

光纤光栅外腔反馈的高功率半导体激光器光谱特性的研究

孙军强 黄志坚 刘德明 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

提要 对光纤光栅外腔反馈的高功率半导体激光器的光谱线宽特性进行了理论与实验研究。理论分析表明,根据不同的外腔参数,激光器的线宽能被压缩或展宽。外腔反射率对光谱线宽的影响要比外腔腔长灵敏得多。实验实现了激光器的线宽由 6 nm 到 0.8 nm 的压缩。光纤光栅外腔反馈不仅能改善高功率半导体激光器的光谱特性,而且可提高激光器主模对次模的抑制比。

关键词 光纤光栅, 外腔反馈, 光谱线宽

1 引言

稳定可靠的掺铒光纤放大器是高速率、大容量全光通信系统中不可缺少的关键器件。掺铒光纤放大器的工作状况将直接受到泵浦用高功率半导体激光器的特性影响。半导体激光器的激射波长必须同掺铒光纤放大器的吸收峰相吻合,才能获得最佳的泵浦效率。大功率的半导体激光器一般增益谱较宽,因此,自由振荡的半导体激光器往往是处在多纵模工作状态。除此之外,它还有可能受到光纤放大器中其他光学器件的端面反射、多个泵浦激光器之间的相互注入、激光器的衰老、偏置电流的变化以及环境的影响,而造成激光器激射波长的漂移^[1],从而导致掺铒光纤放大器工作特性变差。很多结构复杂的半导体激光器,如 DBR,DFB 等激光器,都能控制激光器的激射波长,然而,在高功率工作下,它们的可靠性还不清楚。事实上,它们的基本原理就是将外腔光栅反馈的半导体激光器集成化。外腔反射镜反馈的半导体激光器对结构紧凑且廉价的掺铒光纤放大器实用性不大。光纤光栅^[2]的出现,为稳定泵浦用半导体激光器的波长提供了很好的途径。

本文从理论上分析了不同强度的外腔反馈引起激光器线宽变化的物理机制。并采用光纤光栅外腔反馈对半导体激光器的光谱特性影响进行了实验研究。

2 理论

众多的学者对外腔反馈引起激光器线宽变化的物理机制进行了理论研究^[3,4]。图 1 所示为外腔反馈半导体激光器的原理图。 r_1, r_2 为半导体激光器芯片对激光场幅度的反射率, r_3 为外腔反射光栅(或平面镜)对激光场的幅度反射率。当 $r_2 > r_3$ 时,外腔的反馈称为弱反馈;当 $r_2 <$

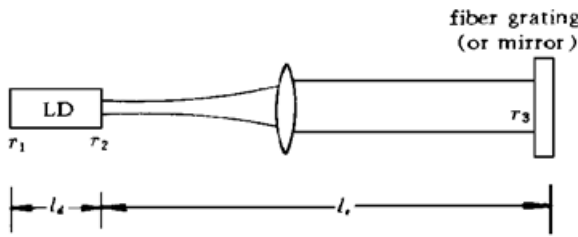


图 1 外腔反馈半导体激光器原理图

Fig.1 External-cavity semiconductor laser

r_3 时, 外腔的反馈称为强反馈。由传输线模型可得, 激光器的线宽满足^[5]

$$\Delta\nu/\Delta\nu_0 = (d\omega_l/d\omega)^2 \quad (1)$$

式中 $\Delta\nu, \Delta\nu_0$ 分别为有外腔反馈及无外腔反馈时半导体激光器的谱线宽度, $\omega_l = 2\pi p/t_d$, 为无外腔反馈时激光器的谐振频率, p 为整数, $t_d = 2nl_d/c$, 为激光场在腔内往返一次所需的时间, n 为激光器增益介质的折射系数, l_d 为半导体激光器的腔长, ω 为有外腔反馈时, 激光器的实际激射频率。

针对弱反馈的情况, ω_l 与 ω 满足如下的关系^[5]

$$\omega_l = \omega + \{ \alpha \ln[|r_e(\omega)|/r_2] - \arg[r_e(\omega)] \} / t_d \quad (2)$$

式中 α 为线宽限制因子, 外腔的有效反射率 $r_e(\omega)$ 可表示成

$$r_e(\omega) = [r_2 + r_3 \exp(-i\omega t_e)] / [1 + r_2 r_3 \exp(-i\omega t_e)] = |r_e(\omega)| \exp\{i \arg[r_e(\omega)]\} \quad (3)$$

将(3) 代入(2) 式, 并按 r_3/r_2 作展开, 取其首项, 有^[5]

$$\Delta\nu/\Delta\nu_w = \{ 1 + (r_3 t_e / r_2 t_d) [\cos(\omega t_e) - \alpha \sin(\omega t_e)] \}^2 \quad (4)$$

$\Delta\nu_w$ 为外腔弱反馈激光器的线宽。很显然, (4) 式不适用外腔强反馈激光器的情形($r_3/r_2 > 1$), 我们认为在外腔强反馈的情况下, 激光器的主腔不再由 r_1, r_2 所组成, 而是由 r_1, r_3 构成了激光器的主腔, 把反射系数 r_2 看成是激光器谐振腔中的微扰项, 因此, 外腔的有效反射系数可表示为

$$r_e'(\omega) = [r_3 + r_2 \exp(i\omega t_e)] / [1 + r_2 r_3 \exp(-i\omega t_e)] = |r_e'(\omega)| \exp\{i \arg[r_e'(\omega)]\} \quad (5)$$

并满足如下的关系

$$\begin{cases} |r_e(\omega)| = |r_e'(\omega)| \\ \arg[r_e(\omega)] + \omega t_e = \arg[r_e'(\omega)] \end{cases} \quad (6)$$

由此可知, 不同反馈下, 有效反射系数的幅值不变, 而位相差 ωt_e 的物理意义是明确的, 在弱反馈的情况下, 受外腔 r_3 反馈的激光场有 ωt_e 的相位延迟; 而在强反馈的情况下, 受腔内 r_2 反射的激光场有 ωt_e 的相位超前。在无 r_2 反射时, 长腔激光器的振荡频率为 $\omega = 2\pi p / (t_d + t_e)$, ω_e 与 ω 满足如下关系

$$\omega_e = \omega + \{ \alpha \ln[|r_e'(\omega)|/r_3] - \arg[r_e'(\omega)] \} / (t_d + t_e) \quad (7)$$

同理, 在有反馈的情形下, 长腔激光器的线宽可表示为

$$\Delta\nu'/\Delta\nu_s = (d\omega/d\omega)^2 \quad (8)$$

将其按 r_2/r_3 展开, 得到

$$\Delta\nu'/\Delta\nu_s = \{ 1 - r_3 t_e / r_2 (t_d + t_e) [\cos(\omega t_e) + \alpha \sin(\omega t_e)] \}^2 \quad (9)$$

从(4), (9) 式可以看出, 通过外腔反馈造成的激光器光谱线宽的变化, 不仅同激光器输出端面的反射系数、外腔光栅(反射镜)的反射系数有关, 而且和外腔引入的相位有关。外腔的反馈不仅可使激光器的线宽压缩, 而且也可使激光器的光谱线增宽。通过对(4), (9) 式的进一步分析可知, 外腔反馈造成的激光器光谱线宽的变化受外腔反射系数的影响比外腔引入的相位的影

响要灵敏,在强反馈的情况下,受外腔反射系数的影响更为灵敏。

3 实验研究

用光纤光栅实现半导体激光器线宽变化的实验装置如图 2 所示。用波长为 1470 nm 的掺铟光纤泵浦激光器。激光器输出端面的反射率为 70%。光纤光栅是紫外光照射相位掩模板制作而成。用光纤光栅、光纤耦合器组成的光路,测得光栅对实验所用的半导体激光器(1470 nm)处的反射率为 20% 左右。半导体激光器到光纤光栅所用的单模光纤的长度为 3 m。由于高功率半导体激光器的输出光谱会随着偏置电流和温度变化,易造成激光器输出光谱的变化,为此,我们一方面对激光器进行温度控制,使其工作在恒温的环境中,另一方面,对激光器的输出

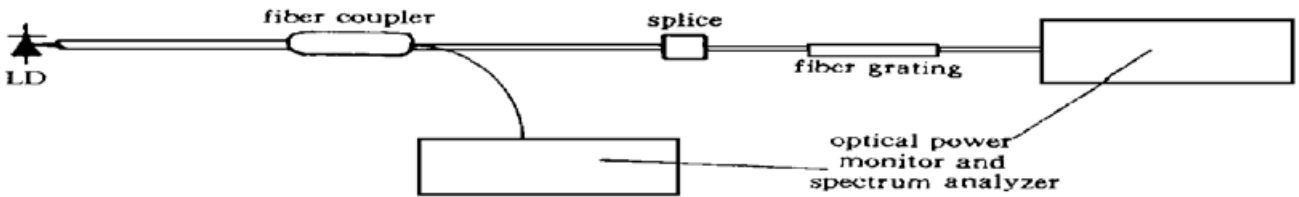


图 2 光纤光栅反馈对半导体激光器线宽影响的实验装置

Fig.2 Experimental setup for examining the effect of fiber grating feedback on the spectral linewidth of the laser diodes

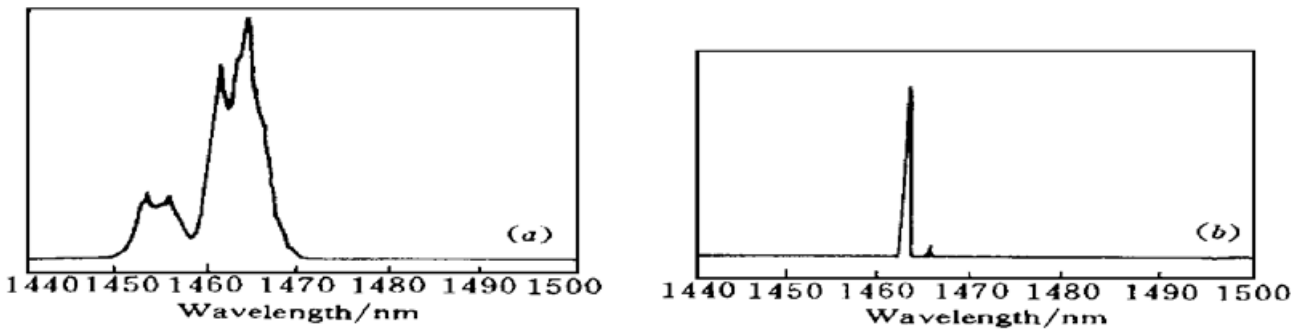


图 3 偏置电流为 150 mA 时,1470 nm 半导体激光器的光谱图

(a) 无光纤光栅反馈;(b) 有光纤光栅反馈

Fig.3 Optical spectra of a 1470 nm laser diode under a bias current of 150 mA

(a) free-running laser without a fbier grating; (b) with a fiber grating

功率用功率计作实时监测。对激光器的光谱用单色仪和扫描仪作记录分析。当激光器的偏置电流为 150 mA 时,在无外腔的光纤光栅反馈情况下,激光器自由振荡的光谱如图 3 (a) 所示。激光器输出谱线较宽的多纵模结构,其光谱线宽约为 6 nm。这种激光器用作掺铟光纤的泵浦源,不能很好地被掺铟光纤吸收泵浦能量,而且也降低了泵浦效率。图 3 (b) 所示为激光器经过光纤光栅外腔反馈后输出的光谱。激光器输出的谱线明显地是双纵模结构,其光谱线宽仅为 0.8 nm,并且主模对边模具有很高的抑制比。增加半导体激光器的偏置电流至 200 mA,图 4 (a) 所示是激光器自由振荡的光谱图,激光器输出的仍为多纵模结构。加光纤外腔反馈后,激光器输出的激光光谱如图 4 (b) 所示,从图中可以看出,激光光谱在压缩的同时,主模对次模仍有一定的抑制比,但其效果不如激光器偏置在 150 mA 明显。我们认为,由于激光器偏置电流的

变化,使得激光器的振荡频率发生了变化,由(4)式可知,光纤光栅的反射系数以及外腔的长度也应随之变化,以求达到线宽的最大压缩比和主模对边模最高的抑制比。通过改变半导体激光器至光纤光栅的光纤长度,发现输出光谱有一些变化,但不明显。维持激光器的偏置电流 200 mA 不变,对光纤光栅加热至 80°C,此时激光器的输出激光光谱如图 4(c)所示,从光谱图上发现,激光器的光谱得到了增宽。而且主模与次模共存。究其原因,光纤光栅随着环境温度的变化,光纤光栅的反射谱发生了改变^[6]。这也正说明了激光器外腔反射率对激光谱线的影响远比腔长的变化要敏感。由此可知,在我们的实验条件下,由于对光纤光栅的加热处理,导致光栅的中心反射波长发生变化,甚至破坏了光栅的反射特性。为此,在用光纤光栅做外腔来实现半导体激光器光谱的压缩时,必须对光纤光栅进行温度控制或者采用温度补偿结构的光纤光栅。在实验中还发现,有光纤光栅外腔反馈的激光输出功率比自由振荡的激光输出功率稳定。所以,通过合理地设计光纤光栅的参数,应用光纤光栅外腔反馈的激光器,既可压缩激光器的光谱线宽,又可稳定激光器的输出功率。

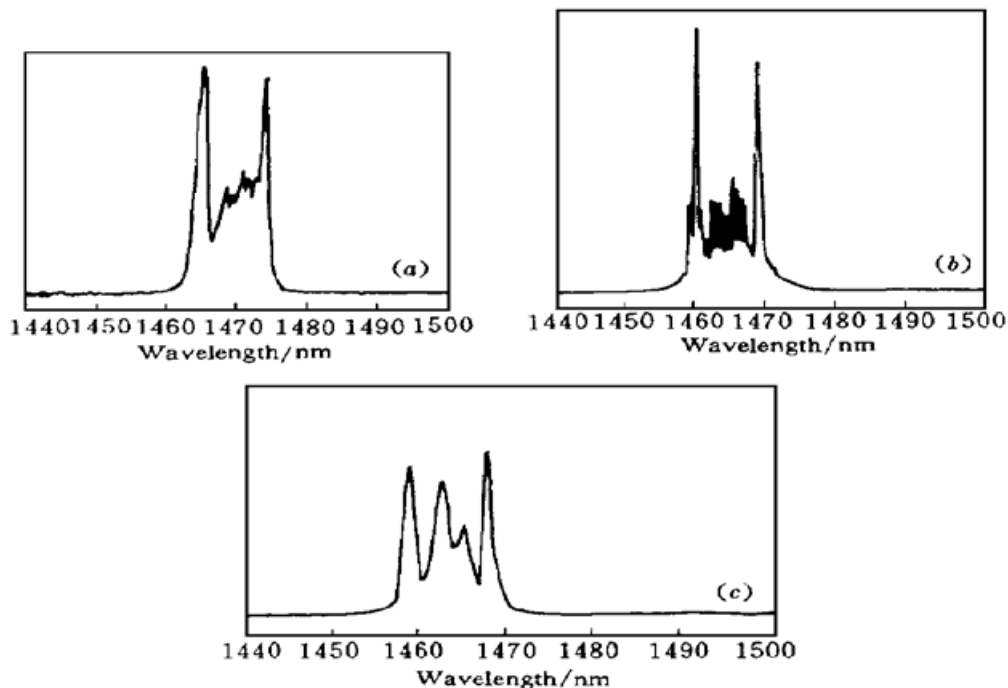


图 4 偏置电流为 200 mA 时, 1470 nm 半导体激光器的光谱图

(a) 无光纤光栅反馈; (b) 有光纤光栅反馈; (c) 有光纤光栅反馈, 且温度为 80°C

Fig. 4 Optical spectra of the 1470 nm laser diode under a bias current of 200 mA

(a) free-running laser without a fiber gratings; (b) with a fiber gratings;

(c) with a fiber grating and under a high temperature of 80°C

4 结 论

对光纤光栅外腔反馈的半导体激光器进行了理论分析与实验研究。结果表明,光纤光栅外腔反馈对激光器输出线宽特性和主模对次模的抑制比的改善是明显的,实验中,可将线宽由原来的 6 nm 压缩至 0.8 nm。尽管反射镜外腔反馈也能改善激光器的光谱线宽,但由于其结构复杂,调整困难,且难于同光纤耦合,因此,作为掺铒光纤激光器的泵浦源,光纤光栅外腔反馈的

半导体激光器有其显著的优越性, 不仅结构简单, 不需调节, 而且易于同光纤之间接续。真正要使光纤光栅在半导体激光泵浦源中得到应用, 除了要合理地设计光纤光栅的参数外, 还需设计温度补偿型光纤光栅的结构。同时, 还应就光的偏振态对光纤光栅外腔反馈的半导体激光器输出光谱的影响作理论与实验研究。

参 考 文 献

- 1 C. R. Giles, T. Erdogan, V. Mizrahi. Reflection-induced changes in the optical spectra of 980 nm QW lasers. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1994, **6**(8): 903~ 906
- 2 K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~ 1037
- 3 G. P. Agrawal. Line narrowing in a single-mode injection laser due to external optical feedback. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(5): 468~ 471
- 4 H. Sato, J. Ohya. Theory of spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(7): 1060~ 1063
- 5 B. Trombrog, H. Olesen, X. Pan *et al.*. Transmission line description of optical feedback and injection locking for Fabry-Perot and DFB lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(11): 1875~ 1889
- 6 Y. J. Rao, K. Kall, G. Braday *et al.*. Partially-multiplexe fiber-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12): 1009~ 1010

Study of Spectral Characteristics of a High Power Laser Diode with External Fiber Grating Feedback

Sun Junqiang Huang Zhijian Liu Deming Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Spectral characteristics of a high power laser diode with external fiber grating feedback are investigated both theoretically and experimentally. The theoretical results show that the spectral linewidth can be narrowed or broadened according to different external cavity parameters. The change of spectral linewidth is more sensitive to the effect of external reflection coefficient than the external cavity length. The reduction of spectral linewidth from 6 nm to 0.8 nm is achieved in our experiments. The external cavity with fiber grating feedback not only improves the spectral characteristics but also increases the repression ratio of dominant modes to subordinate modes.

Key words fiber grating, external cavity feedback, spectral linewidth