, Bell 实验室的 Glance 等人<sup>[4]</sup>发展了一种新方法, 将诸半导体激光器稳频于一个光纤 F-P 腔的多个透过峰的峰顶上("F-P" 指的 "Fabry-Perot" 干涉腔)。它的优点是系统较为简单, 频率稳定度也较好, 另外也不需要对接激光器进行附加调制, 从而避免了附加调制可能引入的对通信中的码形信号的不良影响; 其缺点是因为其直接借助于码形信号来稳频, 而码形信号之频率甚高(一般为 100 MHz 左右), 因而必须使用宽带器件(如使用雪崩光电二极管接收)以及宽带前置放大器, 因之对电路的要求也甚高。

本文所报道的系统, 大体上有着与 Glance 等人相同的构思, 但其特点是引入频率甚低(kHz 或以下)之附加调制。这样一来, 一方面由于引入了附加调制, 使得稳频系统简单可靠, 且稳定度高( $10^{-11}$  量级); 另一方面由于引入的是低频调制, 甚低于中频跟踪环路带宽, 而能保证中频载波不被调制, 因用不会对相干光纤通信系统的性能产生任何影响。此外, 本文还报道了将稳频用 F-P 腔锁定于另一主激光器的实验工作, 稳定度也为  $10^{-11}$  量级。

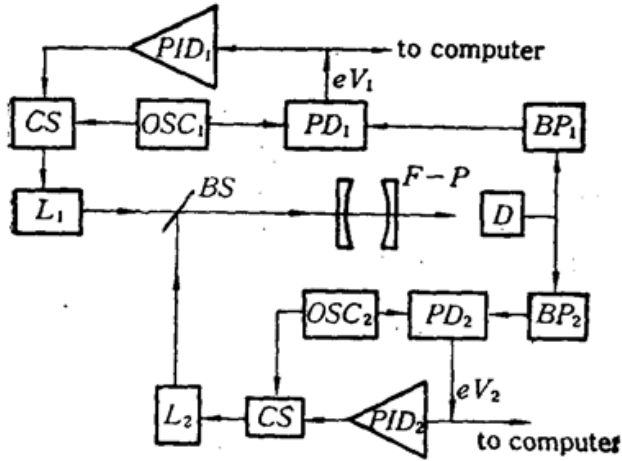
应该指出, 本文所报道的方法将不会受光通信工作波段的限制, 即既能工作于短波长( $0.85 \mu\text{m}$ )波段, 也能工作于长波长波段( $1.55 \mu\text{m}$ )。目前, 因为受到所能得到的激光器器件的限制, 本文的实验工作仅在短波长波段进行。

### 2.1 多半导体激光器稳频系统

本实验稳频方法叙述如下: 用一低频信号直接调制半导体激光器的注入电流, 则其输出光频亦受到同一频率调制。通过 F-P 腔后, 光电接收器接收到的光强信号中也包含有同一频率的交流信号, 其相位则依光频高于或低于 F-P 腔透过峰之相应频率值而不同, 两种情况下之相位正好相反<sup>[5]</sup>。将此交流信号输入鉴相器与原低频调制信号进行比相, 就可得到其正负号依赖于输入交流信号的相位, 即依赖于光频高于或低于 F-P 腔透过峰频率之输出电压, 一般称之为误差信号电压。将此误差信号放大后用以调整激光器之注入电流, 从而控制其输出光频, 使光频之中心频率稳定于 F-P 腔谐振峰(即透过峰)相应的频率上。

实验框图如图 1 所示。图中  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $CS$  为两半导体激光器及其驱动电流源。 $PD$ ,  $BP$ ,  $OSO$ ,  $PID$  分别为鉴相器、带通滤波、低频信号发生器及比例积分微分放大器,  $D$  为光电检测器,  $BS$  为分束板。

激光器  $L_1$ ,  $L_2$  均为 ML-3101 型 AlGaAs 半导体激光器, 波长为  $0.82 \mu\text{m}$  ( $25^\circ\text{C}$ ), 线宽小于 100 MHz, 实验中两者的工作电流分别为  $1.2I_{th}$  及  $1.6I_{th}$  ( $20^\circ\text{C}$ ),  $I_{th}$  为阈值电流。激光器工作电流的选取以使其工作频率能落于 F-P 腔之梳状谐振频率上为原则, 其工作电流之稳定度为 0.05 mA。激光器及 Fabry-Perot 干涉腔均加有控温装置, 控温精度优于  $0.01^\circ\text{C}$ 。F-P 腔为球面共焦腔, 自由光谱区为 4 GHz, 精细度为 40, 两镜片固定在殷钢上。



$L_1, L_2$ —laser diode; F-P—Fabry-Perot cavity; D—photodetector;  $OSC_1, OSC_2$ —low frequency oscillator;  $BP_1, BP_2$ —band pass filter;  $PD_1, PD_2$ —phase detector;  $PID_1, PID_2$ —“proportional amplifier-integrator-differentiator”; BS—beam splitter; CS—laser diode current supply

Fig. 1 Experimental setup for “multi-laser diodes frequency stabilization”.

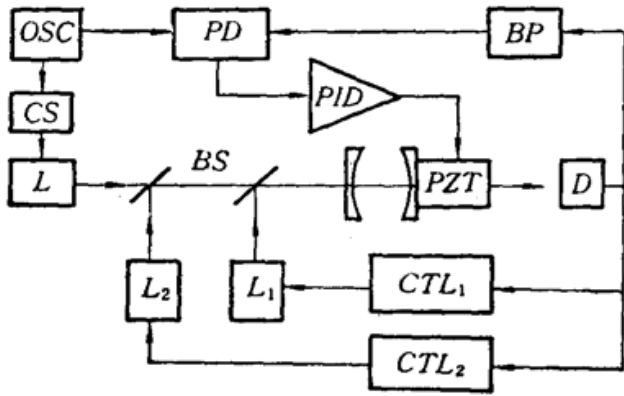
$OSC_1$  与  $OSC_2$  分别以 1.2 kHz 和 1.9 kHz 的正弦信号调制  $L_1$  与  $L_2$  的驱动电流。两激光器的输出光束同时进入 F-P 腔, 由探测器 D 检测到的输出信号分路送入鉴相器  $PD_1$  与  $PD_2$ , 分别与由  $OSC_1, OSC_2$  来的参考信号进行相位比较。鉴相器  $PD_1, PD_2$  输出的误差电压信号  $eV_1$  与  $eV_2$  分别正比于激光器  $L_1$  与  $L_2$  的激射频率与 F-P 腔谐振峰频率的频差。误差信号  $eV_1, eV_2$  经过模数转换送入计算机, 并输入实际测得的各自的误差电压与输入频偏的转换因子, 从而自动地计算出激光器  $L_1, L_2$  的频率涨落的 Allan 方差。这里, 实测的激光器  $L_1$  跟踪 F-P 腔的误差电压/输入频偏转换因子为 0.12 V/MHz, 它是由直接扫描激光器  $L_1$ , 测量出鉴相器  $PD_1$  之输出曲线(鉴频曲线)上之正负峰值误差电压之差值(18 V), 再除以其对应的频率差值, 即 F-P 腔实际透过曲线之线宽(150 MHz)值而得。实测的另一激光器  $L_2$  之转换因子为 0.15 V/MHz。这一测量方法的原理, 在我们的论文[5], [7]中已有较详细的论述。与此同时, 误差电压  $eV_1$  与  $eV_2$  分别经  $PID_1, PID_2$  (PID—比例、积分、微分放大器)放大后馈入激光器  $L_1$  与  $L_2$ , 调节其注入电流从而将它们的频率稳定地锁定在 F-P 腔的不同透过峰上, 其频差一般为  $N \times 4 \text{GHz}$  ( $N$  为整数, 4 GHz 为 F-P 腔的自由光谱区)。两个 PID 电路之积分常数均取为 45 ms。

## 2.2 跟踪-主激光器的半导体激光器稳频系统

在前面实验的基础上, 再增加一半导体激光器作为主激光器, 可实现一个跟踪于同一主激光器的多激光器稳频系统。其实验方框图如图 2 所示。

图 2 中  $L$  为主激光器(ML-3101 型), 其激射波长为 0.82  $\mu\text{m}$  (25°C), 实验中其工作电流为  $1.2 I_{th}$ , 工作温度为 20°C。图中  $L_1, L_2$  为从激光器, 其型号与工作参数完全与图 1 中的实验相同。图中  $OTL_1, OTL_2$  分别代表图 1 中相应的两个稳频环路。 $PZT$  为调谐 F-P 腔用的压电陶瓷。

主激光器  $L$  的驱动电流受到一频率为 470 Hz 的正弦信号(图中  $OSC$ )的调制。由位于 F-P 腔之后的光电检测器 D 所接收的交流信号, 经带通滤波器 BP 后被送入鉴相器 PD, 与来自  $OSC$  的 470 Hz 正弦信号比相后, 产生误差电压。该误差信号经 PID 放大后送到附于 F-P 腔上之  $PZT$  以调节腔间距, 从而使得 F-P 腔谐振峰跟踪主激光器  $L$  的中心频率, 而  $L_1, L_2$  仍被锁频于 F-P 腔的某两个谐振峰上, 其频率间距仍为  $N \times 4 \text{GHz}$ 。



*L*—master laser; *L*<sub>1</sub>, *L*<sub>2</sub>—slave laser diode; *CTL*<sub>1</sub>, *CTL*<sub>2</sub>—Frequency stabilization circuit for *L*<sub>1</sub> and *L*<sub>2</sub> (details are described in Fig. 1); *PZT*—fabry-perot cavity with *PZT* unit; *OSC*—Low Frequency Oscillator; *PD*—phase detector; *BP*—band phase filter; *D*—photodetector; *CS*—current supply; *PID*—“prop-ortional amplifier-inten grator-differentiator”; *BS*—beam splitter

Fig. 2 Experimental setup for 2 slave laser diodes to frequency-track a master laser beam.

### 三、实验结果与分析

在诸稳频环路同时闭环的情况下，测得各跟踪频率稳定度的 Allan 方差值如图 3 所示。图中纵坐标为 Allan 方差值  $\lambda$ ，横坐标为取样时间  $\tau$ (s)。

稳频后诸激光器之间的中心频率之频差为 F-P 腔自由光谱区  $\nu_{FSR}$ (4 GHz) 的整数倍。最小频差为  $\nu_{FSR}$ 。实际上光通信 FDM 系统各信道间的干扰主要来自最近邻，因此以下只考虑光频频差为  $\nu_{FSR}$  的情形(可通过改变激光器工作温度以及工作电流来实现。)

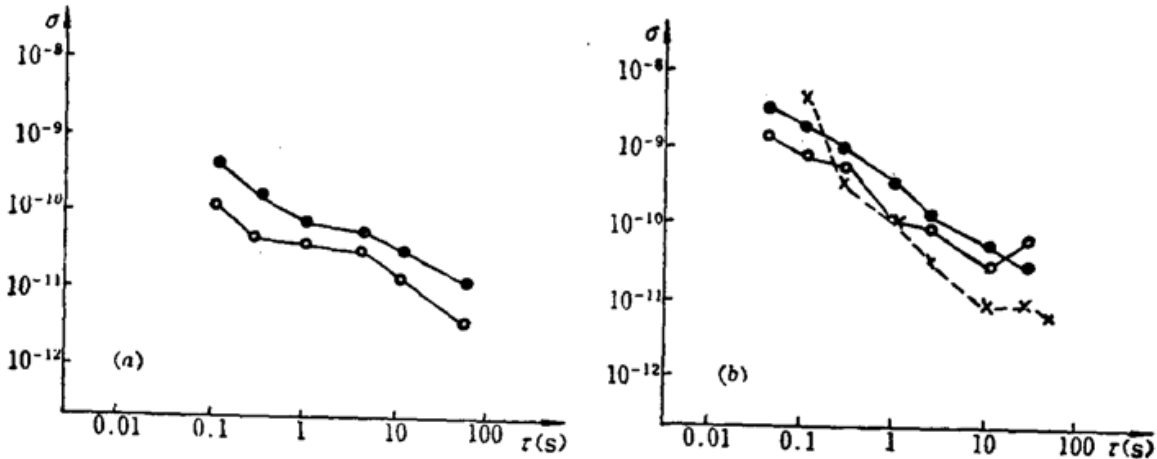


Fig. 3 Frequency stability measured in Allan variance

(a) For experiment of “multi-laser diodes frequency stabilization”; (b) For experiment of “2 laser diodes frequency-tracking a master laser beam”.

●, ○—Frequency trace ability of laser diodes *L*<sub>1</sub> and *L*<sub>2</sub> to Fabry-Perot cavity respectively; ×—Frequency traceability of the Fabry-Perot Cavity to the master laser *L*

图 3(a) 为上文 2.1 的实验结果。两半导体激光器间的相对频率稳定度可估计为： $\sigma_r \sim \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{FP}^2}$  (因  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{FP}$  是统计不相关的)， $\sigma_{FP} \sim \frac{\delta\nu_{FSR}}{\nu}$  表示由于  $\nu_{FSR}$  的涨落引起的两光频的相对频率不稳， $\nu$  为光频 ( $\nu \sim 3.7 \times 10^{14}$  Hz)。对 F-P 腔有： $\frac{|\delta\nu_{FSR}|}{\nu_{FSR}} = \frac{|\delta d|}{d}$  ( $d, \delta d$  为 F-P 腔长及其涨落)，于是， $|\sigma_{FP}| \sim \frac{\nu_{FSR}}{\nu} \cdot \frac{|\delta d|}{d}$ 。对于殷钢 1°C 的温度变化  $\frac{|\delta d|}{d} \sim 10^{-6}$ ，因控

温可达  $0.01^\circ\text{C}$ , 故  $\frac{|\delta d|}{d} \sim 10^{-8}$ , 从而  $|\sigma_{FP}| \sim 10^{-13}$ 。此值远小于  $\sigma_1$  及  $\sigma_2$  之值。因此两激光器的相对频率稳定度为  $\sigma_r \approx \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ 。在  $\tau = 10\text{s}$  时,  $\sigma_1 = 3.0 \times 10^{-11}$ ,  $\sigma_2 = 1.2 \times 10^{-11}$ , 因而  $\sigma_r = 3.2 \times 10^{-11}$ 。

图 3(b) 为上文 2.2 的实验结果。可见当  $\tau = 10\text{s}$  时, 诸跟踪稳定度的 Allan 方差值均达到  $10^{-11}$  的量级。因主激光器  $L$  并未稳频, 它的频率变化  $\delta\nu$  将引起 F-P 腔  $d$  的变化  $\delta d$  从而引起激光器  $L_1$  (对  $L_2$  也可同样讨论) 的频率改变  $\delta\nu_1$ , 显然

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\delta\nu_1}{\nu_1} = -\frac{\delta d}{d} = -\frac{\delta\nu_{\text{FSR}}}{\nu_{\text{FSR}}} \quad (\nu \simeq \nu_1 \simeq 3.7 \times 10^{14} \text{ Hz}),$$

$L$  与  $L_1$  光频间隔 (设在频率改变前为  $\nu_{\text{FSR}}$ ) 的变化为

$$|\delta\nu - \delta\nu_1| = |\nu - \nu_1| \cdot \frac{|\delta\nu_{\text{FSR}}|}{\nu_{\text{FSR}}} = |\delta\nu_{\text{FSR}}|,$$

而  $|\delta\nu| = \nu \cdot \frac{|\delta\nu_{\text{FSR}}|}{\nu_{\text{FSR}}} \sim 10^5 |\delta\nu_{\text{FSR}}|,$

故  $|\delta\nu - \delta\nu_1| \ll \delta\nu \simeq \delta\nu_1。$

这说明  $L$  频率改变  $\delta\nu$  时,  $L$  与  $L_1$  (或  $L_2$ ) 的频率间隔的变化相对于其本身频率的变化完全可以忽略, 即从激光器“紧紧”跟随主激光器的频率变化。若主激光器频率漂移  $|\delta\nu| = 1\text{GHz}$ , 则  $|\delta\nu_{\text{FSR}}| \sim 10^4 \text{ Hz}$ , 因而两光频的相对频率不稳定度则为  $\frac{10^4}{3.7 \times 10^{14}} \sim 3 \times 10^{-11}$ 。因主激光加有控温装置, 其实际频漂小于  $1\text{GHz}$ 。

另外, 此处应该提及的是, 本实验室最近得到的外差式相干光纤通信系统的实验结果表明, 只要中频 (信号激光器与本振激光器间的差拍频率) 跟踪环路的响应时间足够快 (如几十  $\mu\text{s}$ ), 本振激光器将完全可能在信号激光器的调制频率范围 ( $\text{kHz}$ ) 内, 跟踪信号激光器的频率变化, 从而中频信号将不会被低频 ( $\text{kHz}$ ) 调制。这样, 由于稳频而对信号激光器附加的低频调制将不会对相干光纤通信系统的性能产生任何影响。

### 参 考 文 献

- 1 D. W. Allan, *Proc. IEEE*, **54**, 221 (1966)
- 2 E. J. Bachus *et al.*, Technical Digest, Conference on Opt. Fiber Commun., (1986), paper WE4
- 3 N. Shimosaka *et al.*, Technical Digest, OFC'88 **1**, (1988), paper THG 3
- 4 B. Glance *et al.*, *Electr. Lett.*, **23**(14), 750 (1987)
- 5 D. P. Wang *et al.*, *Opt. Lett.*, **13**(10), 820 (1988)
- 6 王义道 *et al.* 量子频标原理, 科学出版社, 1986, 240
- 7 C. Xie *et al.*, *Appl. Opt.*, **28**(11), 4552 (1989)