

# 实用化宽带半导体激光器组件的研制 及其特性的研究

张正线 李植棠\* 徐杰\* 林志瑗\*\*

(通信工程学院, 南京 210016; \* 东南大学电子工程系, 南京 210018;

\*\* 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074)

**提要** 使用 DC-PBH 型激光二极管芯片, 设计制作了实用化封装形式的宽带半导体激光器组件, 在理论上和实验上研究了组件的封装模型、小信号频率调制特性和非线性失真, 其光响应为 3 dB, 带宽大于 2 GHz。该器件可满足六次群光通信系统的带宽要求, 也可用于 GHz 级微波副载波光通信系统。

**关键词** 半导体激光器组件, 微波, 调制, 光纤通信, 非线性失真

## 1 引言

宽带宽、大功率半导体激光器组件是六次群光通信系统和微波副载波复用光纤通信系统所必需的。光纤的可利用带宽极大, 系统的带宽限制主要来自光器件。国外在宽带光器件方面发展很快, 从 80 年代以来, 实用化半导体激光器组件的带宽迅速上升<sup>[1,2]</sup>, 已有文献报道 3 dB 带宽达到 4 GHz 的分布反馈(DFB)半导体激光器组件的商品<sup>[3]</sup>。国内由于工艺水平和半导体激光器芯片制造技术等方面的原因, 目前实用性的半导体激光器组件的带宽还较小, 还未见到 3dB 带宽大于 1.5GHz 的实用化半导体激光器组件的报道。除了半导体激光器本征二极管的频率响应, 激光器组件的高频调制特性还与激光器芯片的寄生参数和组件的电结构有关<sup>[4]</sup>。

本文使用武汉电信器件公司生产的双沟道掩埋结构(DC-PBH)的半导体激光芯片, 设计制作了“蝴蝶”型封装的宽带半导体激光器组件。在理论上和实验上研究了组件的散射(S)参数、小信号频率调制特性和非线性失真。结果表明, 该器件完全可以满足六次群光通信系统的带宽要求, 也可以用于 1~2 GHz 的微波副载波光波系统。

## 2 激光器组件的构成及其模型

激光器组件采用“蝴蝶”型封装(图 1)。组件有 14 个引脚, 包括一个激光二极管(LD), 一个监视光功率的 pin 光电二极管(PD), 一个半导体制冷器(TEC)和一个热敏电阻。LD 芯片为 DC-PBH 结构 1.3  $\mu\text{m}$  法珀激光器, 尾纤用单模光纤, 并接有陶瓷活动连接器。

该组件的封装和 LD 芯片寄生元件的等效电路模型见图 2, 图中的部分数据是根据组件制作过程中所选用的材料及其尺寸计算所得<sup>[5]</sup>, 连接线的接触电阻为估计值。

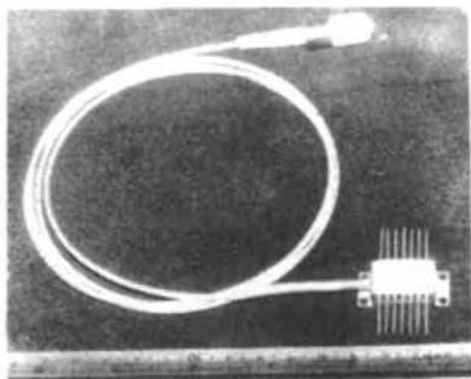


Fig. 1 Photograph of a LD module

使用 HP8720B 自动矢量网络分析仪 (0.1 ~ 20 GHz) 测试了组件的  $S_{11}$  参数, 测试参考位置距组件壳体 2 mm。测试结果如图 3 所示, 测试范围为 0.5 ~ 4 GHz。从图中可知, 由模型计算的组件  $S_{11}$  参数和测试所得基本相符。

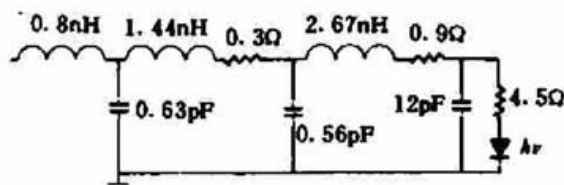


Fig. 2 Equivalent circuit of the LD module

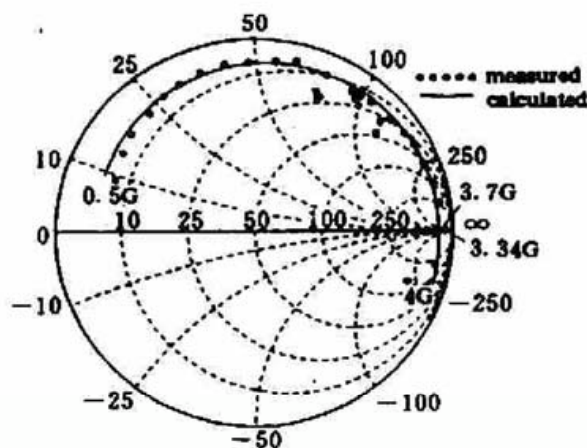


Fig. 3 Smith Chart plot of  $S_{11}$  parameter of the LD module

### 3 激光器组件的小信号调制特性

激光器的动力学, 一般是由支配激光介质内的光子和载流子浓度的速率方程来描述的<sup>[6,7]</sup>。速率方程可以写成

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{g_0(N-N_{tr})S}{1 + \epsilon S} - \frac{N}{\tau_s} \quad (1a)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_0(N-N_{tr})S}{1 + \epsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_s} \quad (1b)$$

式中  $N$  是载流子浓度,  $S$  是光子浓度,  $N_{tr}$  是透明电子浓度,  $\tau_s$  是载流子的自发辐射寿命,  $\tau_p$  是腔内光子的寿命,  $\Gamma$  是光限制因子,  $g_0$  是光增益系数,  $\epsilon$  是描述非线性增益的一个参数,  $\beta$  是进入激光模式的自发发射分量,  $e$  是电子电量,  $I$  是流过有源区的电流,  $V$  是有源区体积。

描述增益压缩通常是用  $g = g_0(1 - \epsilon S)$  的形式, 但对于大光子浓度, 有可能给出负值, 因此在 (1) 式中使用了  $g = g_0/(1 + \epsilon S)$  的形式。

在小信号调制下, 解 (1) 式时把变量分成稳态部分 (直流项) 和瞬态部分 (交流项), 有

$$N = N_0 + n_1 e^{j\omega t}, \quad S = S_0 + s_1 e^{j\omega t}, \quad I = I_0 + i e^{j\omega t} \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式, 并略去二阶小量, 可得到小信号响应的归一化传输函数为

$$S(\omega) = (BC - AD) / f(\omega) \quad (3)$$

这里

$$f(\omega) = (BC - AD) - \omega^2 + (A - D)j\omega \quad (4)$$

$$A = \frac{g_o S_o}{1 + \varepsilon S_o} + \frac{1}{\tau_s} \quad (5a)$$

$$B = \frac{g_o(N_o - N_{om})}{(1 + \varepsilon S_o)^2} \quad (5b)$$

$$C = \frac{\Gamma g_o S_o}{1 + \varepsilon S_o} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_s} \quad (5c)$$

$$D = \frac{\Gamma g_o(N_o - N_{om})}{(1 + \varepsilon S_o)^2} - \frac{1}{\tau_p} \quad (5d)$$

由(1)式的稳态解可得

$$N_o - N_{om} = \left( \frac{S_o}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N_{om}}{\tau_s} \right) / \left( \frac{\Gamma g_o S_o}{1 + \varepsilon S_o} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_s} \right) \quad (6a)$$

$$S_o = \frac{\Gamma \tau_p}{1 + \varepsilon / \tau_s g_o} (I_o - I_{th}) / eV \quad (6b)$$

其中

$$I_{th} = \frac{eV}{\tau_s} \left( N_{om} + \frac{1}{\Gamma g_o \tau_p} \right) \quad (6c)$$

定义为阈值电流。

很容易得到(3)式响应曲线的峰值处频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{BC - AD - (A - D)^2 / 2} \quad (7)$$

将上式做近似处理( $\tau_p / \tau_s \ll 1, \beta \ll 1$ ), 则弛豫振荡频率可表示为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{g_o S_o}{\tau_p (1 + \varepsilon S_o)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

当  $\varepsilon = 0$  时, 该表达式就是通常的激光器弛豫振荡频率表达式。

(7) 式有一最大值, 令  $df_r / dS_o = 0$ , 由(7) 式和(5) 式可得

$$f_r^{\max} = \frac{1}{2\pi \sqrt{2}} \frac{g_o}{\varepsilon + g_o \tau_p} \quad (9)$$

Table 1 Device parameter

Parameters	Values	Unit	Parameters	Values	Unit	Parameters	Values	Unit
$I_{th}$	25	mA	$\tau_p$	2.5	ps	$\Gamma$	0.679	
$f_r$	$1.3(I = 1.3I_{th})$	GHz	$\tau_s$	6.06	ns	$\beta$	$10^{-3}$	
$\lambda$	1.319	$\mu\text{m}$	$N_{om}$	$7.58 \times 10^{24}$	$\text{m}^{-3}$	$\varepsilon$	$1.52 \times 10^{-23}$	$\text{m}^3$
$V$	$9 \times 10^{-17}$	$\text{m}^3$	$g_o$	$1.86 \times 10^{-13}$	$\text{s}^{-1}\text{m}^3$			

表 1 给出了激光器的各参数值,  $I_{th}$  和  $f_r$  是测得的, 激光器有源区体积近似为  $V = 300 \times 1.5 \times 0.2 \mu\text{m}^3$ , 而光子寿命<sup>[8]</sup>

$$\tau_p = \left[ \frac{c}{n} \left( \bar{\alpha} - \frac{\ln R}{L} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

其中  $c$  是真空光速,  $n$  是介质波导的有效折射率,  $\bar{\alpha}$  是光路中材料的吸收系数,  $L$  是腔长,  $R$  是镜面反射率。对于 InGaAsP 材料,  $R = 0.32$ ,  $\bar{\alpha} = 10 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n$  可由  $\Delta\lambda = \lambda^2 / 2Ln$  得出, 本文激光器纵模间隔  $\Delta\lambda$  为  $0.833 \text{ nm}$ , 由(10)式可得出激光器的光子寿命约为  $2.5 \text{ ps}$ 。在  $300 \text{ K}$  时, 为了得

到光增益大于零,标称电流密度需要有  $4000 \text{ A/cm}^2 \mu\text{m}^{[9]}$ ,由此可近似估计出

$$N_{om} = \frac{I\tau_s}{eV} = 1.25 \times 10^{23} \tau_s (\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}) \quad (11)$$

激光器的阈值电流  $I_{th} = 25 \text{ mA}$ ,当  $I/I_{th} = 1.3$  时,  $f_r = 1.5 \text{ GHz}$ 。

由(6), (8), (9)和(11)式,可计算出

$$\tau_s = 6.06 \times 10^{-9} (\text{s})$$

$$N_{om} = 7.58 \times 10^{24} (\text{m}^{-3})$$

$$g_0 = 1.86 \times 10^{-13} (\text{s}^{-1}\text{m}^3)$$

$$\varepsilon = 1.52 \times 10^{-23} (\text{m}^3)$$

实验中使用了 HP8702B 光波网络分析仪(300 kHz~6 GHz,含 HP83411C 光接收机)测量组件的小信号频率响应,测试结果见图 4。测量范围从 300 kHz 到 3 GHz。组件小信号频率响应的 3 dB 带宽大于 2 GHz [图 4(a)]。图 4(b) 中实线是模拟计算的小信号调制响应。

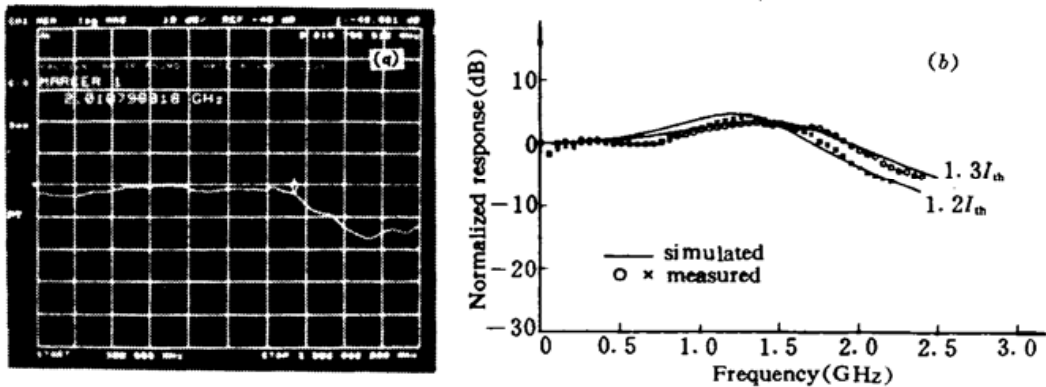


Fig. 4

(a) measured result of small-signal intensity modulation frequency response,  $I = 1.4I_{th}$ , 10 dB/div;

(b) measured and simulated small-signal intensity modulation frequency response

#### 4 激光器组件的非线性失真

非线性失真是激光器组件的重要特性之一,尤其是当组件用于模拟光通信系统中的时候。激光器组件的非线性包括两个方面,其一是  $L-I$ (输出光功率-驱动电流)特性引起的非线性;其二是激光器的本征非线性,当射频调制频率接近激光器弛豫振荡区域时,线性变坏。当激光器运转在  $L-I$  曲线的线性区域时,光源的非线性失真主要来自于后者。

激光器的本征非线性可以通过解(1)式的高阶次微扰方程组来分析,可以得到二次谐波、三次谐波与基波之比分别为

$$2HD = \frac{mS_0}{f(2\omega)} [(C-\Gamma A) - \Gamma j2\omega] \left[ \left( \frac{ED}{C} + F \right) - \frac{E}{C} j\omega \right] \quad (12)$$

$$3HD = \frac{(mS_0)^2}{f(2\omega)f(3\omega)} [(C-\Gamma A) - \Gamma j3\omega] \left\{ \left[ \left( \frac{ED}{C} + F \right) - \frac{E}{C} j\omega \right] \cdot \left[ \left( \frac{ED}{C} + 2F - \frac{E}{C} j\omega \right) (C - \Gamma A - \Gamma j2\omega) + E(\Gamma B - D) + E j2\omega \right] + \frac{\varepsilon E}{C} (j\omega - D) f(2\omega) \right\} \quad (13)$$

其中

$$E = \frac{g_0}{(1 + \epsilon S_0)^2} \quad (14)$$

$$F = \frac{\epsilon g_0 (N_0 - N_{om})}{(1 + \epsilon S_0)^2} \quad (15)$$

$m = s_1/S_0$ , 表示调制指数。

当有两个载波调制激光器时, 就会产生互调产物分量。对于频带小于一个倍频程的系统, 互调产物中最主要的是三阶互调( $2\omega_1 - \omega_2$ ,  $2\omega_2 - \omega_1$ )。

假设两个载波  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  相距不远, 即

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \ll \omega \quad (\text{中心频率})$$

我们可以近似得到互调产物与基波之比为

$$IMD = \frac{(mS_0)^2}{f(2\omega)f(3\omega)} [(C - \Gamma A) - \Gamma j\omega] \left\{ \left[ \left( \frac{ED}{C} + F \right) + \frac{E}{C} j\omega \right] \left[ \left( \frac{ED}{C} + 2F + \frac{E}{C} j\omega \right) \right. \right. \\ \left. \left. \cdot (C - \Gamma A - \Gamma j2\omega) + E(D - \Gamma B - j2\omega) - \frac{\epsilon E}{C} (j\omega + D)f(2\omega) \right] \right\} \quad (16)$$

使用 HP8350B 微波信号发生器 (10 MHz ~ 8.4 GHz)、HP8590B 频谱分析仪 (200 MHz ~ 1.8 GHz) 和 HP8702B 光波网络分析仪测试了组件的非线性失真特性。图 5 给出了模拟和测量的激光器非线性失真特性, 两者符合得很好, 因此可以使用 (12)、(13) 和 (16) 式来预测激光器的非线性失真特性。从图中可知, 激光器的互调失真在 -20 dB 左右, 完全可以满足微波副载波光波系统的需要。

## 5 结 论

从实验结果可知, 激光器组件光响应曲线的 3 dB 带宽大于 2 GHz [图 4(a)], 与组件的电特性相比 (图 3) 远未达到组件电特性的谐振点, 说明该组件主要是受到激光器芯片的特性限制。如果使用弛豫振荡频率高的激光器芯片 (包括其它类型), 在不改变组件结构的情况下, 便可大大提高激光器组件的调制带宽。根据激光器的小信号频响的测量结果计算出了激光器的参数值, 并据此预测了激光器的非线性失真特性, 同实验测量数据相符。

综上所述表明, 该器件可满足六次群的光通信系统的带宽要求, 也可用于 GHz 级的微波副载波光通信系统。该激光器组件的另一优点是完全实用化封装设计。如果通过机械振动、热效应等可靠性试验, 可将其商品化。

致谢 激光器组件的制作得到了武汉电信器件公司杨桂生、郑云生等同志的大力协作和支持, 特此致以衷心感谢。

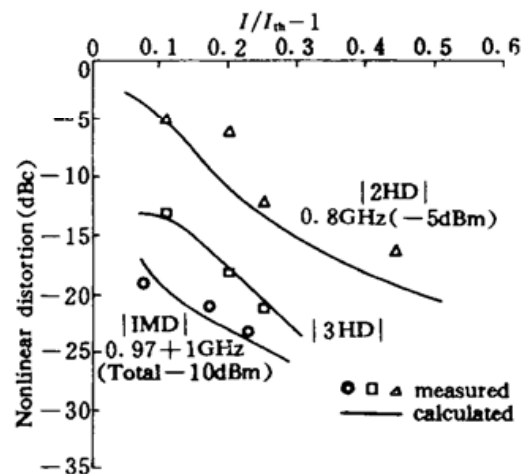


Fig. 5 Measured and simulated results for nonlinear distortion



## 参 考 文 献

- 1 R. Olshansky *et al.*. Frequency Response of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP High Speed Semiconductor Lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, QE-23(9): 1410~1418
- 2 S. Maricot *et al.*. Monolithic Integration of Optoelectronic Devices with Reactive Matching Networks for Microwave Application. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, 4(11): 1248~1250
- 3 NEC. Analog Laser Modules. *Lasers and Optronics*. 1992, 11(1): 37~38
- 4 Hiroguki Nakano *et al.*. Dual-In-Line Laser Diode Module for Fiber-Optic Transmission Up to 4 Gbit/s. *J. Lightwave Technol.*, 1987, LT-5(10): 1403~1411
- 5 K. C. 格普塔 等著, 冯忠华 等译. 微波电路的计算机辅助设计. 北京: 科学出版社, 1986. 140~150
- 6 K. Y. Lau *et al.*. Ultra-high speed semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985, QE-21(2): 121~147
- 7 R. S. Tucker. High-speed Modulation of Semiconductor Lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1985, LT-3(6): 1180~1192
- 8 亨利 克雷歇尔 等著, 黄史坚 译. 半导体激光器和异质结发光二极管. 北京: 国防工业出版社, 1983. 108~601

## Make of the Practicable Broadband Laser Diode Module and Studies on Its Characteristics

Zhang Zhengxian Li Zhitang\* Xu Jie\* Lin Zhiyuan\*\*

(Communications Engineering Institute, Nanjing 210016;

\* Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074;

\*\* Southeast University, Nanjing 210018)

**Abstract** Using DC-PBH laser diode (LD), the broadband LD module of practicable package type is developed. The LD module is studied and measured on the packaged LD model, involving small signal modulation characteristics and nonlinear distortion. Its 3 dB bandwidth of optical resonance is more than 2GHz. This device is able to satisfy the bandwidth need of 2.488 Gb/s in the optical fiber communication system and be used in the GHz microwave subcarrier multiplex optical fiber communication system.

**Key words** laser diode module, microwave, modulation, optical fiber communication, nonlinear distortion