

平均分光比:  $6.56 \times 10^{-3} (+1.2/-2.1)\%$

实验表明,对 YAG 多模激光,且能量变化不大时,分光比变化较小;但能量大幅度变化时,由于分光比的不稳定,将引入(3~4)%的误差。这可能是由于激光模式变化引起的。

### 三、仪器误差初步分析

(1) 电路(包括数字显示)误差:根据前面分析和实测结果,电路部份误差小于1%;

(2) 重复稳定性误差:在不考虑分光头引入的稳定性误差情况下(探头直接作吸收式测量),根据实测数据,重复稳定性误差小于1%;

(3) 线性误差:从实测数据看,线性误差小于1.5%,考虑整个动态范围较大,我们给出线性误差小于2.5%;

(4) 均匀性误差小于1%;

(5) 校准不确定度为,(1~2)%。

根据以上各项误差的方和根值确定的仪器不确定度小于4%。

在本课题研究中,电子部 11 所为我们研制了大面积热释电探测器。中国计量科学研究院为我们研制仪器作了大量测试标定工作。参加本课题研究的还有王振明、李雅克、刘凌云等同志。在此一并致谢、

### 参 考 文 献

- 1 王振明,激光杂志,8,5(1987)

(收稿日期:1987年9月7日)

## 光反馈对半导体激光器动态频率漂移的抑制

李 林 林

(郑州大学电子系,郑州)

### Suppression of dynamic frequency shift in semiconductor lasers by optical feedback

Li Linlin

(Zhengzhou University, Zhengzhou)

提要:本文提出了光反馈抑制半导体激光器动态频率漂移的概念,给出了解析表达式,并指出,在适当的反馈条件下,光反馈可以极大地抑制这种动态频率漂移。

关键词:光反馈,动态频率漂移

### 一、引 言

由于直接调制的半导体激光器(LD)具有灵活、简单等优点,故为目前的 IM-DD 光纤通信系统所采用。然而,即使是使用动态单纵模的 LD,当调制速率较高时( $\geq 1\text{Gbit/s}$ ),其动态频率漂移(DFS)仍限制着单模光纤通信系统的传输带宽<sup>[1,2]</sup>。因此,这种 DFS 的研究及其抑制就成为必不可少的<sup>[3,4]</sup>。

本文提出了一种抑制 DFS 的方式:采用光反馈(也即外腔 LD)抑制 DFS。分析表明:在适当的条件下,光反馈较好地抑制了 LD 的 DFS,可提高

单模光纤通信系统的传输能力。

### 二、分 析

含有光反馈的 LD 腔中的光子产生算符  $b^+(t)$  服从<sup>[5~7]</sup>:

$$\frac{d}{dt} b^+(t) = (j\omega - K) b^+(t) + j \sum_{kk'} g_{kk'}^* a_{kc}^+ a_{k'c} + K_2 b^+(t-T) e^{-j\omega_p T} \quad (1)$$

式中,  $\omega$  是腔频率;  $K = \frac{1}{2} \tau_p$  为腔损耗;  $\tau_p$  是光子寿命;  $g_{kk'}^*$  是具有波数  $k$  的导带态与具有波数  $k'$  的

价带态间的光矩阵元;  $a_{k_0}^+, a_{k_0}$  为偶极矩算符;  $K_2 = \eta K$ ,  $\eta$  是反馈光与 LD 腔中光的幅度比;  $T = \frac{2L_1}{c}$ ,  $L_1$  为外腔长度,  $c$  为光速;  $\varphi_0$  是光在反射镜 (或光栅) 上的相位延迟。

用 [5~7] 的推导, 在绝热消除偶极矩算符后, 引入  $B^+(t) = b^+(t)e^{-j\Omega t}$  以消除 (1) 式中的高频振荡项  $\omega$ , 这里  $\Omega$  为激励频率, 从而可得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B^+(t) = & -K(1+j\alpha)B^+(t) \\ & + \frac{1}{2}(1+j\alpha)GB^+(t) \\ & + K_2 e^{-j\varphi_0} B^+(t-T) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\varphi_0 = \Omega T + \varphi_0$ ;  $G = G_0(N - N_0)$  为 LD 的增益函数;  $G_0$  和  $N_0$  为常数;  $N$  为 LD 导带中的载流子数。

一般  $T$  远远小于 LD 的输出相干时间, 所以

$$B^+(t-T) \approx B^+(t) - T \frac{d}{dt} B^+(t) \quad (3)$$

代入得 (2) 式, 即有:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B^+(t) = & X^{-1} \left[ -K(1+j\alpha) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2}(1+j\alpha)G_0(N - N_0) \right] B^+(t) \end{aligned} \quad (4)$$

$\alpha$  为线型展宽因子<sup>[1]</sup>,  $X = 1 + K_2 T e^{-j\varphi_0}$ 。

无反馈时,  $K_2 = 0$ , (4) 式变为普通 LD 的光场运动方程<sup>[7]</sup>。

将  $B^+(t)$  做分解  $B^+(t) = \sqrt{n(t)}e^{-j\varphi(t)}$ , 则  $n(t)$  为 LD 腔中的光子数,  $\varphi(t)$  为随机相位<sup>[7]</sup>。代入到 (4) 式则有

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n(t) = & |X|^{-2}(A - B\alpha)[K - 2n(t)] \\ & + G_0(N - N_0)n(t) + G_0N \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \varphi(t) = & \frac{\alpha}{2}[G_0(N - N_0) \\ & - 2K]|X|^{-2}(\alpha A + B)/\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $A = 1 + K_2 T \cos \varphi_0$ ,  $B = K_2 T \sin \varphi_0$ 。(5) 式中, 已考虑到自发辐射耦合到激励模的影响。

导带中的载流子数  $N$  满足<sup>[5~7]</sup>:

$$\frac{d}{dt} N = P - \frac{N}{\tau_e} - G_0(N - N_0)n - G_0N \quad (7)$$

$P = I/e$  为泵浦率;  $I$  为 LD 的注入电流;  $e$  为电子电荷;  $\tau_e$  为载流子寿命。

为了分析 LD 的调制特性, 令

$$I(t) = I_b + I_m e^{j\omega_m t} \quad (8)$$

$I_b$  为 LD 的偏置电流,  $I_m$  为调制分量,  $\omega_m = 2\pi f_m$ ,  $f_m$  为调制频率。这样就有  $n(t) = n + n_m e^{j\omega_m t}$  等,  $n$

为稳态光子数, 可由 (5)~(7) 式的稳态得到。

代入到 (5)~(7) 式, 在小信号分析的情况下 (不计二次小项), (5)~(7) 式就变成了

$$j\omega_m n_m = y a_{11} n_m + y a_{12} N_m \quad (9)$$

$$j\omega_m N_m = I_m/e + a_{21} n_m + a_{22} N_m \quad (10)$$

$$j\omega \varphi_m = z a_{32} N_m \quad (11)$$

式中, 各系数为

$$a_{11} = G_0(N - N_0) - 2k, \quad a_{12} = G_0(n + 1)$$

$$a_{21} = -G_0(N - N_0),$$

$$a_{22} = -\left[ \frac{1}{\tau_e} + G_0(n + 1) \right]$$

$$a_{32} = \frac{\alpha}{2} G_0, \quad y = (A - B\alpha) |X|^{-2},$$

$$z = (\alpha A + B) |X|^{-2} / \alpha$$

无反馈时,  $K_2 = 0$ , 就有  $A = 1, B = 0$ , 从而有  $y = 1, z = 1$ , (9)~(11) 式就成为分析一般 LD 调制特性的方程了。

LD 的动态频率漂移定义为<sup>[3,4]</sup>:

$$\Delta\nu = \omega_m \varphi_m / 2\pi \quad (12)$$

由于 LD 的 IM 响应为  $n_m$ , 而光功率响应为<sup>[4]</sup>

$$P_m = C n_m \quad (13)$$

其中  $C = V_s \hbar \Omega \ln\left(\frac{1}{r}\right) 2L$ ;  $V_s$  为群速度;  $\hbar$  为普朗克常数除以  $2\pi$ ;  $r$  为 LD 镜面反射率;  $L$  为 LD 腔长。

光反馈在抑制动态频率漂移的同时, 也将改变 LD 的功率响应, 因此, 定义动态频率漂移-功率响应比为<sup>[3,4]</sup>:

$$CPR = \Delta\nu / P_m \quad (14)$$

对单腔 LD, 可推得

$$CPR_0 = (j\omega_m - a_{11}) a_{32} / 2\pi y a_{12} C \quad (15)$$

同理, 对外腔 LD, 有

$$CPR_E = (j\omega_m - y a_{11}) s a_{32} / 2\pi y a_{12} C \quad (16)$$

### 三、讨 论

由 (15) 和 (16) 式可以看到, 为了抑制 LD 的动态频率漂移, 须使  $|CPR_E| < |CPR_0|$ , 也即

$$\begin{cases} |s| < 1 \\ |s/y| < 1 \end{cases} \quad (17)$$

从  $y, s$  的表达式可看到, 普遍的讨论不易得到明显的结果。因此, 考虑下面两种特殊情况。

1. 外腔谐振,  $\varphi_0 = 0 \pmod{2\pi}$ 。此时, 有

$$\begin{cases} s = \frac{1}{1 + k_2} T \\ s/y = 1 \end{cases} \quad (18)$$

由 (16) 式可知, 这时, 光反馈可使低频时的动态频率漂移减小, 而不影响高频时的动态频率漂移。

2. 同相反馈,  $\varphi_0 + \varphi_1 = 0 \pmod{2\pi}$ ,  $\varphi_1 = \text{tg}^{-1} \alpha_0$ .  
可推得

$$\begin{cases} z_{\min} = \frac{1}{(1 + K_2 T)^2} \\ z/y = \frac{1}{1 + K_2 T (1 + \alpha^2)^{1/2}} \end{cases} \quad (19)$$

因此,这时可以大大降低 LD 的 DFS.

在同相反馈时,由(16)式可知,在低频时,  $CPR_E \approx -\varepsilon a_{11} a_{22} / 2\pi a_{12} C$ , 从而可得低频时的 DFS 抑制比为

$$R_L = |CPR_0 / CPR_E| = (1 + K_2 T)^2 \quad (20)$$

图 1 给出了  $R_L$  的曲线。

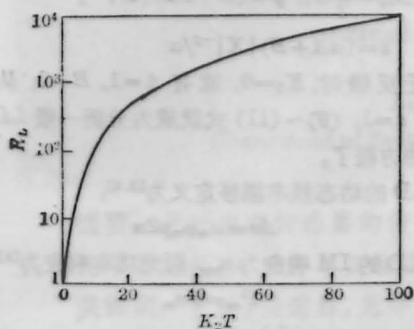


图 1 低频 DFS 的抑制比

在高频时,有  $CPR_E \approx j\omega_m \varepsilon a_{22} / 2\pi y a_{12} C$ , 这时可得高频 DFS 抑制比

$$R_H = 1 + K_2 T (1 + \alpha^2)^{1/2} \quad (21)$$

图 2 给出了  $R_H$  的曲线。可以看到,当  $\alpha$  较大时,  $R_H$  取值较大,即 DFS 的抑制比较强烈。

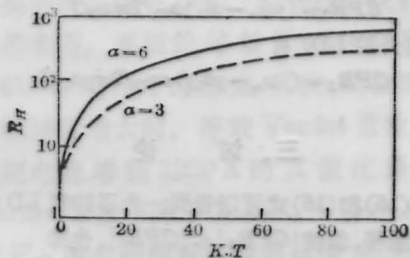


图 2 高频 DFS 的抑制比

数值计算所需参数如下<sup>[3,4]</sup>:  $I/I_{th} = 1.3$ ,  $I_{th}$  为阈值电流;  $L = 200 \mu\text{m}$ ;  $r = 0.32$ ;  $G_0 = 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $N_0 = 2 \times 10^8$ ;  $\tau_p = 2 \times 10^{-12} \text{ s}$ ;  $\tau_s = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$ ; 光波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

图 3 给出了同相反馈时的  $|CPR|$ 。  $K_2 T = 0$  表示普通单腔 LD。由图 3 可以看到,光反馈可以极大地抑制 DFS。  $K_2 T$  越大,这种抑制就越强烈。当  $K_2 T = 100$  时,低频时可抑制约  $10^4$  倍,即使在高频

时,也可抑制 600 倍以上,这对高速光纤通信系统是极为有利的。

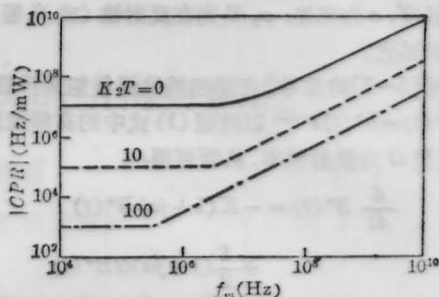


图 3 CPR 的比较

图 4 给出了反馈相位对  $CPR$  的影响。  $K_2 T = 100$  可以看到,同相反馈无论在低频还是高频均可强烈地抑制 DFS,而外腔谐振仅在低频有抑制 DFS 的作用,高频时的抑制则很微弱,这与前面的定性分析是一致的。

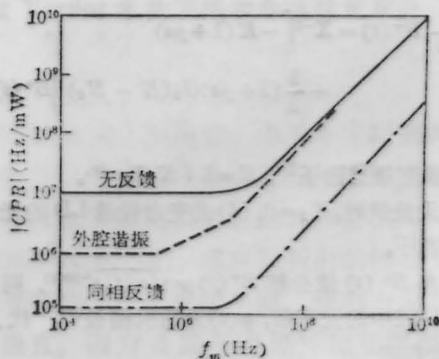


图 4 反馈相位对 CPR 的影响

## 参 考 文 献

- 1 R. A. Linke, *Elect. Lett.*, **20**, 472 (1984)
- 2 R. A. Linke, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**, 593 (1985)
- 3 D. Welford, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**, 1749 (1985)
- 4 S. Piazzolla *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22**, 2219 (1986)
- 5 Li Linlin *et al.*, *Proceeding of Sino-British Jointing Meeting on Optical Fiber Communications*, (May, Beijing, 1986), 373
- 6 李林林 *et al.*, *电子学报*, **15**(4), 62(1987)
- 7 李林林 *et al.*, *中国激光*, **14**(9), 529(1987)

(收稿日期: 1987 年 9 月 21 日)