

文章编号: 0258-7025(2003)06-0485-04

2.5 GHz 分布反馈激光器内部参数的实验测量

朱德鹏, 王卓然, 于晋龙, 刘志刚, 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要 用实验方法对激光器速率方程所涉及的激光器内部参数进行了测定。然后利用该参数,通过半导体激光器的大信号速率方程,得到它的光输出脉冲波形和啁啾的数值解,对模拟结果与测量结果进行比较,二者非常吻合。

关键词 激光技术;速率方程;半导体激光器;啁啾

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Extraction of the Parameters of 2.5 GHz DFB-LD Based on the Measurement

ZHU De-peng, WANG Zhuo-ran, YU Jin-long, LIU Zhi-gang, YANG En-ze

(School of Electronics & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The semiconductor laser rate equations are rewritten using a new set of parameters which can all be found from steady state and small signal measurements on the laser. Procedures for finding these parameters are described. Parameters have been measured on 1537.5 nm DFB laser. Comparison between large signal measurements and simulations using the measured parameters shows in general good agreement for modulation currents sufficiently above threshold.

Key words laser technique; rate equations; semiconductor laser; chirp

1 引言

随着调制速率的不断提高和光孤子通信、光时分复用(OTDM)等新技术的出现,对激光器输出脉冲动态特性的研究日益受到重视^[1~5]。研究激光器本身参数及其输出脉冲的特性,对于研究或涉及整个光传输系统的特性指标具有非常重要的意义。因此,在激光器研制过程中和通信系统设计的前期,采用计算机模拟的方法精确描述激光器输出脉冲的特征,越来越显得必不可少。其中激光器数学模型的选择与特征参数的确定是能否取得正确模拟结果的关键。在此我们采用大信号单模速率方程作为描述半导体激光器大信号输出的方法,对速率方程所涉及的激光器内部参数采用试验测定的方法来得到。

2 实验原理

描述激光器的动态特性通常采用的激光器的单模速率方程组表示为^[1]

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0 \cdot \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{I \beta N(t)}{\tau_n} & (1) \\ \frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_a} - g_0 \cdot \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{N(t)}{\tau_n} & (2) \\ \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \Gamma g_0 [N(t) - N_{th}] & (3) \end{cases}$$

其中输出光功率 $P(t)$ 与光子密度 $S(t)$ 的关系表示为

收稿日期:2002-09-26; 收到修改稿日期:2002-12-05

作者简介:朱德鹏(1979—),男,山东省德州市人,天津大学电子信息工程学院硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail:zdpeng525@sina.com

$$P(t) = \frac{V_a \eta h \nu}{2\Gamma \tau_p} S(t) \quad (4)$$

若要数值解(1)~(3)方程组,需要已知的参数有10个: Γ (光限制系数), V_a (有源区体积), g_0 (增益斜率), ϵ (增益饱和系数), N_0 (透明载流子密度), β (自发辐射系数), τ_p (光子寿命), τ_n (载流子寿命), η (总量子效率), α (线宽增强因子)。一般生产者或使用无法得到以上参数的准确值。我们希望能采用实验方法测量已封装激光器,得到以上参数或它们的组合,以此来求激光器单模速率方程数值解。为了达到以上目的,可以作以下变换

$$F = \frac{2e\lambda}{hc\eta} \quad I_s = \frac{\beta}{B\tau_n\tau_p} \quad B = \frac{\Gamma g_0}{eV_a}$$

$$I_{th} = \frac{eV_a N_{th}}{\tau_n} = \frac{eV_a}{\tau_n} \left(N_0 + \frac{1}{\Gamma g_0 \tau_p} \right)$$

$$\tau_c = \frac{\epsilon}{g_0}$$

令 $X(t) = N(t)/N_{th}$, 此时的速率方程变形为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} &= \frac{B\tau_n I_{th} [X(t) - 1] + 1/\tau_p P(t) - \frac{P(t)}{\tau_p} + \frac{I_s I_{th} B \tau_n X(t)}{F}}{1 + FB\tau_p \tau_c P(t)} \quad (5) \\ \frac{dX(t)}{dt} &= \frac{I(t)}{I_{th} \tau_n} - \frac{FB\tau_p [X(t) - 1] + F/(I_{th} \tau_n) P(t) - \frac{X(t)}{\tau_n}}{1 + FB\tau_p \tau_c P(t)} \quad (6) \end{aligned} \right.$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} B\tau_n I_{th} [X(t) - 1] \quad (7)$$

求解(5)~(7)方程组,需要得到的参数有 $B, F, I_{th}, I_s, \tau_p, \tau_n, \tau_c, \alpha$ 。通过测量并分析激光器的稳态 $P-I$ 特性、小信号调幅特性频率响应和调频特性频率响应就可以求得以上参数。

2.1 稳态 $P-I$ 特性分析

在激光器阈值电流附近,载流子密度很小,受激辐射可以忽略,光子数变化也很小,由式(1),(2)得光功率与电流关系的近似表达式(8),其中假设 $\epsilon S \ll 1$

$$(FP)^2 - (I - I_{th} - I_s)FP - I_s I \approx 0 \quad (8)$$

在明显高于阈值的线性区, $P-I$ 关系表示为

$$P = (I - I_{th})/F \quad (9)$$

通过测量 $P-I$ 曲线,可以得到 F, I_{th} 和 I_s 三个参数。

2.2 小信号调幅特性频率响应

激光器的小信号强度调制的频率响应可表示为^[1]

$$H_L(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\gamma\omega} \quad (10)$$

其中 ω_0 为张弛振荡角频率, $\omega = 2\pi f_0$, f_0 为张弛振荡频率, γ 为阻尼系数,它们有以下关系式

$$f_0 = \frac{\sqrt{B(I_0 - I_{th})}}{2\pi} \quad (11)$$

$$2\gamma = \frac{1}{\tau_n} + Kf_0^2 \quad (12)$$

$$K = 4\pi^2(\tau_p + \tau_c) \quad (13)$$

测量激光器的小信号频率响应曲线,可以得到 τ_n, B 和 K 。

2.3 小信号调频特性频率响应

对激光器进行强度调制时,必然带来附加的相位调制。激光器的瞬时频移与光功率关系为

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha}{4\pi} \left(\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} + \kappa P \right) \quad (14)$$

其中

$$\kappa = \frac{2\Gamma\epsilon}{\eta h \nu V_a} = FB\tau_c \quad (15)$$

半导体激光器的相位调制到幅度调制的传递函数表达式为

$$H_{PM}(f) = \frac{2p}{m} e^{ju} = \alpha \left(1 - \frac{jf_c}{f} \right) \quad (16)$$

$$f_c = \frac{\tau_c B (I - I_{th})}{2\pi} \quad (17)$$

$$\tan(u) = -f_c/f \quad (18)$$

实验中通过测光脉冲在一段光纤中传输的传递函数,可以得到 $H_{PM}(f)$,进而可以得到 τ_p, τ_c 和 α 。光纤的输入输出频率响应可表示为

$$H_F(j\omega) = \cos(F_D \omega^2) + j\alpha \sin(F_D \omega^2) \frac{j\omega + \omega_c}{\omega} \quad (19)$$

其中 $F_D = \frac{\lambda^2 DL}{4\pi c}$, L 为光纤长度, λ 为中心波长, D 为单位长度色散系数。

将测得的参数代入方程组(5)~(7),可研究分布反馈(DFB)激光器的输出波形和啁啾特性。

3 实验结果

实验中对2.5 GHz DFB激光器进行测试,实验结果与数据处理如下:

被测激光器的 $P-I$ 特性曲线见图1。

在高于阈值电流处, $P-I$ 曲线按照式(8)拟合得到如下两个参数: $F = 23.2 \text{ mA/mW}$, $I_{th} = 17.2 \text{ mA}$ 。在阈值电流附近 $P-I$ 曲线按照式(9)拟合得

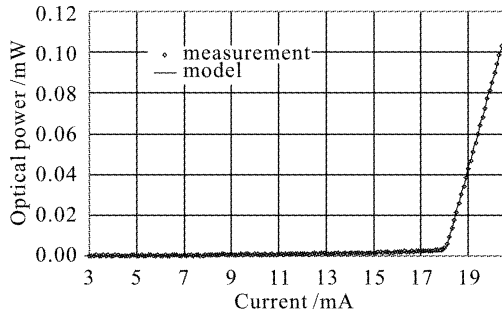


图 1 DFB 激光器(2.5 GHz)的 $P-I$ 曲线
数据点为测试结果,实线为根据式(8),(9)得出的模拟曲线
Fig. 1 Steady-state power current characteristic around threshold according to (8), (9)

到 $I_s = 2.1 \mu A$ 。从图中可以看出模拟曲线与测试数据吻合得很好。

测量激光器小信号调幅特性,通过逐点测试法得到 $|H_L(\omega)|$ 。在此分别测试了 $I_0 = 25 \text{ mA}, 30 \text{ mA}, 35 \text{ mA}, 40 \text{ mA}$ 的情形。由于外界因素的影响,测得的曲线有许多波动,而且有一些突然出现的峰或谷,这是由于激光器封装和测量中所用外部电缆、接头带来的频率缺陷。为了消除外界因素的影响,这里采用扣除的方法^[5],以 $I_0 = 25 \text{ mA}$ 作为参考线,求其他三个偏置点的小信号频率响应曲线与它的比值。然后应以式(20)来拟合曲线

$$H_{21}(f) = 10 \times \lg \left[\frac{f_{02}^2}{\sqrt{(f_{02}^2 - f^2)^2 + (\gamma_2/\pi)^2 f^2}} \times \frac{\sqrt{(f_{01}^2 - f^2)^2 + (\gamma_1/\pi)^2 f^2}}{f_{01}^2} \right] \quad (20)$$

其中 $f_{01}, f_{02}, \gamma_1, \gamma_2$ 分别对应不同偏置电流的两条频率响应曲线的张弛振荡频率和阻尼系数。按照式(20)拟合的曲线如图 2。

拟合得到的相应参数为: $I_0 = 25 \text{ mA}$ 时, $f_0 = 3.4 \text{ GHz}, \gamma = 3.8 \text{ GHz}$; $I_0 = 30 \text{ mA}$ 时, $f_0 = 4.2 \text{ GHz}, \gamma = 5.4 \text{ GHz}$ 。

同理以 $I_0 = 25 \text{ mA}$ 为参考线,拟合求得: $I_0 = 35 \text{ mA}$ 时, $f_0 = 5.0 \text{ GHz}, \gamma = 7.0 \text{ GHz}$; $I_0 = 40 \text{ mA}$ 时, $f_0 = 5.4 \text{ GHz}, \gamma = 9.4 \text{ GHz}$ 。

根据式(11),(12)拟合得到参数 $B = 55.05 \text{ mA/GHz}^2, K = 0.4 \text{ ns}, \tau_n = 0.243 \text{ ns}$ 。

测量激光器的调频特性响应,采用逐点法测量激光器小信号输出经光纤传输后的峰峰值,与输入峰峰值相除,从而求得光纤传输函数的测量值,如图 3。将计算所得的 F_D 代入式(19),在不同的偏置电流下根据式(19)拟合得到 $\alpha = 3.0, I_0 = 25 \text{ mA}, 30$

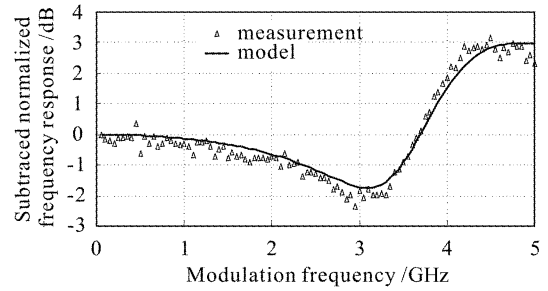


图 2 用扣除法 ($I_0 = 30 \text{ mA}$ 与 25 mA 之比)拟合的激光器频率响应曲线
Fig. 2 AM frequency responses by the frequency response subtraction method

The reference and actual responses are recorded with a bias current 25 mA and 30 mA

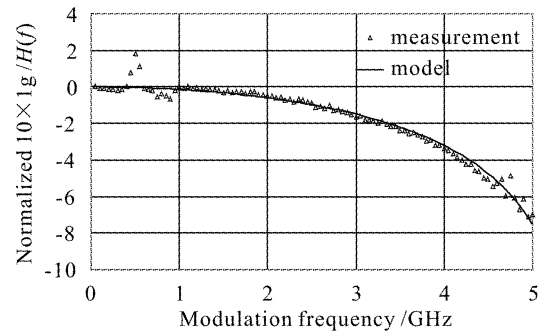


图 3 激光器调频特性的曲线与模拟 (传输距离 25 km SMF, $I_b = 30 \text{ mA}$)

Fig. 3 AM frequency response after propagation through 25 km SM fiber (The laser was based 30 mA)

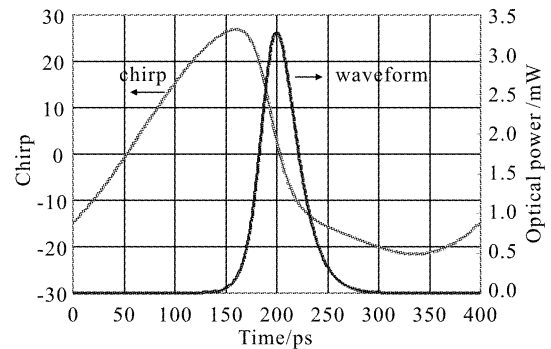


图 4 激光器输出波形和啁啾的数值解
Fig. 4 Calculated result of waveform and chirp about laser

$\text{mA}, 35 \text{ mA}, 40 \text{ mA}$ 时, f_c 分别为 $0.17 \text{ GHz}, 0.32 \text{ GHz}, 0.45 \text{ GHz}, 0.58 \text{ GHz}$ 。根据式(17)得 $\tau_c = 2.8 \text{ ps}$,将其代入式(13)得 $\tau_p = 7.3 \text{ ps}$ 。

将实验及拟合测得的激光器参数代入方程组(5)~(7)解得激光器输出波形和啁啾在一个周期内

随时间变化的曲线,激光器驱动信号为 2.5 GHz 正弦波,工作在增益开关状态, $I_b = 25 \text{ mA}$, $I_{p-p} = 40 \text{ mA}$ 。激光器输出脉冲宽度为 40 ps。如图 4。图 5 为 2.5 GHz 正弦波驱动激光器得到的多个脉冲的数值解输出波形,图 6 为同样驱动条件下示波器测量的多个脉冲的波形。图形表明,利用实验确定的一套激光器内部参数求解的速率方程,其结果与实际测试结果极好地吻合。

表 1 为通过测量及计算得到的激光器内部参数。

表 1 通过测量及计算得到的激光器内部参数
Table 1 Near parameters of laser with measurement and calculation

Parameter	Value
I_{th} / mA	17.2
$I_s / \mu\text{A}$	2.1
$F / \text{mA} \cdot \text{mW}^{-1}$	23.2
$B / \text{GHz}^2 \cdot \text{mA}^{-1}$	55.05
τ_n / ns	0.243
τ_p / ps	7.3
τ_c / ps	2.8
α	3.0

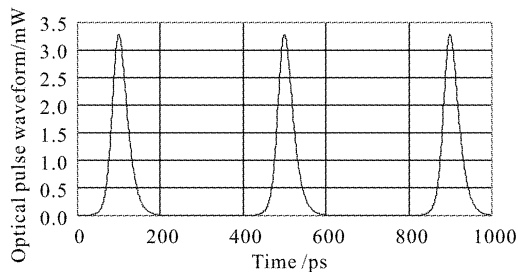


图 5 速率方程数值解的多个脉冲波形

Fig. 5 Result of multi-waveform received from rate equations

4 结 论

本文利用实验测定的方法,得出解单模速率方

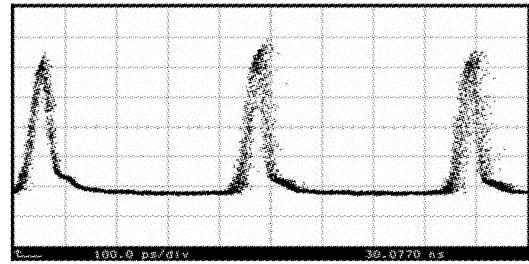


图 6 示波器测得的激光器输出多个脉冲的波形,脉宽 40 ps

Fig. 6 Multi-waveform received from oscillograph, width of pulse is 40 ps (100 ps/div)

程所需的激光器内部参数及其原速率方程参数的组合。利用这些新参数对变换后的单模速率方程进行数值分析,解得半导体激光器输出脉冲的波形和啁啾。将计算机所得的结果与同样驱动条件下的测量结果相对比,其结果表明,本方法得到的激光器模型参数与实际相符。

参 考 文 献

- 1 J. C. Cartledge, R. C. Srinivasan. Extraction of DFB Laser rate equation parameters for system simulation purposes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5):852~860
- 2 L. Ramunno, J. E. Sipe. Dynamical model of directly modulated semiconductor laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4):624~634
- 3 Leif Bjerkan, Arne Røyset, Laser Hafskjær *et al.*. Measurement of laser parameters for simulation of high-speed fiberoptic systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(5):839~850
- 4 R. S. Tucker. High-speed modulation of semiconductor lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(6):1180~1192
- 5 Gao Jianjun, Gao Baoxin, Liang Chunguang. The direct extraction of the model parameters for the high-speed low-threshold semiconductor laser [C]. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC, 1997, Vol. 2*, 569~571