

# 半导体激光放大器的理论与实验研究

黄德修 刘德明 张其超 樊承钧 李龙勤

(华中理工大学)

**提要:** 从理论与实验上研究了 $1.3\mu\text{m}$ 的法布里-珀罗放大器(FP-SLA)与行波放大器(TW-SLA)。分析了半导体激光器的增益特性,指出了“准”行波放大器的优越性。

## Theoretical and experimental investigation on semiconductor laser amplifiers

Huang Dexiu, Liu Deming, Zhang Qichao, Fan Chenjun, Li Longqin

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

**Abstract:** Semiconductor laser amplifiers of both Fabry-Perot type (FP-SLA) and traveling-wave type (TW-SLA) have been investigated theoretically and experimentally. The gain characteristics of semiconductor laser amplifier was analyzed and advantages of quasi-TW-SLA were pointed out.

### 一、前言

近几年来,随着单模光纤通信的发展,半导体激光放大器日趋成熟,正在向工程应用发展<sup>[1]</sup>。利用半导体激光器的双异质结结构,在一定的偏置电流下,能从较小体积的增益介质中获得较大的介质增益系数( $50\sim 100\text{cm}^{-1}$ )而直接放大光信号,从而使器件结构紧凑、重量轻、增益和信噪比高,在未来的光纤通信中它可提供以下的应用前景:

1. 在单模光纤通信系统中用作非再生(无需脉冲整形)线性中继放大器<sup>[2]</sup>;
2. 在光接收机前用作前置放大器<sup>[3]</sup>;
3. 可用于光发射机的后置功率放大;

4. 光纤通讯局部网中作功率补偿。

5. 还可用作快速光开关。

本文对 FP-SLA 与 TW-SLA 两种放大器的增益特性作出理论分析;对实现 FP-SLA 与 TW-SLA 的一些关键技术问题进行了试验研究;在这两种放大器中实现了光信号的直接放大。

### 二、半导体激光放大器腔增益的理论分析

用于光纤通信的半导体激光放大器可以有两种形式,即 FP-SLA 与 TW-SLA,二者都是利用半导体激光器的双异质结结构。FP-SLA 实质上是偏置在阈值以下的半导

收稿期日: 1986年12月22日。

体激光器,除了放大自发辐射外,还放大外来的光信号。由于光子可在谐振腔内往返多次,故使外来信号能得到较大的腔增益。但增益带宽很窄,基本上为一个法布里-珀罗腔纵模的线宽。为保证入射光得到较大的增益,要求器件有足够高的温度稳定性。由于F-P腔本身的滤波作用,使它适合作信噪比要求高的前置放大器;而TW-SLA实质上是解理面完全增透的FP-SLA。入射信号在这种放大器中只能得到单程增益,所以要求信号增益要高,只能靠把放大器的驱动电流增大到增透前阈值电流的2~3倍来实现。但TW-SLA的增益带宽基本上是一个单调变化的自发发射谱,比FP-SLA约高三个数量级。因而对放大器温度稳定性的要求比FP-SLA低得多,但噪声带宽也相应增加。因此在高比特率的传输系统中,要辅以带宽很窄的光学滤波器才能得到所要求的信噪比或误码率。下面的分析表明,腔面具有适当剩余反射率的准行波放大器,可以在一定程度上折衷FP-SLA与TW-SLA的特点。

半导体激光放大器对光信号的放大作用实质上是增益介质中光子与电子相互作用的结果。在忽略注入载流子的扩散和非辐射损耗的条件下,列出稳态下载流子的速率方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{J}{ed} = R_{sp} + \Gamma c' \left[ \sum_r g_m(E_r) \beta(E_r) S_{10v} + g_m(E) S_{20v} \right] \quad (1)$$

式中  $J$  为注入电流密度;  $d$  为有源层厚度;  $e$  为电子电荷;  $\Gamma$  为有源层光场限制因子;  $c'$  为介质中的光速;  $R_{sp}$  为总的自发发射速率;  $g_m$  和  $\beta$  分别为材料的增益系数与自发发射因子,它们是光子能量的函数;  $E_r$  和  $E$  分别为放大器某一纵模  $r$  和外来光子的能量;  $S_{10v}$  为放大的自发发射平均光子数;  $S_{20v}$  为有源层中平均的信号光子数。并且

$$S_{10v} = \left\{ \frac{\left( \frac{G_s - 1}{1 - R_1} \right) \left[ \frac{(1 - R_2)(1 + R_1 G_s)}{1 + (1 - R_1)(1 + R_2 G_s)} \right]}{g L (1 - R_1 R_2 G_s^2)} - 2 \right\}$$

$$\times \frac{R_{sp}}{c' g} \left( \frac{1 - R_1}{1 - R_1 R_2 G_s^2} \right) \left( \frac{1 - R_2}{1 - R_1 R_2 G_s^2} \right) \sin^2 \left( \pi \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_s} \right) \quad (2)$$

$$= \frac{(1 - R_1)(1 + R_2 G_s)(G_s - 1)}{\left( (1 - \sqrt{R_1 R_2 G_s})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2 G_s} \right)} \times \sin^2 \left( \pi \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_s} \right) \times \frac{P_{in}}{h \nu c V g} \quad (3)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别为放大器的入射和出射腔面的反射率;  $\Delta \nu$  为入射光频率  $\nu$  与放大器增益带宽中心频率  $\nu_0$  之差;  $\Delta \nu_s$  为纵模间隔;  $P_{in}$  为入射光功率;  $V$  为有源层体积;  $h \nu$  为入射光子能量;  $L$  为腔长;  $G_s = \exp(gL)$  为单程增益。模增益系数  $g$  与材料增益系数  $g_m$  的关系一般表示为

$$g = \Gamma(g_m - \alpha_a) - (1 - \Gamma)\alpha_c \quad (4)$$

式中  $\alpha_a$  与  $\alpha_c$  分别表示光场在有源层与限制层中的损耗系数。材料增益系数用经验公式表示为

$$g_m = aN \left[ 1 - \left( \frac{\Delta \nu}{\Delta \nu_{1/2}} \right)^2 \right] - aN_0 \quad (5)$$

其中  $a$  为增益常数;  $\Delta \nu_{1/2}$  为增益曲线的3dB处带宽;  $N_0$  为  $g_m$  与  $\Delta \nu$  均为零时的注入电子浓度。

对于TW-SLA,其增益为连续谱,因此(3)式中的求和项应以连续积分  $\int g_\nu \beta_\nu S_{10v} d\nu$  所代替。同时,由于解理面被增透,光子沿纵向分布变得极不均匀,增益区两端的光子密度远高于中心处的光子密度,这将使平均增益系数降低<sup>[5]</sup>。因此,如果要对TW-SLA进行严格的分析,除了用速率方程外,还应采用载流子浓度随空间位置变化的行波方程<sup>[6]</sup>来描述光子与电子的相互作用过程。

光信号在半导体激光放大器中所能得到的腔增益可以表示为

$$G_o = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{\left( (1-\sqrt{R_1 R_2} G_s)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} G_s \right) \times \sin^2\left(\pi \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_s}\right)} \quad (6)$$

由(6)式可看出,为了得到大的腔增益,应尽量使 $\nu$ 靠近 $\nu_0$ 。在理想情况下 $\Delta\nu = \nu - \nu_0 = 0$ ,这时的腔增益为

$$G_o = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s}{(1-\sqrt{R_1 R_2} G_s)^2} \quad (7)$$

对(7)式作进一步的分析是有意义的:

1. 当 $R_1=R_2=0$ ,即对应TW-SLA的情况。由(7)式有 $G_o=G_s$ ,即在行波放大器中,入射光信号只能在放大器中得到单程增益。因此,只有通过加大注入电流来得到所需的信号增益。

2. 只对解理面之一进行增透,即 $R_1=0$ 或 $R_2=0$ 。由(7)式可以看到,这时的腔增益小于单程增益。因此,在同样的注入电流下,这时信号在放大器中所能得到的增益小于TW-SLA中的增益。

3. 当(7)式分母中的 $\sqrt{R_1 R_2} = 1/G_s$ 时,这时的腔增益为无穷大。最简单的情况可取 $R_1=R_2=1/G_s$ 。如取单程增益 $G_s$ 为20~30 dB,则要求两解理面上的剩余反射率为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。在这种情况下,可望得到高的信号增益,而不苛求过高的温度稳定性。因此这种准行波放大器是现实和有实用价值的。

### 三、实验

我们进行了FP-SLA与TW-SLA的实验研究。所用的光源和放大器芯片、 $\sim 1.3 \mu\text{m}$  InGaAsP/InP埋层异质结(BH)激光器均由武汉邮电科学研究院电信器件公司提供。实验方框图示于图1。为了使入射波长与放大器峰值增益波长一致,我们用外光栅(闪耀波长为 $1.25 \mu\text{m}$ )对光源进行波长调谐。光源和放大器均采用稳定的温度控制。利用光栅选模和温度对激光波长的微调作



图 1

用,获得60 nm的连续波长调谐。

对半导体激光器芯片解理面进行有效增透是实现TW-SLA的关键之一。为了控制其剩余反射率在所要求的范围内,我们选用了具有不同折射率的双层减反膜结构。与单层减反膜相比,这种膜系利于在较宽的范围内选择不同折射率的材料和通过调整每层膜的厚度来达到所要求的剩余反射率。我们运用布朗天线互易理论<sup>[7]</sup>,将半导体解理面上的高斯场分布变换为以不同角度入射的平面波角谱。根据所选用的两种材料折射率和所要求的剩余反射率,用计算机计算出每层膜的厚度和容差。利用所选用的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系结构,我们得到了 $(2\sim 3) \times 10^{-3}$ 的剩余反射率,图2所示的两解理面增透后的激光发射谱是一个被纵模所调制的自发发射谱,可用其调制深度来测定解理面上的剩余反射率<sup>[8]</sup>。

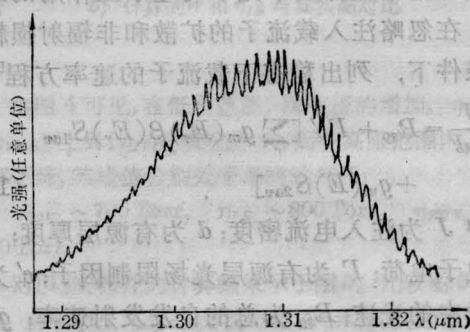


图 2

减少光纤与半导体激光放大器间的耦合损耗是入射信号从放大器得到高净增益的关键之一。理论分析与实验探索表明,将光纤拉锥至适当小的直径,然后在锥顶平端进行半球类透镜处理,可以使耦合效率大大提高。

基本解决上述主要技术关键后,我们成

(下转第407页)



## 六、BHA:Cr<sup>3+</sup> 的光谱

测定了 BHA:Cr<sup>3+</sup> 晶体在室温时的吸收谱与荧光谱,如图 8 及图 9 所示。在荧光光谱中,电子-振动边带谱为 700nm 到 1000nm,此紫翠宝石及祖母绿的边带谱都宽。吸收光谱中二 B-线分别为 699.0nm 及 690.0nm。根据静电场模型计算的晶场强度参数  $D_q$ 、Racah 参数  $B$  及  $C$  分别为

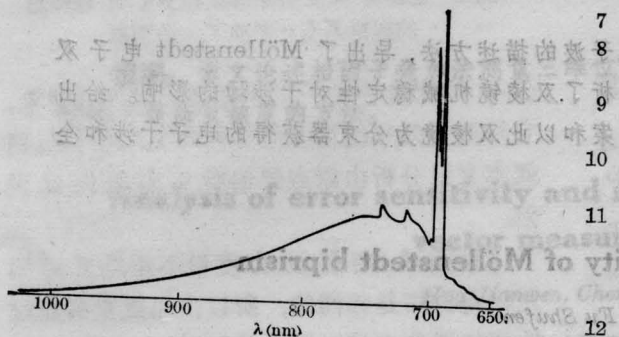


图 9 BHA:Cr<sup>3+</sup> 晶体在室温时的荧光谱

1660 cm<sup>-1</sup>、642 cm<sup>-1</sup> 及 3180 cm<sup>-1</sup>, 而  $\Delta E = 558$  cm<sup>-1</sup>。

(上接第 402 页)

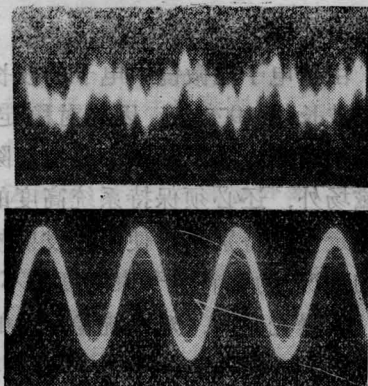


图 3

功地将入射光信号在 FP-SLA 与 TW-SLA 两种放大器中得到了放大。对 FP-SLA, 其偏置电流为  $0.95 I_{th}$ ; 对 TW-SLA, 其偏置电流为增透前阈值电流的两倍时, 1 MHz 的正弦调制光信号在两放大器中均得到 20~

## 参 考 文 献

- 1 Morris R C, Cline C F. USP 3997853 14 Dec., 1976
- 2 Walling J et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980; **QE-16**(12): 1302
- 3 Struve B, Huber G. *Appl. Phys.*, 1983; **B30**: 117
- 4 Pruss D, Huber G, Beimowski A et al. *Appl. Phys.*, (B) 1982; **28**(7): 355
- 5 Kaminski A A, Badasarov Kh S, Bagomolova G A et al. *Phys. Status Solidi (a)*, 1976; **34**(2): K 109
- 6 Zhang Dehui, Liu Hairun, Lin Chengtian. *J. of Synthetic Crystals*, 1985; **14**(3/4): 23
- 7 Hecht Jeff. *Lasers and Applications*, 1984; (9): 77
- 8 Ma Xiaoshan. *J. of Synthetic Crystals*, 1985; **14**(1): 38
- 9 Ma Xiaoshan, Hou Yinchun. Reported in National Conference on Gem and Minerals, 25 May (1982)
- 10 Shand M L, Walling J C. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982; **QE-18**: 1829
- 11 Buchert J, Katz A, Alfano R R. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983; **QE-19**: 19
- 12 Buchert J, Alfano R R. *Laser Focus*, 1983; **19**(9): 117
- 13 Kolbe W, Petermann K, Huber G. WII P. 100 CLEO'84
- 14 Galakhov F Ya. *Izvest. Akad. Nauk SSSR, Otdel. Khim. Nauk*, 1957; 1035
- 15 Ma Xiaoshan, Hou Yinchun, Wang Siting et al. *Acta Silicata*, 1984; **21**(2): 131

25dB 的增益。图 3(上)为放大器偏置电流为零时所探测的信号光的示波照片。图 3(下)为上述工作条件下放大器输出的光信号。照片表明放大后信号的信噪比得到了明显提高。

## 参 考 文 献

- 1 O'Mahony M J et al. Proc. of Sino-British Joint Meeting on Optical Fiber Communications (Beijing 9-11 May 1986), 85~90
- 2 ibid(1)
- 3 Mukai T, Yamamoto Y. *Review of Elect. Commun. Labs*, 1983; **3**(3): 340
- 4 Henning I D et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985; **QE-21**(6): 609
- 5 Lee Tienpei et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982; **QE-18**(7): 1110
- 6 Dietrich Marouse. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983; **QE-19**(1): 63
- 7 Brown J. Proc. *IEEE*, 1985; **105**(Part C): 472
- 8 Kaminou I P et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983; **QE-19**(4): 493.