

# 强反馈光纤光栅外腔半导体激光器\*

安宏林 林祥芝 闫 宏 崔晓明 刘弘度

(北京大学物理系, 国家介观物理重点实验室, 北京 100871)

**摘 要** 在理论上对强外腔反馈情形的外腔半导体激光器线宽压窄效应进行了分析, 对消反膜剩余反射率、外腔反射率、外腔腔长对线宽压缩的影响进行了研究; 在实验上采用光纤光栅作为反馈元件, 与一端镀有消反膜的  $1.5 \mu\text{m}$  波段的常规多纵模半导体激光器耦合, 构成强反馈光纤光栅外腔半导体激光器, 得到单频窄线宽的激光输出, 静态下边模抑制比大于 30 dB, 线宽小于 120 kHz。

**关键词** 光纤光栅, 外腔半导体激光器。

## 1 引 言

单频窄线宽的半导体激光器在高速光纤通信系统中有重要的应用。常规  $1.5 \mu\text{m}$  波段的异质结半导体激光器一般为多纵模工作, 而分布反馈、分布布拉格反射激光器虽为单纵模工作, 但其线宽一般为几十兆赫, 也不满足高速光纤通信系统的要求。利用外腔技术可有效压缩激光器的线宽<sup>[1~4]</sup>, 尤其是采用强反馈结构(激光器与外腔耦合的端面镀有消反膜), 除可大幅度压缩激光线宽外, 还具有光谱稳定性好、对外界扰动相对不敏感等优点, 因而备受关注。

本文报道强反馈情形光纤光栅外腔半导体激光器的一些研究结果。在理论上研究了腔面剩余反射率、外腔反射率、外腔腔长对线宽压缩的影响; 在实验上采用光纤布拉格反射器(FBR)<sup>[5]</sup>即光纤光栅作为外腔反馈元件, 得到了单频窄线宽的激光输出。

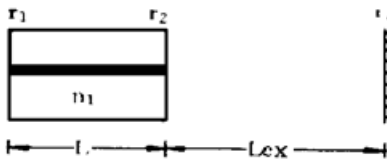
## 2 理论分析

光纤光栅外腔激光器的简化示意图如图 1 所示。 $r_1$ 、 $r_2$  分别为半导体激光器解理面的振幅反射率。未镀消反膜前,  $r_1 = r_2$ , 镀了消反膜后  $r_2$  降低。 $r_3$  为外腔的振幅反射率, 其中已包括光纤与激光器的耦合损耗  $\eta$ ,  $r_3^2 = \eta^2 R_3$ ,  $R_3$  为外腔反馈元件功率反射率。 $L$  为激光器有源区长度,  $L_{\text{ex}}$  为外腔的光学长度,  $n_1$  为有源区的折射率。设激光在激光器有源区内往返时间为  $\tau_{\text{in}}$ , 在外腔中的往返时间为  $\tau_{\text{ex}}$ 。实验中得到的激光线宽在 1 MHz 以下, 其相干长度远大于外腔长  $L_{\text{ex}}$ 。引进等效反射率  $r(\omega)$ , 可将外腔激光器简化为法布里-珀罗激光器进行分析。

$$r(\omega) = \frac{r_2 + r_3 \exp(j\omega\tau_{\text{ex}})}{1 + r_2 r_3 \exp(j\omega\tau_{\text{ex}})} \quad (1)$$

\* 国家科委 863 高科技项目和八五攻关研究项目。

收稿日期: 1996 年 7 月 28 日; 收到修改稿日期: 1997 年 3 月 27 日



由外腔激光器中光子数、相位、载流子的运动方程, 采用文献[6]中的步骤, 可得到外腔激光器线宽为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\nu = \frac{R_0}{4\pi P} W_1 W_2 (1 + \alpha^2) \tag{2}$$

Fig. 1 Schematic diagram of the optical fiber grating external cavity semiconductor laser

式中的:

$$W_1 = \frac{v_g h\nu}{L} \ln \{ [r_1 |r(\omega)|]^{-1} \} \left[ 1 + \frac{r_1}{|r(\omega)|} \frac{1 - |r(\omega)|^2}{1 - r_1^2} \right]^{-1}$$

$$W_2 = \left\{ 1 - \frac{1}{\tau_{in}} \operatorname{Re} \left[ j \frac{1}{r(\omega)} \frac{dr(\omega)}{d\omega} \right] + \frac{\alpha}{\tau_{in}} \operatorname{Im} \left[ j \frac{1}{r(\omega)} \frac{dr(\omega)}{d\omega} \right] \right\}^{-2}$$

$R_0$  为自发辐射速率,  $v_g$  为激光在有源区内的群速,  $P$  为从  $r_1$  端腔面出射的光功率,  $\tau_{in} = \frac{2n_g L}{c} = \frac{2L}{v_g}$ ,  $\alpha$  为线宽展宽因子,  $n_g$  为模式有效折射率。

由(2)式知,  $\Delta\nu$  为  $r_2$  的函数, 不妨设为  $\Delta\nu(r_2)$ 。在最低阈值近似条件下, 利用(2)式以及文献[8]中的(80)式, 可以推出加外腔后线宽的压缩比  $F$  为

$$F = \frac{\Delta\nu(r_2 = 0)}{\Delta\nu(r_2)} \left[ \frac{2(1 - r_1^2)r_3 \ln(r_1 r_3)}{(r_1 + r_3)(1 - r_1 r_3) \ln(r_1^2)} \right]^2 \left[ \frac{n_g L + L_{ex}}{n_g L} \right]^2 \tag{3}$$

利用(3)式计算了剩余反射率  $r_2$ 、外腔腔长  $L_{ex}$ 、外腔反射率  $r_3$  对激光器线宽压缩的影响。计算中所取参数为

- 解理腔面反射率  $r_1 = 0.565$ , 激光器有源区长度  $L = 300 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,
- 模式有效折射率  $n_g = 4.0$ , 激光波长  $\lambda = 1.53 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,
- 线宽展宽因子  $\alpha = 5.0$ , 自发发射因子  $R_0 = 1.6 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,
- 由  $r_1$  端出射的激光功率  $P = 1.0 \text{ mW}$ 。

图2为不同外腔反射率的情形下线宽压缩比  $F$  随  $r_2$  变化的关系, 计算中取外腔长为 50 cm。由图可看出,  $r_2$  减小, 线宽压缩比增加, 故为获得窄线宽的激光, 应尽可能减小  $r_2$ , 所以镀膜质量的好坏直接影响激光器的线宽; 由图2还可看出,  $R_3$  增加, 线宽压缩比也增加。这是易于理解的, 因为镀了消反膜后, 激光器谐振腔特性主要由  $r_1$ 、 $r_3$  决定,  $r_3$  越大, 谐振腔内损耗越小, 腔品质因子  $Q$  值越高, 输出光的线宽越小。故为了压缩线宽, 还应尽可能使用高反射率的光纤光栅器件作为外腔。

图3为线宽压缩比  $F$  与外腔腔长  $L_{ex}$  的关系, 计算中取  $r_2 = 0.1$ , 外腔峰值功率反射率  $R_3$

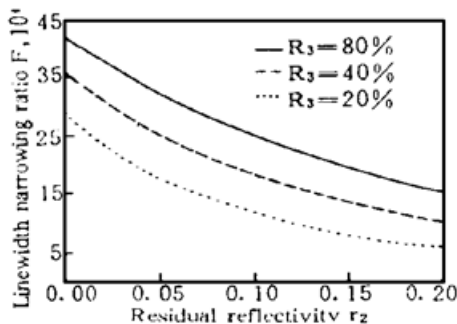


Fig. 2 Relation between linewidth narrowing ratio  $F$  and residual reflectivity  $r_2$  with different external-cavity reflectivities

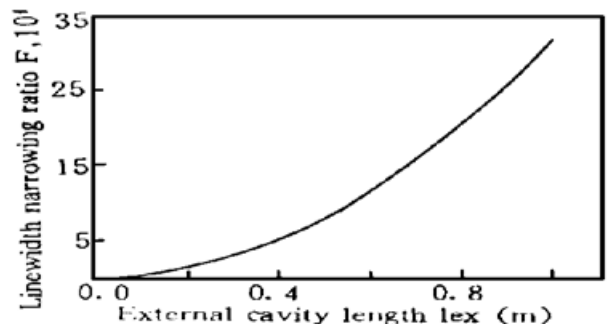


Fig. 3 Relation between linewidth narrowing ratio  $F$  and external cavity length  $L_{ex}$

= 60%，光纤与激光器的耦合效率为 50%。由图所示，外腔越长，激光线宽越窄。故适当增加外腔长，有利于压缩线宽。但外腔长较长时，外腔纵模间隔减小，不利于旁模的压制。实验中采用的光纤光栅器件为窄带反射元件，较普通平面腔镜更有利于选模，在外腔腔长为 1 m 左右时，仍可实现单纵模的激光振荡。

### 3 实验结果与讨论

实验示意图如图 4 所示。所用光纤光栅的峰值反射率为 72%，反射带宽 1.5 nm，其反射谱如图 5 所示。光纤光栅一端与半导体激光器耦合作为外腔，腔长为 121 cm；另一端则作为输出端，与光谱测量系统相连。由理论分析可知，提高外腔反射率  $r_3$  有利于压缩激光器的线宽。实验中，除选用反射率较大的光纤光栅外，还应尽可能提高光纤光栅外腔与半导体激光器的耦合效率。为此，

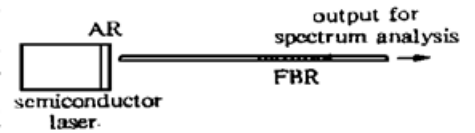


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

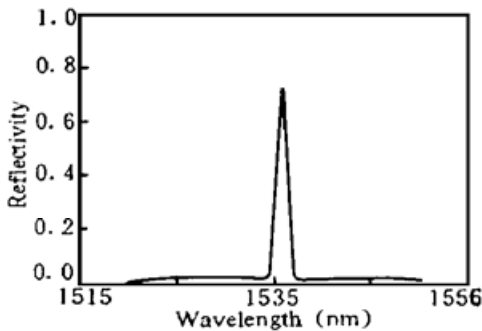


Fig. 5 Reflection spectrum of FBR

采用化学腐蚀方法在光纤端面上制作了微透镜使光纤模场与激光模场相匹配，耦合效率一般为 50%，最高达 68%。所用 1.5 μm 波段半导体激光器为条形掩埋 InGaAsP 半导体激光器，由国家微电子工艺中心提供，一端已镀有消反膜，功率反射率估计在 10% 以下。实验中，激光器工作温度由 Peltier 半导体致冷器和温度传感器进行控制与调节，控温精度为 ±0.01℃。

调节半导体激光器与光纤光栅的耦合使其达到最佳状态(此时输出光最强)，观察输出光谱的变化，同时调节激光器的热沉温度，即可得到纯净的单纵模输出光谱。在激光器工作电流为 70 mA、热沉温度为 16.13℃ 的条件下，输出光谱如图 6 所示，为单纵模振荡，测得其边模抑制比大于 30 dB。采用延迟自零差法(Delayed self-homodyne method)测量其频谱，结果如图 7 所示，由图得激光线宽为 120 kHz(受频谱仪分辨率及前置放大器带宽的影响，实际线宽应小于此值)。

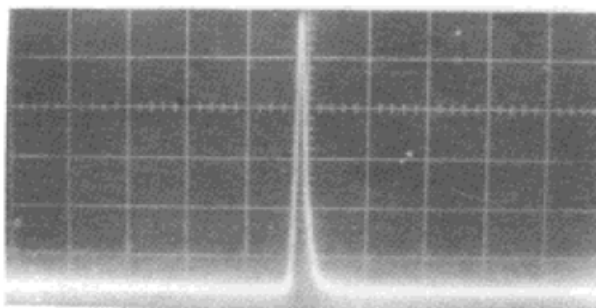


Fig. 6 The single-mode output spectrum of the semiconductor laser with FBR as external cavity. (Horizontal scale: 0.5 nm/Div)

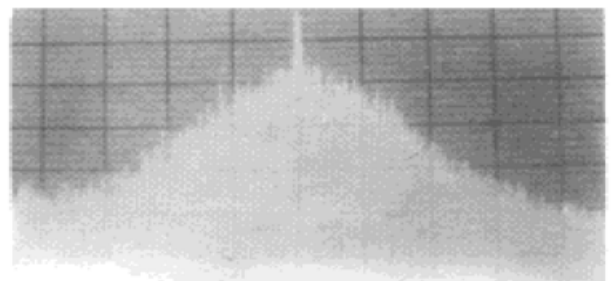


Fig. 7 The delayed self-homodyne spectrum of laser output (horizontal scale: 1 MHz/Div.; vertical scale: 10 dB/Div.)

实验中，激光器裸露在空气中，未加特殊的密封及防振装置，而输出光谱在整个实验过程中(约 3 hr)保持稳定，未发生跳模现象，抗外界振动干扰能力很强。由单色仪测得其激光波长为 1.5358 μm，正好是光纤光栅的峰值反射波长。由于强耦合光纤光栅外腔半导体激光

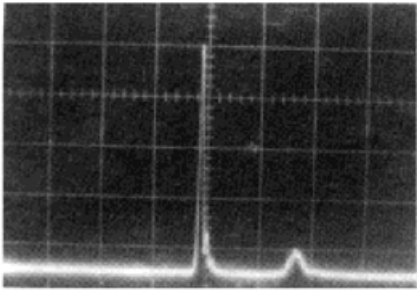


Fig. 8 The multi-longitudinal-mode spectrum of the external cavity laser (horizontal scale: 1 nm/div.)

器的波长完全由光纤光栅的峰值反射波长确定, 改变光纤光栅的布拉格波长即可实现对外腔激光器的调谐。为此, 研制了电调谐的光纤光栅器件, 并对电调谐光纤光栅外腔半导体激光器作了初步研究, 有关结果另文报道。

实验中还对光谱的温度稳定性进行了观测, 温度变化范围为  $7^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ , 当温度在  $7.00^{\circ}\text{C} \sim 9.02^{\circ}\text{C}$  及  $14.53^{\circ}\text{C} \sim 16.67^{\circ}\text{C}$  范围内时, 观察到激光输出为单纵模振荡; 而当温度移出此范围时, 有边模出现, 如图 8 所示。这表明激光器端面消反膜质量不好, 剩余反射率仍对输出光谱有影响, 这将对对外腔激光器的连续调谐产生不良影响。故以后实验中应提高镀膜质量, 降低端面剩余反射率, 这对外腔激光器的线宽压缩与波长连续调谐都是至关重要的。

**结 论** 本文在理论上分析了强反馈光纤光栅外腔半导体激光器线宽特性, 研究了端面剩余反射率、外腔腔长及外腔反射率等因素对频谱线宽的影响, 得到了对实验有指导意义的结果。在实验上, 用光纤光栅作外腔与常规半导体激光器耦合构成光纤光栅外腔半导体激光器, 在静态工作条件下得到了边模抑制比大于 30 dB、线宽小于 120 kHz 的激光输出。通过观察、分析温度变化对输出光谱的影响, 发现端面剩余反射率  $r_2$  仍不够小, 应进一步提高镀膜质量。

国家光电子工艺中心的毕可魁、汪孝捷提供了半导体激光器管芯并对半导体激光器腔面镀了消反膜, 作者在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] R. Wyatt, W. J. Devlin, 10 kHz linewidth  $1.5 \mu\text{m}$  InGaAsP external cavity laser with 55 nm tuning range. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(3) : 110~ 112
- [2] E. Brinkmeyer, W. Brennecke, M. Zürn *et al.*, Fibre Bragg reflector for mode selection and line-narrowing of injection lasers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(3) : 134~ 135
- [3] C. A. Park, C. J. Rowe, D. C. J. Reid *et al.*, Single-mode Behaviour of a multimode  $1.55 \mu\text{m}$  laser with a fibre grating external cavity. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(21) : 1132~ 1134
- [4] K.-Y. Liou, Y. K. Jhee, G. Eisenstein *et al.*, Linewidth characteristics of fiber-extended-cavity distributed-feedback lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(16) : 1039~ 1041
- [5] C. J. Rowe, I. Bennion, D. C. J. Reid, High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibers. *IEE Proceedings*, 1987, **134**(3) : 197~ 202
- [6] C. H. Henry, Theory of the linewidth of semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(2) : 259~ 264
- [7] E. Patzak, A. Sugimura, S. Saito *et al.*, Semiconductor laser linewidth in optical feedback configurations. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(24) : 1026~ 1027
- [8] C. H. Henry, Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifiers. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1986, **LT-4**(3) : 288~ 297

## Fiber Grating External Cavity Semiconductor Laser with Strong Optical Feedback

An Honglin    Lin Xiangzhi    Yan Hong    Cui Xiaoming    Liu Hongdu

(*Physics Department, National Key Lab. of Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871*)

(Received 28 July 1996; revised 27 March 1997)

**Abstract** The linewidth reduction of a external cavity semiconductor laser with strong optical feedback is analysed. The effects of residual reflectivity  $r_2$  of the AR-coated laser facet, external cavity reflectivity  $r_3$ , and external cavity length  $L_{ex}$  on the linewidth are studied theoretically. A fiber grating is coupled to a conventional multi-longitudinal-mode semiconductor laser with on facet AR-coated. Single longitudinal mode operation with side-mode suppression ration over 30 dB and linewidth below 120 kHz is achieved.

**Key words** optical fiber grating, external cavity semiconductor laser.