

利用光自注入改善 DFB 激光器的频率响应*

王 欣[†] 温继敏 黄亨沛 袁海庆 谢 亮 祝宁华

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 介绍了一种简单有效的自注入方法,通过该方法对直接调制的分布反馈半导体激光器进行光自注入,可以得到非常平坦的频率响应曲线.实验中使用一个环形器和一个 1×2 耦合器来实现光自注入.实验结果表明,在不同的偏置电流下,适当改变自注入光的偏振状态,频率响应曲线的张弛振荡峰可以得到很好地抑制.

关键词: 分布反馈式半导体激光器; 直接强度调制; 频率响应; 光自注入; 张弛振荡

EEACC: 4320J

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0254-04

1 引言

由于分布反馈(DFB)半导体激光器利用了布拉格光栅选择工作波长,所以谐振腔有明显的波长依存性,使得 DFB 激光器具有较好的窄线宽、动态单模和低啁啾等优点,现已成为中长距离光纤通信和光纤有线电视(CATV)传输系统中不可替代的光源.但是,DFB 半导体激光器本身固有的特性会限制其应用范围^[1~3].所以,研究人员采取了很多方法以达到从器件结构外部来弥补 DFB 激光器固有特性不足^[4~9]的目的.

张弛振荡作为注入式半导体激光器的固有特性,也存在于 DFB 激光器的频率响应曲线中.具体表现在某偏置电流下,对 DFB 激光器进行直接强度调制,其频率响应曲线会有明显的张弛振荡峰存在.对于封装好的 DFB 激光器模块,若所使用的频段正好处于该 DFB 激光器频率响应曲线的张弛振荡峰区间,就可能会由于张弛振荡峰位置的频响曲线变化幅度过大而无法实用,从而限制了 DFB 半导体激光器更为广泛的应用.针对这种情况,一般是通过增加 DFB 激光器的偏置电流来改善频响曲线.张弛振荡峰的位置随着偏置电流的增加向更高频率方向移动,即频响曲线的带宽增加.但是,驱动电流的增加会带来一系列的问题,例如激光器的响应线性度变差,寿命缩短和稳定性变差等.更为重要的是,如果加大偏置电流,所用频段仍处于张弛振荡峰区间,则该激光器只能算是不合格产品作废.所以采取一定的措施来抑制张弛振荡峰的形成是非常必要的,本文提出一种自注入的结构就可以

实现这样的目标.通过一个简单有效的实验装置,将 DFB 激光器发出的光以一定的偏振态注入回激光器的谐振腔,就可使得激光器的频率响应曲线变得相对平坦,且使张弛振荡峰的大小得到很好地抑制,甚至几乎消失.这种方法对于推广直接调制型 DFB 激光器的应用极有帮助.

2 实验

实验装置如图 1 所示.选用波长为 1550nm 蝶形封装的 DFB 激光器作为光源,通过网络分析仪(Agilent 8720D)为激光器提供调制信号.激光器的工作温度和偏置电流由一个恒流恒温激光器驱动控制源(Controller)提供.激光器的输出光通过光纤传输到环形器(OC)后,由环形器传输到一个 1×2 的 3dB 耦合器(Coupler)当中,被分成两路,一路光输入到一个 40GHz 的高速光电探测器(PD)转换成电信号后连接网络分析仪进行频响测试;另一路光通

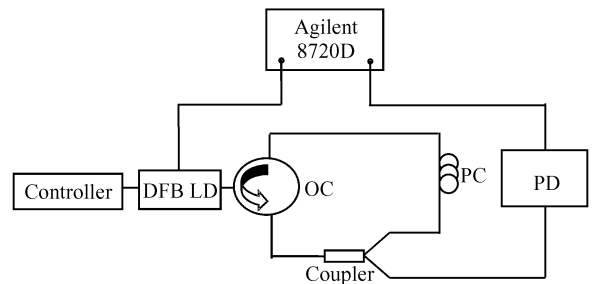


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

* 国家自然科学基金(批准号:60536010,60506006,60606019)和国家基础研究计划(批准号:2006CB604902,2006CB302806)资助项目

[†] 通信作者,Email:wxin@semi.ac.cn

2006-09-28 收到,2006-10-30 定稿

过一个偏振控制器(PC)传输到环行器的另一端,由环行器注入回激光器的谐振腔.实验中DFB激光器的阈值电流是12mA,在偏置电流为25mA时输出功率为1mW.

3 结果与分析

通常情况下,光子寿命 τ_{ph} 的大小决定了半导体激光器直接调制速率的上限,光子寿命远小于载流子寿命,因而可方便地对半导体激光器进行脉冲调制.但是,在高速传输系统中,当对半导体激光器进行直接调制时,调制频率会受到激光器的张弛振荡频率限制.如DFB激光器的直接调制频率由于张弛振荡峰的存在,实际使用中其工作频率范围要小于张弛振荡峰所在的位置,以保持在不同频率调制下,响应的幅度变化保持在一个很小的范围内.DFB激光器的调制是通过改变其驱动电流来实现的,即所谓的强度调制,这也是光纤通信系统中最普遍的调制类型.不论数字调制还是模拟调制,半导体激光器调制频率可通过速率方程进行推导.假设有源区体积为 v ,注入有源区电流为 j ,不考虑自发辐射对光子密度的贡献,则有源区的载流子密度 n 和光子密度 s 可表示为(1)和(2)式^[2]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j}{ev} - \frac{n}{\tau_r} - a_g(n - n_{th})s \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = a_g(n - n_{th})s - \frac{s}{\tau_p} \quad (2)$$

其中 τ_r 为有源区载流子寿命; τ_p 为谐振腔内光子寿命; $a_g(n - n_{th})s$ 是单位体积内产生的净受激跃迁速率.当达到稳态时, $\frac{dn}{dt} = 0$, $\frac{ds}{dt} = 0$.假设此时注入电流为 j_0 ,则推得(3)和(4)式:

$$\frac{j_0}{ev} = \frac{n_0}{\tau_r} + a_g(n - n_{th})s_0 \quad (3)$$

$$a_g(n - n_{th})s_0 = \frac{s_0}{\tau_p} \quad (4)$$

加在激光器上的电流有直流偏置与交流调制分量,即:

$$j = j_0 + j_1 e^{i\omega_m t} \quad (5)$$

$$n = n_0 + n_1 e^{i\omega_m t} \quad (6)$$

$$s = s_0 + s_1 e^{i\omega_m t} \quad (7)$$

其中 ω_m 为调制频率.将(5)~(7)式代入(1)和(2)式,利用(3)和(4)式并忽略 $2\omega_m$ 的高频项,可得:

$$i\omega_m n_1 = -\frac{j_1}{ev} + \left(\frac{1}{\tau_r} + a_g s_0\right)n_1 + \frac{s_1}{\tau_p} \quad (8)$$

$$i\omega_m s_1 = a_g s_0 n_1 \quad (9)$$

由(8)和(9)式可推得在小信号调制条件下,光子密度的变化量 $s_1(\omega_m)$:

$$s_1(\omega_m) = \frac{-(j_1/ev)a_g s_0}{\omega_m^2 - i\omega_m/\tau_r - i\omega_m a_g s_0 - a_g s_0/\tau_p} \quad (10)$$

显然,当(10)式中分母为最小值时,可求得张弛振荡峰的峰值位置 ω_r .其表达式为:

$$\omega_r = \left[\frac{a_g s_0}{\tau_p} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_r} + a_g s_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

由于(11)式中,前一项数值远大于第二项,所以可以近似为下式:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \omega_r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{a_g s_0}{\tau_p} \right)^{1/2} = \frac{1}{2\pi} [(MP)/\tau_p]^{1/2} \quad (12)$$

其中 M 为常数; P 为半导体激光器的出射功率.从(12)式可以看出,激光器的驱动电流越大,它的反馈就越快,因而调制频率响应越快.正如实验中我们通过改变DFB激光器的偏置电流以增加输出功率所测得的数据一样.如图2所示,当偏置电流由20mA增大到25mA和30mA时,DFB激光器频率响应曲线的张弛振荡峰位置由 f_{r1} 过渡到 f_{r2} ,30mA时达到 f_{r3} ,即频率带宽随偏置电流的增加而增加.

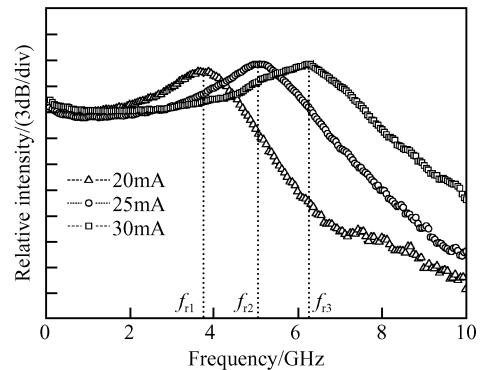


图2 不同偏置电流下频率响应曲线

Fig.2 Frequency responses at different bias currents

尽管通过增大偏置电流可以提高频率响应,但是从图2还可以看出,张弛振荡峰的高度并没有明显变化,还是会影响到DFB激光器在此频率下使用.基于此现象,我们利用实验装置(图1),用恒流恒温驱动控制源将DFB激光器控制在25°C,并施加20mA的偏置电流,同时用网络分析仪进行扫频调制.在没有光自注入的情况下测得频率响应曲线,可以观察到响应的张弛振荡峰比较突出,相对于低频位置约有6dB的升高.此时,将耦合器分得的一路光通过环行器注入回DFB激光器的谐振腔,发现响应曲线有所变化.这时调节偏振控制器,可以发现频率响应曲线的张弛振荡峰随着偏振态的调整发生变化,张弛振荡峰以无注入时张弛振荡峰为基准上下浮动.当偏振态调整到某一状态时会发现频率响应

曲线平坦,张弛振荡峰几乎消失,如图 3 所示.

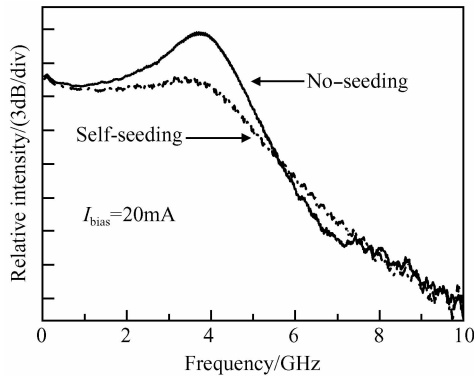


图 3 偏置电流 20mA 下自注入前后频响对比

Fig.3 Comparison of frequency responses with and without self-seeding ($I_{\text{bias}} = 20\text{mA}$)

采用与上面实验相同的方法,对 DFB 激光器分别施加 25mA 和 30mA 的偏置电流会得到类似结果,如图 4 和图 5 所示.

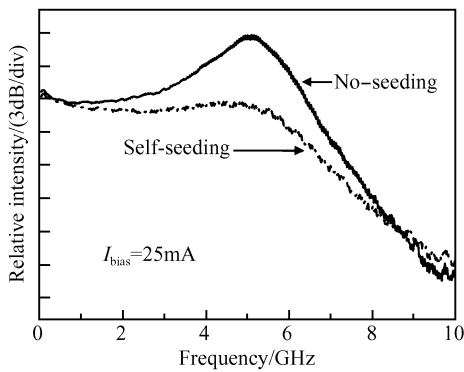


图 4 偏置电流 25mA 下自注入前后频响对比

Fig.4 Comparison of frequency responses with and without self-seeding ($I_{\text{bias}} = 25\text{mA}$)

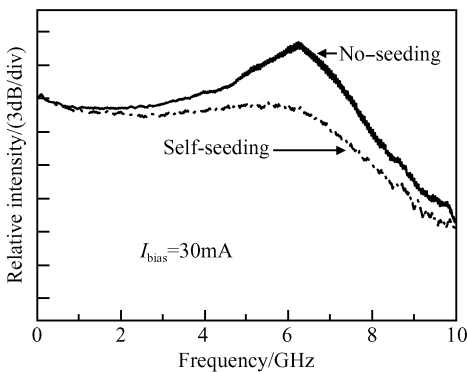


图 5 偏置电流 30mA 下自注入前后频响对比

Fig.5 Comparison of frequency responses with and without self-seeding ($I_{\text{bias}} = 30\text{mA}$)

从图 3~5 可以看出,三种不同偏置电流下,无自注入的响应曲线张弛振荡峰的高度约有 6dB,但是通过光自注入及偏振控制,响应曲线张弛振荡峰的高度降低到 1.5dB 以下.事实上从(12)式可以看出,张弛振荡峰的位置是由 DFB 激光器光子生存期 τ_p 和半导体激光器的出射功率 P 的大小决定的.我们采取自注入基本没有改变张弛振荡峰的位置,却极大地抑制了张弛振荡峰的幅度,使响应曲线平坦.

这是因为张弛振荡峰的调制响应可由 $s_1(\omega_m)/j_1(\omega_m)$ 的比值进行表述,当用同样幅度的调制电流 j_1 进行调制时,输出的光子密度 s_1 越大,则张弛振荡峰的相对幅度越高.所以对于不同频率下的相同幅度调制电流 j_1 ,产生的光子密度 s_1 越相近,则激光器性能越优越.本实验通过光自注入能够很好地抑制张弛振荡峰的相对高度,是因为当光子注入回 DFB 激光器谐振腔时,公式(2)中的谐振腔光子密度公式会有所变化,通过简化可用下式描述:

$$\frac{ds}{dt} = (1+x) \left[a_g(n-n_{\text{th}})s - \frac{s}{\tau_p} \right] \quad (13)$$

式中增加了一个变量 x ,当输出的光子数量变化越大,那么反馈谐振腔的光子数量也相对增加, x 变大.相应地,(9)式变化为:

$$i\omega_m s_1 = (1+x) a_g s_0 n_1 \quad (14)$$

这导致自注入调制响应为:

$$s_{1s}(\omega_m)/j_{1s}(\omega_m) = (1+x) s_1(\omega_m)/j_1(\omega_m) \quad (15)$$

可以得出,自注入调制响应随着 DFB 激光器的自身调制响应变化而变化,当 DFB 激光器自身响应增大时, x 变大,以此来抑制这种增大的趋势,所以通过对 DFB 激光器进行自注入可以抑制频率响应的剧烈变化.

4 结论

本文提出了光自注入的方法,以此来改善 DFB 半导体激光器的频率响应.实验结果显示,一定状态的偏振注入光可以很好地抑制 DFB 激光器频率响应的张弛振荡峰.如果将该方法的 DFB 半导体激光器应用于高速模拟光纤通信和光纤有线电视系统中,可以显著提高系统的性能.随着光电子技术的发展,光自注入方法可以成为实现宽带激光器的一种具有实际应用价值的简单而有效的技术.

参考文献

- [1] Huang Dexiu. Optoelectronics of semiconductors. Chengdu: UESTC Press, 1994 (in Chinese) [黄德修. 半导体光电子学. 成都: 电子科技大学出版社, 1994]
- [2] Jiang Jianping. Semiconductor lasers. Beijing: Publishing

- House of Electronics Industry, 2001 (in Chinese) [江剑平. 半导体激光器. 北京: 电子工业出版社, 2001]
- [3] Chuang S L. Physics of optoelectronics devices. New York: John Wiley & Sons, 1995
- [4] Tucker R S. High-speed modulation of semiconductor lasers. J Lightwave Technol, 1985, LT-3:1180
- [5] Bowers J E. High-speed semiconductor laser design and performance. Solid State Electron, 1987, 30:1
- [6] Wang J, Haldar M K, Li L, et al. Enhancement of modulation bandwidth of laser diodes by injection locking. IEEE Photonics Technol Lett, 1996, 8:34
- [7] Simpson T B, Liu J M, Gavrielides A. Small-signal analysis of modulation characteristics in a semiconductor laser subject to strong optical injection. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32:1456
- [8] Lu H H, Huang H H, Tzeng S J, et al. Employing double external light injection techniques in radio-on-fiber transport systems. CLEO, 2004, 1:16
- [9] Mohrdiek S, Burkhard H, Walter H. Chirp reduction of directly modulated semiconductor lasers at 10Gb/s by strong CW light injection. J Lightwave Technol, 1994, 12:418

Self-Seeding of DFB Laser to Improve the Frequency Response*

Wang Xin[†], Wen Jimin, Huang Hengpei, Yuan Haiqing, Xie Liang, and Zhu Ninghua

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A simple and effective self-seeding method of DFB lasers is presented. The frequency responses of a directly modulated DFB laser become very flat with this self-seeding method. Experiment was done using a three-port optical circulator and a 1×2 optical coupler. The results show that the peak of relaxation oscillation of the frequency response curves can be restrained significantly by changing the polarization of the self-seeding light.

Key words: distributed feedback laser; direct intensity modulation; frequency response; self-seeding; relaxation oscillation

EEACC: 4320J

Article ID: 0253-4177(2007)02-0254-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60536010, 60506006, 60606019) and the National Basic Research Program of China (Nos. 2006CB604902, 2006CB302806)

[†] Corresponding author. Email: wxin@semi.ac.cn

Received 28 September 2006, revised manuscript received 30 October 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics