

# 半导体激光器线宽压窄及其特性研究

柴燕杰 张汉一 周炳琨 吴群  
(清华大学无线电电子学系)

## 提 要

本文从理论上分析了外腔半导体激光器的线宽压窄原理,用延时自外差法对外腔半导体激光器的线宽特性进行了测量研究,得到了线宽反比于激光器输出功率及外腔反馈率的实验结果。

关键词: 半导体激光器; 线宽; 外腔。

## 一、前 言

80年代初以来,相干光通信技术得到了迅猛的发展<sup>[1,2]</sup>,由于利用了相干调制方式及外差接收手段,大大提高了系统检测灵敏度,增长了传输距离。同时,相干光通信又对光源提出了新的要求:即窄线宽,频率稳定和可调谐性。虽然采用特殊工艺已得到了较为稳定的单模半导体激光器(如DFB等)<sup>[3]</sup>,但其线宽较宽(通常大于10 MHz),不能满足PSK, DPSK等系统的要求(小于1 MHz),而利用外腔技术则可大幅度地压窄半导体激光器的线宽<sup>[4,5]</sup>,其基本原理就是将经外腔延时后的光波再反馈回有源区中与腔内光场进行有效相干作用,在一定条件下即可抑制光场的相位噪声,压窄激光线宽。外腔半导体激光器已在许多相干光通信系统中得到了应用<sup>[4,6]</sup>,表明窄线宽的外腔半导体激光器在相干光通信技术中占有重要地位,本文首先分析了外腔法压窄半导体激光器线宽的原理,然后给出了用延时自外差方法(Delayed self-heterodyne method)<sup>[7]</sup>对外腔半导体激光器线宽的测量结果,并在国内首次报道了输出功率及外腔反馈率对线宽特性影响的研究结果。

## 二、外腔半导体激光器线宽压窄原理

图1为外腔半导体激光器结构简图,为明了起见,其中略去了构成外腔所必需的光耦合元件(如显微物镜,自聚焦透镜等),因此,外腔长 $L$ 为包括光耦合元件及无源外腔在内的有效光学长度,激光管本征腔长为 $l$ ,有源区折射率为 $n$ ,激光管两个端面及外反馈元件的光强反射率分别为 $R_1, R_2$ 和 $R_3$ ,其中外反馈元件可以是平面镜、光栅、光纤等,这里只用有效反馈率 $R_3$ 对其进行特征描述,设有源区内单模激光场为

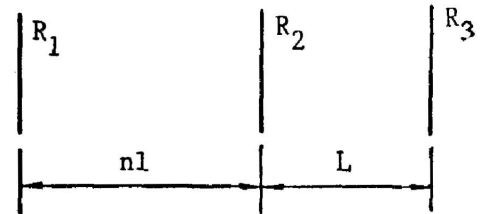


Fig. 1 Schematic diagram of external cavity semiconductor laser

$$E(t) = E_0(t) \exp[-i\omega t - i\phi(t)], \quad (1)$$

式中  $\omega$  为激光振荡频率,  $\phi(t)$  为随时间起伏的相位因子,  $E_0(t)$  为缓变振幅, 由于高次反射光较弱, 因此仅需考虑由于外腔的单次反射和耦合面  $R_2$  反射而进入有源区中的光波场  $E_r(t)$  为

$$\left. \begin{aligned} E_r(t) &= E(t) \sqrt{R_2} + E(t-z)(1-R_2) \sqrt{R_3}, \\ \tau &= 2L/c, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2) 式中忽略了由于延时而引起的反馈光与有源区内光场的差别。式中  $\tau$  为光子在外腔中的往返渡越时间。由上述结果可写出外腔半导体激光器的光场运动方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE(t)}{dt} &= i\omega_0 E(t) + \frac{1}{2}(G-\gamma)(1-i\alpha)E(t) + \frac{X}{\tau} E(t-\tau) \exp(i\phi_0), \\ X &= \frac{1-R_3}{\sqrt{R_2}} \sqrt{R_2} \frac{\tau}{\tau_{in}}, \\ \phi_0 &= \omega\tau + \phi_m, \quad \tau_{in} = \frac{2nl}{c}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\tau_{in}$  为光子在本征腔内的往返渡越时间,  $\omega_0$  为内腔的无源谐振频率,  $G$  为净增益速率,  $\gamma$  为腔的总损耗率,  $\phi_m$  为光场在外反馈元件上产生的相移,  $\alpha$  为半导体激光器的线宽加宽因子<sup>[8]</sup> (Linewidth enhancement factor),  $X$  称为反馈因子 (Feedback factor)。

在方程 (3) 中加入描述半导体激光器相位噪声的 Langevin 噪声项, 同时考虑到载流子浓度  $N$  的变化对光场特性的影响, 用光强  $I(t)$  替代  $E(t)$  ( $E(t) = \sqrt{I(t)}$ ), 并对  $I(t)$  及  $\phi(t)$  的非线性项关于  $\tau$  做一阶泰勒 (Taylor) 近似展开, 利用傅里叶变换对上述所得结果进行频谱分析, 即可得到外腔半导体激光器的线宽为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\nu &= \Delta\nu_0 / [1 + \sqrt{1 + \alpha^2} X \cos \Delta\phi]^2, \\ \Delta\phi &= \phi_0 + \text{tg}^{-1} \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$\Delta\nu_0$  为无外腔时的线宽, 且  $\Delta\nu_0$  正比于内腔 (无外腔时) 功率  $P$ , 在相位匹配条件下, 即  $\cos \Delta\phi = 1$  时, 可得到最窄线宽

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 / [1 + \sqrt{1 + \alpha^2} X]^2, \quad (5)$$

在一般情况下, 上式中的分母远大于 1, 因此 (5) 式可近似为

$$\begin{aligned} \Delta\nu &= \Delta\nu_0 (1 + \alpha^2)^{-1} X^{-2} \\ &= \Delta\nu_0 (1 + \alpha^2)^{-1} \left( \frac{1-R_3}{\sqrt{R_2}} \right)^{-2} R_3^{-1} (nl)^2 L^{-2}, \end{aligned} \quad (6)$$

在其它各量保持不变的情况下, 由上式可得

$$\Delta\nu \propto R_3^{-1}, \quad (7)$$

当对激光管加外腔后, 由于外腔作用, 在同一注入电流强度下, 其输出功率将会改变, 我们的实验结果表明, 外腔与内腔的  $P \sim I$  曲线具有相同的斜率, 即外腔输出功率  $P$  正比于内腔输出功率  $P_0$ , 即

$$\Delta\nu \propto \Delta\nu_0 \propto P_0^{-1} \propto P^{-1}. \quad (8)$$

这一结果表明, 外腔半导体激光器的线宽反比于外腔反馈率  $R_3$  及其输出功率  $P$ , 增大  $R_3$  及  $P$  均有利于压窄线宽。

### 三、外腔半导体激光器及线宽测量系统

实验中所用的激光器为平面镜外腔半导体激光器,如图 2 所示,激光管型号为 Hitachi HLP-1400,波长  $\lambda=0.83\mu\text{m}$ , 阈值电流  $I_{\text{th}}=56\text{mA}$ , 为增强模稳定性,由热敏电阻  $R_t$  和 Peltier 半导体致冷器进行温度控制,控制部分为  $P-I-D$  电路,控温精度  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。光束的准直是由渐变折射率光纤棒实现的,其长度为 0.23 个节距(pitch),实验表明,使用渐变折射率光纤棒使得外腔的调整方便易行,输出光束质量好,并可得到较高的与光纤耦合效率,光反馈元件为镀有多层介质膜的平面镜,反射率  $R_3=50\%$ , 加外腔后,由于腔的品质因数提高,阈值电流降低为  $I'_{\text{th}}=53\text{mA}$ , 激光器参数为:外腔长  $L=3\text{cm}$ , 本征腔长  $l=200\mu\text{m}$ , 有源区折射率  $n=3.5$ , 该外腔半导体激光器可稳定地工作于单模状态,边模抑制比(主模对边模的强度比)大于 30 dB。



Fig. 2 External cavity semiconductor laser

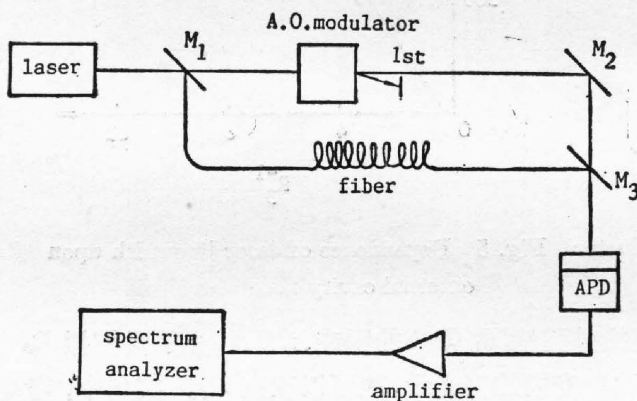


Fig. 3 Delayed self heterodyne linewidth measurement system

当  $\tau_d^{-1}$  小于激光线宽  $\Delta\nu$ ,  $f_s$  远大于  $\Delta\nu$  时,由频谱仪测量两束光的差拍谱即可得到激光线宽(如图 3 所示)为

$$\Delta\nu = \frac{1}{2} \Delta\nu_B, \quad (9)$$

其中  $\Delta\nu_B$  为差拍谱宽度,系统线宽分辨率为

$$\delta\nu = 0.5/\tau_d, \quad (10)$$

在本文报道的实验系统中,光纤长度为 3 km, 移频量 70 MHz, 线宽分辨率为 30 kHz, 输出信噪比大于 40 dB, 差拍信号稳定性好。

### 四、外腔半导体激光器线宽特性研究

实验中,我们测量了激光器输出功率及外腔反馈率对外腔半导体激光器线宽特性的影响,以下为实验描述及结果分析。

通过改变激光器注入电流强度  $I$  即可测得外腔半导体激光器输出功率  $P$  对线宽  $\Delta\nu$  的影响, 由于超过阈值部分的电流  $\Delta I (= I - I_{th})$  正比于输出功率  $P$ , 因此, 可将  $I$  换算为  $P$ , 实验测得外腔激光器的斜效率为  $\eta = 0.2 \text{ mW/mA}$ , 改变  $I$  值从  $55 \text{ mA}$  至  $63 \text{ mA}$ , 用延时自差拍法测其相应的线宽  $\Delta\nu$ 。对测量结果的分析表明,  $\Delta\nu$  与  $P$  的倒数成正比关系 (见图 4), 即外腔半导体激光器的线宽反比于其输出功率, 与理论分析结果相一致。对于我们所用的外腔半导体激光器, 其线宽与功率积为  $\Delta\nu \cdot P = 530 (\text{kHz} \cdot \text{mW})$ , 即当外腔半导体激光器的输出功率  $P = 1 \text{ mW}$  时, 其线宽为  $\Delta\nu = 530 \text{ kHz}$ 。

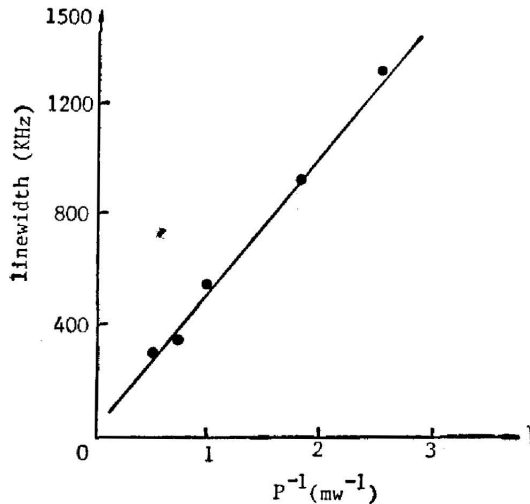


Fig. 4 Dependence of external cavity semiconductor laser linewidth upon laser output power

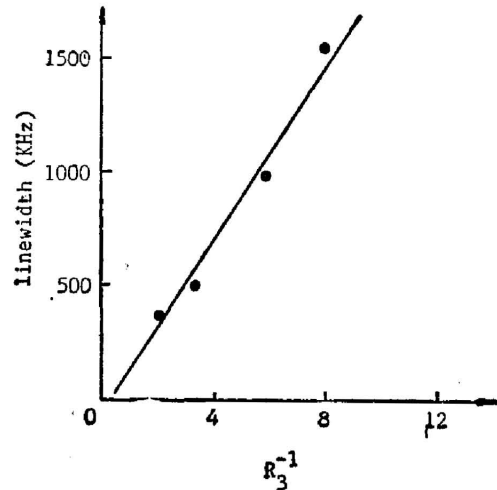


Fig. 5 Dependence of laser linewidth upon external cavity feedback level

在  $\Delta\nu \sim R_3$  关系测量中, 为避免由于更换外腔镜  $R_3$  带来的困难, 利用挡光手段模拟  $R_3$  的变化, 具体是由一直边单面光阑实现的, 改变光阑的挡光量, 就可以改变  $R_3$ 。实测中, 考虑到由于直边衍射会引起反馈光波前畸变, 因此反馈光与腔内光场的有效相互作用将减弱, 并利用分析结果对  $R_3$  进行了修正。测量结果表明,  $R_3$  越大, 线宽  $\Delta\nu$  越小, 并且线宽反比于  $R_3$  变化 (如图 5 所示)。实验中改变  $R_3$  从  $12\%$  至  $50\%$ , 测得激光器线宽由  $1.6 \text{ MHz}$  减小到  $360 \text{ kHz}$ 。

## 五、结 论

在本文中, 我们分析了外腔半导体激光器的线宽压窄原理, 描述了实验所用外腔半导体激光器与延时自外差线宽测量系统, 并在国内首次报道了输出功率及外腔反馈率对外腔半导体激光器线宽特性影响的实验结果, 得到了外腔半导体激光器的线宽反比于输出功率与外腔反馈率的结论, 实验结果与理论分析相一致。

## 参 考 文 献

- [1] Y. Yamamoto; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17, No. 6 (Jun), 919~935.
- [2] T. Okoshi; *J. Lightwave Tech.*, 1984, LT-2, No. 4 (Aug), 341~346.
- [3] K. Kmura et al.; *Digest of ECOC '84*, 228~229.

- [4] N. A. Olsson *et al.*; *J. Lightwave Tech.*, 1987, **LT-5**, No. 4 (Apr), 510~515.  
[5] S. Saito *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 6 (Jun), 961~970.  
[6] J. -M. P. Delavaux *et al.*; «Digest of CLEO' 88», TUO2.  
[7] T. Okoshi *et al.*; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 16 (Aug), 630~631.  
[8] C. H. Henry; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 2 (Feb), 259~264.

## Linewidth reduction of semiconductor lasers and study of linewidth property

CHAI YANJIE, ZHANG HANYI, ZHOU BINGKUN AND WU QUN  
(Department of Radio Electronics, Tsinghua University, Beijing)

(Received 18 December 1988; revised 3 April 1989)

### Abstract

In this paper, principles of linewidth reduction of external cavity semiconductor lasers are analyzed. Linewidth measurement is performed by the Delayed Self Heterodyne Method. It is obtained experimentally that laser linewidth is reversely proportional to laser output power and external cavity feedback level.

**Key words:** semiconductor laser, linewidth; external cavity.