

# 实现半导体激光器频率跟踪和锁定的新方法

王庆吉 陈 荣 彭玉峰\*

(北京大学无线电系, 北京 100871)

## 提 要

本文报道实现半导体激光器连续频率跟踪和锁定的一种新方法:利用法拉第反常色散光学滤波器(FADOF)的透射谱作鉴频器,改变法拉第反常色散光学滤波器的磁场强度,实现频率跟踪和稳频.实验得到,当磁场从  $0.7 \times 10^{-2} \text{T}$  变到  $2.2 \times 10^{-2} \text{T}$  时,半导体激光器在  $\sim 2 \text{GHz}$  范围内跟踪锁定,其频率稳定度优于  $2.1 \times 10^{-10}$  ( $100 \text{ms} \leq \tau \leq 10 \text{s}$ ).

**关键词** 法拉第反常色散光学滤波器, 频率跟踪和锁定.

## 1 引 言

通常有两种方法稳定半导体激光器的频率:外腔(如 Fabry-Perot)稳频<sup>[1]</sup>和原子(分子)谱线稳频<sup>[2,3]</sup>.前者可获较高短期频率稳定度,但对环境条件要求严格,调整也较困难;后者能得到较好的长期频率稳定度,但稳频后的半导体激光频率不可调谐,从而失去半导体激光频率易调谐的优点.本文提出一种实现半导体激光器宽频连续跟踪和锁定的新方法:即把铷原子法拉第反常色散光学滤波器(Rb-FADOF)透射谱边峰作跟踪锁定系统的鉴频器,实现对半导体激光器频率的连续跟踪和锁定.当 Rb-法拉第反常色散光学滤波器的外加纵向恒定磁场  $B$  在  $0.7 \times 10^{-2} \text{T} \sim 2.2 \times 10^{-2} \text{T}$  变化时,半导体激光器( $\lambda \sim 780 \text{nm}$ )频率能在  $\sim 2 \text{GHz}$  范围内连续跟踪和锁定,其锁频的频率稳定度优于(阿仑方差)  $2.1 \times 10^{-10}$  ( $100 \text{ms} \leq \tau \leq 10 \text{s}$ ).

## 2 Rb-法拉第反常色散光学滤波器的磁场调谐特性

Rb-法拉第反常色散光学滤波器由纵向磁场中的 Rb 原子气室和置于气室两端正交配置的格兰·汤姆逊棱镜组成,在半导体频率跟踪锁定系统中,它起量子鉴频器作用.根据文献[4],法拉第反常色散光学滤波器的透射谱  $T_R(\nu)$  为,

$$T_R(\nu) = \frac{1}{2} e^{-\alpha L} \cdot \{ \cosh(\Lambda \alpha \cdot L) - \cos(2\rho L) \},$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2}(\alpha_+ + \alpha_-) = \frac{\omega}{2C} \text{Im}(\chi_+ + \chi_-); \quad \Lambda \alpha = \frac{1}{2}(\alpha_+ - \alpha_-) = \frac{\omega}{2C} \text{Im}(\chi_+ - \chi_-), \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\omega}{4C} \text{Re}(\chi_+ - \chi_-) = \frac{\omega}{2C}(n_+ - n_-);$$

收稿日期:1992年9月7日;收到修改稿日期:1992年11月16日

\* 河南师范大学物理系,河南,新乡

式中  $\alpha$ ,  $\chi$  和  $n$  分别为吸收系数、电感应极化率和折射率, “ $\pm$ ” 则表示右旋 ( $\sigma^+$ ) 与左旋 ( $\sigma^-$ ) 偏振分量,  $L$  为气室长度. 如果法拉第反常色散光学滤波器的工作频率选在原子吸收线边翼(远离吸收中心), 则  $\bar{\alpha}$ ,  $\Delta\alpha$  都很小, 则(1)式变式,

$$T_r(\nu) = \sin^2(\rho L) \tag{2}$$

当  $\rho L = (n + 1/2)\pi$  时,  $T_r(\nu) \sim 100\%$ , 达到最大, 观测到透射峰. 当  $n$  取  $0, 1, 2, \dots$  时, 对应不同的透射峰, 即法拉第反常色散光学滤波器的透射谱具有多峰结构.

当外加恒定磁场  $B \sim 0.7 \times 10^{-2} T$ , Rb 气室温度  $\sim 129^\circ C$  时, 扫描 780 nm 半导体激光频率, 观测 Rb-D<sub>2</sub> 线法拉第反常色散光学滤波器透射谱如图 1 下部 (b) 所示, 为标定透射峰位置, 实验给出天然 Rb (<sup>85</sup>Rb 与 <sup>87</sup>Rb) D<sub>2</sub> 线的超精细跃迁吸收谱 [图 1 上部].

实验观测到两个强透射边峰  $T_a$  和  $T_b$ , 在它们的内侧各出现一个次边峰  $T'_a$  和  $T'_b$ ; 法拉第反常色散光学滤波器的透射边峰的中心频率随外磁场改变, 图 2 给出  $T'_a$  在不同磁场强度时透射峰的相对频移, 使用自由光谱区为 1.82 GHz 的 F-P 干涉仪测得磁场调谐能力约为 100 GHz/T (1 GHz/100 Gs).

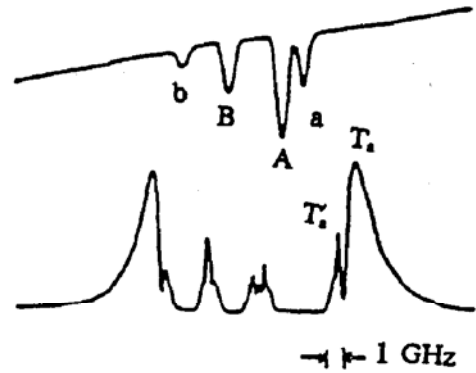


Fig. 1 FADOF transmission spectrum of the Rb-D<sub>2</sub> line,  
Upper curve: the hfs of the Rb-D<sub>2</sub> line,  
Lower curve: FADOF transmission spectrum

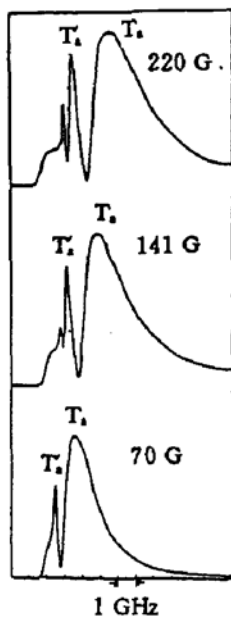


Fig. 2 Frequency shift of FADOF transmission peak under different magnetic

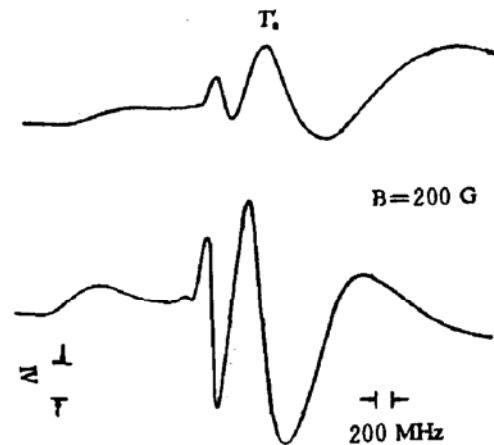


Fig. 3 FADOF transmission peak and its s curve under different magnetic, Upper: transmission peak  $T'_a$ , Lower: s curve

次边峰  $T'_a$  与边峰  $T_a$  相比 (见图 2) 具有线宽窄且谱线线形对称的特点, 选择  $T'_a$  作为跟踪锁定系统的鉴频谱线.  $T'_a$  的线宽  $\sim 300$  MHz, 峰值透过率 (线偏振光入射)  $\sim 51\%$  (当气室温度为  $129^\circ C$ , 磁场强度为  $0.7 \times 10^{-2} T$  时).

### 3 频率跟踪锁定实验

频率跟踪锁定系统与常用的原子(分子)谱线稳频原理相同(Rb-法拉第反常色散光学滤波器代替 Rb 气室),在此不再赘述.

半导体激光器是 Sharp LT021, 阈值电流为 73 mA, 工作温度  $\sim 21^\circ\text{C}$ , 激光频率电调率  $\sim 3.4 \text{ GHz/mA}$ . Rb-法拉第反常色散光学滤波器的 Rb 气室为  $\Phi 20 \text{ mm}$ ,  $l = 50 \text{ mm}$  的柱泡, 抽真空到  $1.33 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  后充入适量的天然铷, 气室工作温度  $\sim 129^\circ\text{C}$ . Rb 气泡置于  $\Phi 50 \text{ mm}$ ,  $l = 105 \text{ mm}$  的螺线管磁场中, 螺线管提供  $0 \sim 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$  的直流磁场, 螺线管中心与端面磁场不均匀性小于 3%, Rb 气室处磁场不均匀性小于 1%. 置于气室两端正交配置的格兰-汤姆逊棱镜的消光比为  $1 \times 10^{-5}$ .

采用一次微商稳频方案, 激光器注入电流调制频率 1 kHz, 调制幅度(峰-峰值)  $\sim 10 \mu\text{A}$ . 图 3 给出磁场强度为  $2.2 \times 10^{-2} \text{ T}$  时, 激光频率扫过  $T_0$  由 PSD 输出测得的鉴频曲线, 即一阶导数曲线. (图中上半部是  $T_0$  透射谱线, 图下部是相应的鉴频曲线).

图 4 给出频率跟踪锁定系统由开环到闭环时 PSD 的输出信号变化情况, 闭环后半导体激光频率起伏比闭环前下降了两个数量级以上. 连续改变直流磁场, 即调谐  $T_0$  中心频率时, 半导体激光频率可连续跟踪锁定.

利用 A/D, D/A 数据采集系统, 对不同磁场、不同取样时间的误差信号进行计算机处理, 得到用阿仑方差表示的频率稳定度  $\sigma(2, \tau)$ . 有关数据列于表 1: (表中  $k$  表示鉴频斜率,  $V_0$  为误差信号,  $\tau$  是取样时间)

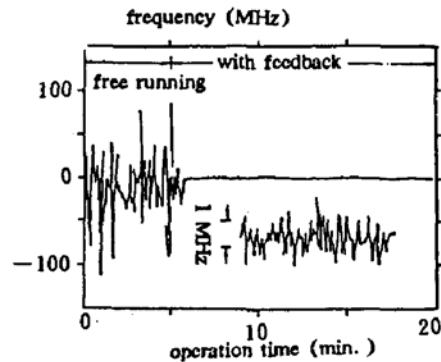


Fig. 4 Frequency fluctuation for loop open and loop close

Table 1

$B$ ( $\times 10^{-2} \text{ T}$ )	$K$ (kHz/mV)	$V_0$ (mV)			$\sigma(2, \tau)$		
		$\tau = 100 \text{ ms}$	$\tau = 1 \text{ s}$	$\tau = 10 \text{ s}$	$\tau = 100 \text{ ms}$	$\tau = 1 \text{ s}$	$\tau = 10 \text{ s}$
2.2	55.2	0.89	0.90	0.50	$1.3 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-10}$	$7.2 \times 10^{-11}$
1.41	32.8	2.48	0.84	0.49	$2.1 \times 10^{-10}$	$7.1 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-11}$
0.7	24.5	2.47	1.29	0.23	$1.6 \times 10^{-10}$	$8.2 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-11}$

表中鉴频斜率  $K$  是这样标定的: 用 X-Y 记录仪同时记录 PSD 输出的鉴频曲线(图 3)和 F-P 扫描干涉仪的透射曲线(自由光谱范围 1.82 GHz), 用以标定鉴频曲线的频率变化 ( $\sim 417 \text{ MHz/cm}$ ). 例如图 3(a) 测量结果如下:  $X = 100 \text{ mV/cm}$ ,  $Y = 100 \text{ mV/cm} \times 10$ , PSD 输出灵敏度  $100 \text{ mV} \div 10$  ( $\tau = 10 \text{ ms}$ ), 由以上数据算得  $K' = 0.48 \text{ cm}/200 \text{ MHz}$ , 进而得到鉴频斜率  $K = 55.2 \text{ kHz/mV}$ .

### 4 结果与讨论

利用法拉第反常色散光学滤波器透射谱边峰磁场调谐特性, 将其与原子(分子)稳频方法相结合可获得连续可调的稳频输出激光. 实验得到: 当法拉第反常色散光学滤波器磁场从  $0.7 \times 10^{-2} \text{ T}$  至  $2.2 \times 10^{-2} \text{ T}$  连续变化时, 半导体激光器频率能在 2 GHz 范围内连续跟踪锁定, 频

率稳定度优于  $2.1 \times 10^{-10}$  ( $100 \text{ ms} \leq \tau \leq 10 \text{ s}$ ).

分析表明,法拉第反常色散光学滤波器透射谱边峰的中心频率不仅与磁场强度有关,而且也随气室原子密度  $N$  发生变化. 由于  $N$  与原子气体所处温度  $T$  有关,所以边峰中心频率也可通过改变温度实现调谐. 实验测得,Rb-法拉第反常色散光学滤波器透射峰的温度频移为  $\pm 15 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ . 在基于磁调谐特性的法拉第反常色散光学滤波器跟踪锁定系统中,保持原子密度  $N$  恒定是个重要问题,所以将系统中的 Rb 气室设计如图 5 所示. Rb 原子贮存在用高精密控温器控温(控温精度  $\sim 0.01^\circ\text{C}$ , 相应温度频移  $< 15 \text{ kHz}$ )的冷子中以保证由温度引起的频率不稳定性对跟踪锁定系统无影响. 气室与冷子分别在  $T_1$  和  $T_2$  处.  $T_1$  决定原子气体的线宽(Doppler 增宽与碰撞增宽),  $T_2$  决定原子气体密度  $N$ .

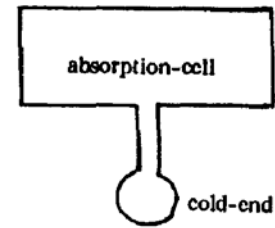


Fig. 5 Structure of the cell

### 参 考 文 献

- [1] T. Okoshi, K. Kikuchi, Frequency stabilization of semiconductor laser by using a Fabry-Parot interferometer. *Electron. Lett.*, 1980, 16: 179~181
- [2] H. Tsuchida, M. Ohtsu, et al., Frequency stabilization of AlGaAs semiconductor laser based on the  $^{85}\text{Rb}-\text{D}_2$  line. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1982, 21(9): 561~563
- [3] Y. Sakai, S. Sudo, T. Ikegami, Frequency stabilization of laser diodes using 1.51~1.55  $\mu\text{m}$  absorption lines of  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  and  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, QE-28(1): 75~81
- [4] 陈怀林, 彭玉峰, 汤俊雄等, 一种新型原子共振滤波器研究. *光学学报*, 1992, 12(9): 841~845

## A novel method for frequency-tracking and locking of laser diode

WANG Qingji    CHEN Rong    PENG Yufeng

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

(Received 7 September 1992; revised 16 November 1992)

### Abstract

We present here a novel method to track and lock the frequency of laser diode using the transmission spectrum of a Faraday anomalous dispersion optical filter (FADOF) as the frequency discriminator. The frequency stability obtained is better than  $2.1 \times 10^{-10}$  for  $100 \text{ ms} \leq \tau \leq 10 \text{ s}$  sampling time. And by changing the intensity of magnetic field from  $0.7 \times 10^{-2} \text{ T}$  to  $2.2 \times 10^{-2} \text{ T}$ , we obtained a continuous frequency scan of more than 2 GHz.

**Key words** Faraday anomalous dispersion optical filter, frequency tracking and locking.