

弱耦合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

(北京大学物理系及国家介观物理重点实验室, 北京 100871)

摘 要 报道作者对单频窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器的一些研究结果。理论上分析了外腔的引入对激光器的阈值增益和光谱线宽的影响; 实验上用自行研制的光纤布拉格反射滤波器(FBR)与普通多纵模半导体激光器耦合, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段, 得到边模抑制比大于 25 dB, 线宽小于 60 kHz 的激光输出。

关键词 光纤布拉格反射滤波器, 光纤光栅, 半导体激光器。

1 引 言

在高速光通信系统、相干检测系统、高分辨率光谱测量等应用中需要单频窄线宽的半导体激光器。常规 $1.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 波段的半导体激光器一般为多纵模振荡, 每个纵模宽 $10^7 \sim 10^8 \text{ Hz}$ 。分布反馈(DFB)激光器虽为单纵模振荡, 但线宽仍不满足频移键控(PSK)、微分相移键控(DPSK)等系统的要求(线宽应 $< 1 \text{ MHz}$)。外腔技术可有效压缩半导体激光器的线宽^[1~4], 在光纤通信研究中已得到广泛应用。特别是应用光纤布拉格反射滤波器作反馈元件的光纤光栅外腔半导体激光器^[5, 6], 以其易于调整、抗振动干扰能力强、体积小、易于与光纤系统联接等优点而受到广泛重视。这种激光器已获得单频激光输出, 线宽小于 100 kHz, 且在高速调制下啁啾(Chirping)效应极小, 展示了优异的性能。光栅外腔半导体激光器中的关键元件—光纤布拉格反射滤波器, 既可用紫外辐照光敏效应制作^[7, 8], 也可采用 D 型光纤侧面刻蚀光栅的工艺制作^[9]。尤其是在 D 型光纤侧面上可以增加必要的覆盖层而赋予该滤波器以新的功能, 如可调谐和窄带耦合等。本文报道作者用自己研制的光纤布拉格反射滤波器与多纵模半导体激光器弱耦合(激光器与光纤外腔相对的腔面未镀消反膜, 故称弱耦合; 若镀有消反膜, 则称强耦合)构成光纤光栅外腔半导体激光器的一些研究结果。

2 理论分析

2.1 外腔反馈对半导体激光器阈值增益的影响

光纤布拉格反射滤波器外腔半导体激光器结构示意图如图 1(a)所示。半导体激光器有源

* 本文工作得到了国家 863 计划光电子主题研究项目(863-307-02-10-1)和八五攻关研究项目(85-718-10-10)的支持。

收稿日期: 1995 年 5 月 1 日; 收到修改稿日期: 1995 年 9 月 7 日

区长度为 L_1 , 折射率为 n , 解理面腔镜振幅反射率分别为 r_1 、 r_2 。在弱耦合情形下, 半导体激光器与光纤布拉格反射滤波器耦合的端面未进行消反射镀膜处理, 故 $r_1 = r_2 = 0.565$ 。 L_2 为外腔有效光学长度, r_3 为已将半导体激光器与光纤耦合损耗考虑在内的光纤布拉格反射滤波器有效反射率。设光纤布拉格反射滤波器的峰值功率反射率为 R_3 , 单模光纤与半导体激光器耦合效率为 η , 则 r_3 满足 $r_3^2 = \eta^2 R_3$ 。为便于分析, 引入等效反射率 r_2' , 可将图 1(a) 简化为等效

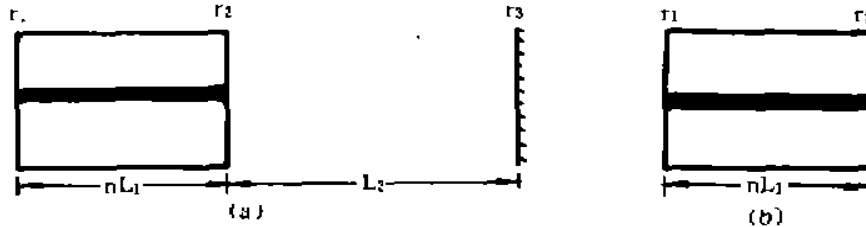


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the fiber grating external cavity semiconductor laser,

(b) Equivalent analytic model for the fiber grating external cavity semiconductor laser

模型图 1(b)。 r_2' 为

$$r_2' = \frac{r_2 + r_3 \exp(i\phi_2)}{1 + r_2 r_3 \exp(i\phi_2)} \quad (1)$$

式中 $\phi_2 = (4\pi L_2/\lambda)$ 。激光振荡的阈值条件为^[10]

$$\exp[(g - \alpha_{in})L_1] = \frac{1}{r_1 \exp(i\phi_1) r_2'} \quad (2)$$

式中 $\phi_1 = 4\pi n L_1/\lambda$ 。由(2)式得阈值振幅条件:

$$g_{th} = \alpha_{in} + \frac{1}{L_1} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2'} \right) + \alpha_{ex} \quad (3)$$

$$\alpha_{ex} = \frac{1}{L_1} \ln \left\{ \frac{\sqrt{[1 + r_3^2 + (r_2 r_3 + r_3/r_2) \cos \phi_2]^2 + [(r_3/r_2 - r_2 r_3) \sin \phi_2]^2}}{1 + (r_3/r_2)^2 - 2(r_3/r_2) \cos \phi_2} \right\} \quad (4)$$

相位条件为:

$$\phi_1 + \phi_2 = 2m\pi \quad (5)$$

$$\phi_1 = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{[(r_3/r_2) - r_2 r_3] \sin \phi_2}{1 + r_3^2 + [r_2 r_3 + (r_3/r_2)] \cos \phi_2} \right\} \quad (6)$$

式中 m 为整数, α_{in} 为腔内损耗, α_{ex} 为由于光栅外腔的存在而引起的附加损耗。对于不同的纵模, α_{ex} 也不同, 其值可正可负, 所以加外腔后纵模间增益差发生变化。若加大主模与边模的增益差, 即可压制边模, 实现单纵模振荡。实验中所用光纤布拉格反射滤波器的反射带宽为 1.5 nm, 半导体激光器的纵模间隔为 1.3 nm。仔细调节半导体激光器的工作温度及工作电流, 使得输出光谱中强度最强的一个纵模(主模)处于光纤布拉格反射滤波器反射带峰值位置。调节外腔腔长, 使 α_{ex} 为负极大值, 由(3)式知此主模的阈值增益将降低, 而其余纵模则处于光纤布拉格反射滤波器反射带之外, 受外腔反馈的影响较小, 阈值增益变化也小。故加上光纤布拉格反射滤波器外腔后半导体激光器的主模与边模的阈值增益差值增大, 从而提高了边模抑制比。详细的选模机制理论分析正在进行中, 实验上已实现了稳定的单纵模输出。

激光器阈值电流与激光谐振腔总损耗成正比, 由(3)式可得出阈值电流变化 ΔI_{th} 与附加损耗 α_{ex} 有如下关系

$$\frac{\Delta I_{th}}{I_{th}} = \frac{\alpha_{ex} L_1}{\alpha_{in} L_1 + \ln(1/r_1 r_2)} \quad (7)$$

由前面分析可知,加外腔后激光器的主模阈值增益减小,附加损耗 α_{ex} 为负值。由(7)式可知,外腔激光器的阈值也将降低,根据加外腔前后激光器阈值的变化,可以计算出 α_{ex} 值,再由(4)式,可以计算出外腔的有效反射率,并进而计算出半导体激光器与单模光纤外腔的耦合效率。实验中所用半导体激光器为(中科院半导体研究所提供的)1.5 μm 波段 InGaAsP/InP PBC 结构(P-substrate Buried Crescent)双异质结半导体激光器,有源区长 $L_1 \approx 240 \mu\text{m}$, $\alpha_{in} = 30 \text{ cm}^{-1}$, $I_{th} = 39.4 \text{ mA}$, r_1 、 r_2 约为 0.565。所用光纤布拉格反射滤波器峰值功率反射率为 60%。实验中激光器加上光纤布拉格反射滤波器外腔后,阈值降为 32.3 mA。由(7)式计算出 $r_3 = 0.40685$ 。根据 $r_3^2 = \eta^2 R_3$,计算出半导体激光器与光纤的耦合效率 η 为 52.5%,与实验中实际耦合效率相符。

2.2 外腔反馈对激光线宽的压窄

如上所述,光纤布拉格反射滤波器外腔反馈的引入使得常规多纵模半导体激光器实现了单纵模振荡,故以下分析中仅考虑激光器单纵模振荡情形。假设外腔长 L_2 远小于激光相干长度,由于半导体激光器谐振腔面未镀消反膜,可以略去高次反射光的影响而仅考虑外腔的单次反射。在平面波及缓变振幅近似下,参照文献[11]、文献[12]中的处理方法,可得外腔半导体激光器的最窄线宽为

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{[1 + \chi]^2} \quad (13)$$

$$\chi = \frac{(1 - r_3^2)}{r_2} r_3 \frac{L_2}{nL_1} (1 + \alpha^2)^{1/2} \quad (14)$$

式中 α 为线宽增宽因子。无外腔时, $r_3 = 0$, $\Delta\nu = \Delta\nu_0$, $\Delta\nu_0$ 称为半导体激光器的本征线宽。一般情形下, $\chi \gg 1$, (13)式可近似为

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 (1 + \alpha^2)^{-1} \frac{r_3^2}{(1 - r_3^2)^2 r_2^2} \frac{(nL_1)^2}{L_2^2} \quad (15)$$

由(15)式可知,加外腔后激光线宽与外腔反射率 r_3 及外腔长 L_2 的平方成反比。故提高外腔反射率 r_3 及增加外腔长 L_2 均有利于压窄线宽。

3 实验结果与讨论

实验装置简图如图 2 所示。其中的光纤布拉格反射滤波器为作者自行研制^[13],剖面结构

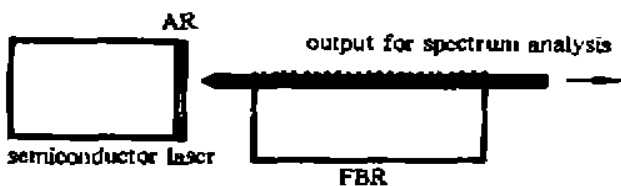


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

如图 3 所示。实验所用光纤布拉格反射滤波器的反射谱如图 4 所示,峰值反射率约为 60%,反射带宽为 1.5 nm。光纤布拉格反射滤波器与激光器耦合的一臂光纤长度约为 1.24 m。实验所用半导体激光器为 PBC 结构的双异质结 InGaAsP/InP

半导体激光器,型号为 No. Oczo-234,阈值电流 39.4 mA,激射波长 1.5454 μm ($T_c = 25^\circ\text{C}$)。激光器工作温度由传感器和 Peltier 半导体致冷器进行控制和调节,控温精度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。

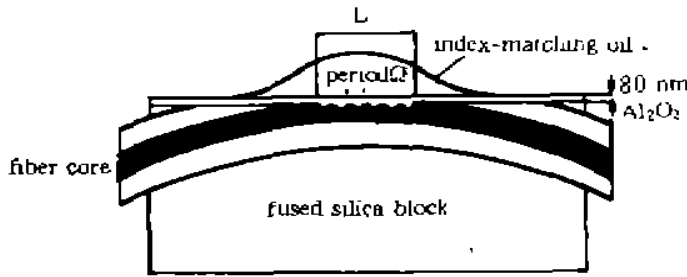


Fig. 3 Cross-section view of fiber Bragg reflective filter

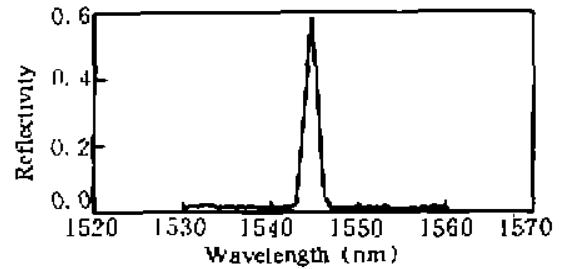


Fig. 4 Reflection spectrum of the fiber Bragg reflective filter

为提高半导体激光器与光纤光栅外腔的耦合效率，作者用化学腐蚀方法在光纤端面上制作了微透镜。实验中，耦合效率一般约为 50%，与前述由加外腔前后激光器阈值变化所得的耦合效率计算值 52.5% 相比，两者符合得很好。

未加外腔时，自由运转的半导体激光器其光谱如图 5(a) 所示，为多纵模振荡。将光纤布拉格反射滤波器的一臂与半导体激光器耦合起来，通过监测光纤布拉格反射滤波器另一臂输出的光功率来监测激光器与光纤的耦合情况，仔细调节光纤，使其与半导体激光器达到最佳耦合。用扫描光谱仪观测外腔激光器的输出光谱，通过调节激光器的工作温度来移动激光器的增益谱，使其主纵模落在光纤布拉格反射滤波器反射峰内，此时激光器光谱图如图 5(b) 所示，为单纵模振荡，边模已受到压制，其中图 5(a) 和图 5(b) 的水平轴频率刻度相同。通过测量图 5(b) 中主模与边模的高度比，得到最大边模抑制比为 25 dB。在整个测量过程中，激光器输出光谱保持稳定，未发生跳模现象。

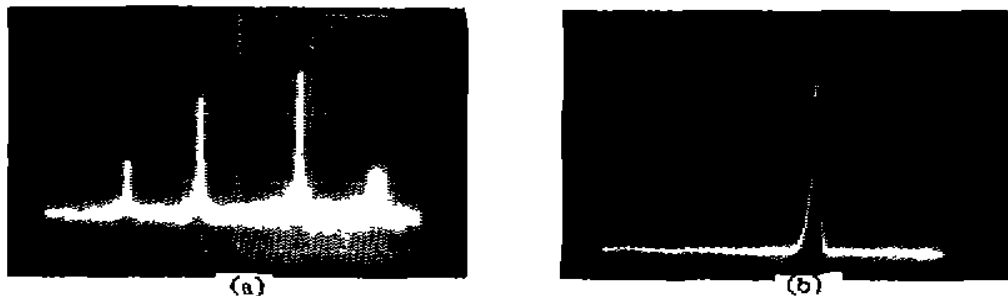


Fig. 5 (a) Optical spectrum of the semiconductor laser without feedback from external cavity, (b) Optical spectrum of the semiconductor laser with feedback from external cavity

得到单纵模的激射后，作者用延迟自零差方法^[14] (Delayed Self-Homodyne Method) 对其频谱进行了测量，所用频谱仪型号为 110 MHz Spectrum Analyser TF2370。测得的频谱图如图 6 所示，零频处的尖峰为频谱仪本身的频标，其宽度为 19 kHz，整个频谱图为频谱仪自身频标与激光拍频信号的迭加。从频标区域外起，测量拍频信号的半幅全宽 (FWHM) 约为 120 kHz，根据延迟自零差法测量线宽原理，激光器线宽为拍频信号半幅全宽的一半，即激光器线宽约为 60 kHz。考虑到放大器在零频附近放大倍数下降及零频频标的影响，实际激光谱宽应小于 60 kHz。

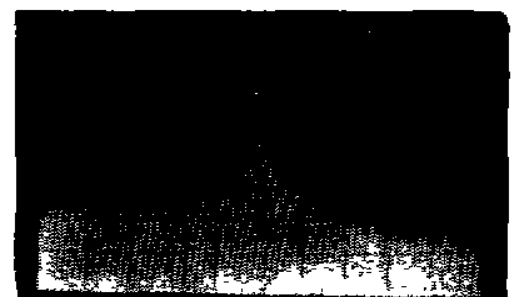


Fig. 6 Delayed self-homodyne spectrum of laser output, Horizontal scale is 2 MHz/Div.; Vertical scale is 10 dB/Div

实验中还观测了电流、温度变化对光谱稳定性的影响。温度变化范围为 10℃~20℃。其

结果为：在 $11\text{C}\sim 13\text{C}$ 及 $15\text{C}\sim 17\text{C}$ 的温度区间内，电流从 32.4 mA 加到 55 mA ，激光器保持单纵模振荡，边模抑制比大于 20 dB ，最好达 25 dB ；电流大于 55 mA 时，边模强度增加，边模抑制比下降；而当温度处于 $11\text{C}\sim 13\text{C}$ 及 $15\text{C}\sim 17\text{C}$ 范围之外时，激光器始终为多纵模振荡，与电流强度无关。此结果表明：当激光器处在 $11\text{C}\sim 13\text{C}$ 及 $15\text{C}\sim 17\text{C}$ 的温度范围内时，激光器的主振纵模处于光纤布拉格反射滤波器反射带内，相应的阈值增益最小，通过模式竞争压制了边模，从而实现了单纵模的输出；而当温度移出此范围时，激光器的光谱随温度的改变而移动，主振纵模移出光纤布拉格反射滤波器的反射带，光纤布拉格反射滤波器反射峰位于相邻两个纵模之间，两模增益差减小从而同时振荡，导致边模抑制比下降。电流的改变导致激光器有源区折射率的改变，从而导致振荡频率及纵模间隔的改变，故注入电流的变化也会影响激光器的输出光谱。

实验中还用具有不同反射波长的光纤布拉格反射滤波器与激光器耦合，观察其对光谱的影响。当滤波器的峰值反射波长与半导体激光器的本征波长即主振纵模波长相差较大时 ($\geq 4\text{ nm}$)，则在光谱中相应于滤波器反射波长处出现一振荡纵模；而原激光器的激射谱几乎不受影响。故为了得到单频的激光输出，在制作光纤布拉格反射滤波器的过程中，根据激光器的本征波长而精确控制光纤布拉格反射滤波器的波长是非常重要的。本实验室发展了一种精密控制光栅周期的方法， $\Delta\Lambda/\Lambda$ 精度可达 10^{-8} 。详细情况将另文报道。

结 论 本文应用光纤布拉格反射滤波器与常规多纵模半导体激光器耦合，构成光纤光栅外腔半导体激光器。从理论上分析了外腔的引入对半导体激光器的阈值、光谱和线宽的影响；实验上得到了单频窄线宽的输出，边模抑制比最好达 25 dB ，线宽约 60 kHz 。并对温度及电流对光谱稳定性的影响进行了观测。实验发现，根据半导体激光器的波长而精确控制光纤布拉格反射滤波器的反射波长是非常重要的。

北京大学无线电系的吴德明、朱立新、汤烁等诸位老师对激光器频谱的测量工作给予了很大的帮助，作者在此予以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] R. Wyatt, W. J. Devlin, 10 kHz linewidth $1.5\text{ }\mu\text{m}$ InGaAsP external cavity laser with 55 nm tuning range. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(3): 110~112
- [2] K.-Y. Liu, Y. K. Jhee, C. A. Burrus *et al.*, Narrow-linewidth fiber-external-cavity injection lasers. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(20): 933~934
- [3] R. Wyatt, Spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers with strong, frequency-selective feedback. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(15): 658~659
- [4] Chien-Yu Kuo, J. P. van der Ziel, Linewidth reduction of $1.5\text{-}\mu\text{m}$ grating loaded external cavity semiconductor laser by geometric reconfiguration. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(14): 885~887
- [5] E. Brinkmeyer, W. Brennecke, M. Zurn *et al.*, Fibre Bragg reflector for mode selection and line-narrowing of injection lasers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(3): 134~135
- [6] C. A. Park, C. J. Rowe, J. Buus *et al.*, Single-mode behavior of a multimode $1.55\text{ }\mu\text{m}$ laser with a fibre grating external cavity. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(21): 1132~1133
- [7] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825

- [8] H. G. Limberger, P. Y. Fonjallaz, R. P. Salathe, Spectral characterization of photoinduced high efficient Bragg grating in standard telecommunication fibres. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 47~49
- [9] C. J. Rowe, I. Bennion, D. C. J. Reid, High-reflectivity surface-relief gratings in single-mode optical fibres. *IEE Proc.*, 1987, **134**, Pt. J(3): 197~202
- [10] A. Olsson, C. L. Tang, Coherent optical interference effects in external-cavity semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(8): 1320~1323
- [11] G. P. Agrawal, Line narrowing in a single-mode injection laser due to external optical feedback. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(5): 468~471
- [12] C. H. Henry, Theory of the phase noise and power spectrum of a single-mode injection laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(9): 1391~1397
- [13] 闫宏, 林祥芝, 崔晓明等, 单模光纤布拉格反射滤波器. *光学学报*, 1994, **14**(4): 381~388
- [14] 谢世钟, 张汉一, 柴燕杰等, 高灵敏度实用化延迟自零差光谱线宽测试仪. 1991, *光电子器件与集成技术年会论文集*, 北京, 清华大学出版社, 1991, 394~397

Semiconductor Laser with Weak Coupling Fiber Grating External Cavity

An Honglin Lin Xiangzhi Yan Hong Cui Xiaoming Liu Hongdu

(Physics Department and National Key Laboratory of Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 1 May 1995; revised 7 September 1995)

Abstract Some results of our study on single frequency, narrow linewidth fiber grating external cavity semiconductor laser are reported in this paper. The effects of external cavity feedback on the threshold gain and emission linewidth are discussed theoretically; Laser emission with side mode suppression ratio more than 25 dB, spectrum linewidth narrower than 60 kHz is realized at 1.55 μm wavelength region experimentally by coupling a conventional multimode semiconductor laser with a fiber Bragg reflective (FBR) filter fabricated by ourselves.

Key words optical fiber Bragg reflective filter, fiber grating, semiconductor laser