

激光器速率方程参数的实验提取及动态特性实验

马晓红¹, 于晋龙², 戴居丰², 杨恩泽²

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 通过实验测量和拟合的方法得到 10Gb/s 半导体激光器内部参数, 用于解激光器单模速率方程. 由此分析激光器增益开关输出脉冲的波形和啁啾特性, 并通过不同光纤传输实验, 证明计算与实验结果吻合.

关键词: 激光器单模速率方程; 动态特性; 啁啾

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1295-03

Extraction of the Parameters of Laser Rate Equation by Measurement and Dynamic Character Experiment

MA Xiao-hong¹, YU Jin-long², DAI Ju-feng², YANG En-ze²

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The intrinsic parameters of 10Gb/s semiconductor laser are obtained from experimental measurement and simulation. These parameters will be used in solving single mode rate equation of the laser. Thus the output pulse waveform and chirp of the gain-switched laser are analyzed and experimented by transmitting in various fibers. It is verified that the simulation result is in agreement with the experimental result.

Key words: single mode rate equation of laser; dynamic character; chirp

1 引言

在高速光纤传输系统中, 特别是涉及窄脉冲及非线性应用时, 激光器输出脉冲的波形、光谱、啁啾等特性, 极大地影响系统性能. 因此, 对光源脉冲动态特性的模拟倍受重视, 其中激光器数学模型与特征参数的确定是能否取得精确模拟结果的关键. 采用大信号单模速率方程描述半导体激光器大信号输出是常用的方法^[1-5].

本文用实验测定并推导的方法确定速率方程所涉及的激光器内部参数, 然后将解速率方程得到的半导体激光器输出脉冲波形、光谱和啁啾的数值解与测量结果进行比较, 并将光纤传输的模拟结果与实验结果进行了对比, 二者吻合很好.

2 激光器内部参数的测量

描述激光器的动态特性通常采用激光器单模速率方程:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0 \cdot \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N(t)}{\tau_n} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV_a} - g_0 \cdot \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{N(t)}{\tau_n} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \Gamma g_0 (N(t) - N_{th}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $S(t)$, $N(t)$ 分别为光子密度和载流子密度, g_0 为增益斜

率 (m^3/s), ϵ 为增益饱和系数 (m^3), τ_n , τ_p 为载流子寿命和光子寿命 (s), β 为自发辐射系数, α 为线宽增强因子, Γ 为光限制系数, V_a 为有源区体积 (m^3). 方程组中利用光子密度 $S(t)$ 来表示光的瞬态输出, 输出光功率 $P(t)$ 与光子密度 $S(t)$ 的关系表示为:

$$P(t) = \frac{V \eta w}{2 \Gamma \tau_p} S(t) \quad (4)$$

其中 η 为总量子效率. 如果已知方程组中的参量: Γ , g_0 , ϵ , N_0 , β , τ_p , τ_n , η , α , 通过数值解法, 可以很容易地由式(1)-(4)得到输出光脉冲的瞬态解. 通过实验可间接测定以上参数或它们的组合, 具体地, 测量并分析激光器的稳态 $P-I$ 特性、小信号调幅特性和调频特性, 得到激光器内部参数并求解速率方程. 首先对方程(1)-(4)作如下变换:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{B \tau_n I_{th} (X(t) - 1) + \frac{1}{\tau_p} P(t) - \frac{P(t)}{\tau_p} + \frac{I_{th} B \tau_n}{F} X(t)}{1 + FB \tau_p \tau_c P(t)} \quad (5)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{I(t)}{I_{th} \tau_n} - \frac{FB \tau_p (X(t) - 1) + \frac{F}{I_{th} \tau_n} P(t) - \frac{X(t)}{\tau_n}}{1 + FB \tau_p \tau_c P(t)} \quad (6)$$

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

其中定义 $X(t) = N(t)/N_{th}$, N_{th} 为阈值载流子密度:

收稿日期: 2001-12-17; 修回日期: 2002-06-15
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69707002)

$$\Gamma g_0 \frac{N_{th} - N_0}{1 + \epsilon S} = \frac{1}{\tau_p} \quad (8)$$

新方程组中的一组参数 I_{th} (mA), I_s (μ A), F (mA/mW), B (GHz^2/mA), τ_n (ns), τ_p (ps), τ_c (ps), α , 是可以通过实验确定的. 定义如下:

$$I_{th} = \frac{eV_a N_{th}}{\tau_n} = \frac{eV_a}{\tau_n} (N_0 + \frac{1}{\Gamma g_0 \tau_p}) \quad (9)$$

$$I_s = \frac{\beta}{B \tau_n \tau_p} \quad (10)$$

$$F = \frac{2e\lambda}{hc\eta} \quad (11)$$

$$B = \frac{\Gamma g_0}{eV_a} \quad (12)$$

$$f_0 = \frac{\sqrt{B(I_0 - I_{th})}}{2\pi} \quad (13)$$

$$2\gamma = \frac{1}{\tau_n} + K f_0^2 \quad (14)$$

$$K = 4\pi^2 (\tau_p + \tau_c) \quad (15)$$

通过对激光器稳态 $P-I$ 特性曲线的拟合可以得到 I_{th} , I_s , F ^[6], 图 1 为实验和拟合结果.

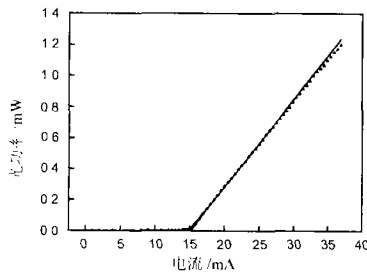


图 1 10Gb/s DFB 激光器 $P-I$ 曲线. 数据点为测试结果; 实线为模拟结果.

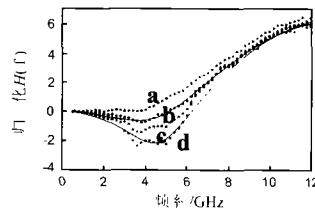


图 3 激光器调频性曲线的测量与拟合. (a) $I_b = 30\text{mA}$, (b) $I_b = 35\text{mA}$; (c) $I_b = 40\text{mA}$; (d) $I_b = 45\text{mA}$. (G.652 光纤传输 25.28km, 数据点为测试结果, 实线为模拟结果)

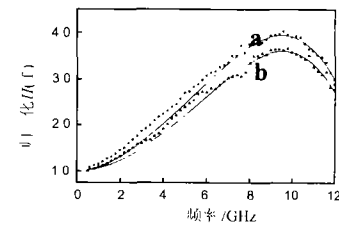


图 4 激光器调频性曲线的测量与拟合. (a) $I_b = 35\text{mA}$; (b) $I_b = 45\text{mA}$; (DCF 中传输 6.37km 数据点为测试结果, 实线为模拟结果)

通过测量光脉冲在光纤中传输的传递函数^[7], 可按式(16)对光纤频率响应函数拟合得出 τ_p , τ_c , α .

$$H_F(f) = \cos(4\pi^2 F_D f^2) - \alpha \sin(4\pi^2 F_D f^2) + j\alpha \frac{f_c}{f} \sin(4\pi^2 F_D f^2) = \cos(4\pi^2 F_D f^2) - H_{PM}(f) \sin(4\pi^2 F_D f^2) \quad (16)$$

其中 $f_c = \frac{\tau_c B (I - I_{th})}{2\pi}$, $F_D = \frac{\lambda^2 DL}{4\pi c}$

实验中采用 G.652 和 DCF 两种光纤测量, 光纤参数如表 1 所示图 3、4 为两种光纤传递函数的测量及拟合结果.

	G.652	DCF
长度 (km)	25.28	6.37
色散 ($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	17	-85.6
损耗 (dB/km)	0.193	0.65

综合以上测量, 得到变换后的激光器速率方程参数如表 2 所示.

3 计算机模拟结果与实验结果的对比如

利用得到的速率方程参数求速率方程数值解, 得激光器动态输出的时域和频域结果, 见图 5-7. 同时图中给出了同

通过测量直接调制激光器的小信号频率响应曲线^[6], 可以得到 τ_n , B 和 K . 图 2 为 4 种不同偏置电流下激光器频率响应曲线, 在拟合过程中为了去除激光器外部连接特性的影响采用了扣除法^[2].

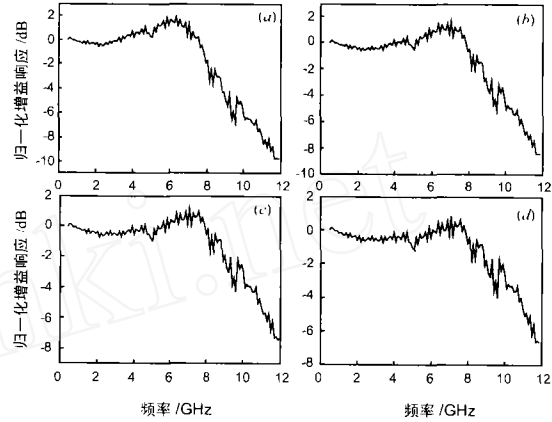


图 2 试点测得的激光器小信号频率特性曲线 (a) $I_0 = 30\text{mA}$; (b) $I_0 = 35\text{mA}$; (c) $I_0 = 40\text{mA}$; (d) $I_0 = 45\text{mA}$

样条件下实验测试结果.

进一步地, 激光器输出的啁啾脉冲经过色散补偿光纤后, 其啁啾得到补偿并且脉宽被压缩. 此时将解速率方程得到的脉冲作为输入, 通过解非线性传输方程可对这一过程进行计算机模拟, 图 8 为 1.05km DCF 光纤的输入输出波形的数值解. 图 9 为同样条件下实验得到的输出脉冲自相关轨迹.

4 结论

利用实验测定的方法, 得出解单模速率方程所需的激光器内部参数. 利用这些参数求变换后的单模速率方程数值解, 分析半导体激光器输出脉冲的波形、啁啾和谱特性. 重点研究了激光器增益开关状态下的脉冲输出的特性. 将计算所得的

表 2

参数	值
I_{th} (mA)	15.1
I_s (μ A)	5
F (mA/mW)	18.1
B (GHz^2/mA)	107.5
τ_n (ns)	0.65
τ_p (ps)	1.34
τ_c (ps)	9.3
α	3.2

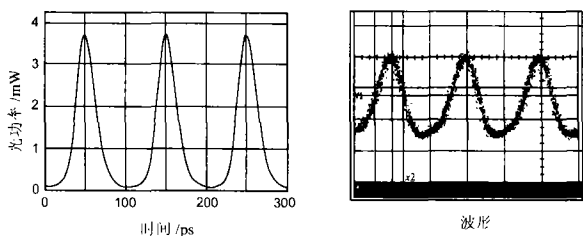


图 5 10GHz 增益开关脉冲数值解及测量波形.

$T_{EWHM} = 25\text{ps}$. ($I_b = 36\text{mA}$, $I_{PP} = 98\text{mA}$)

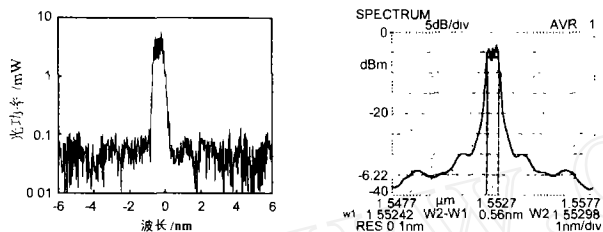


图 6 增益开关输出脉冲光谱数值解和光谱仪测试结果 ($I_b = 36\text{mA}$, $I_{PP} = 98\text{mA}$, 1nm/div)

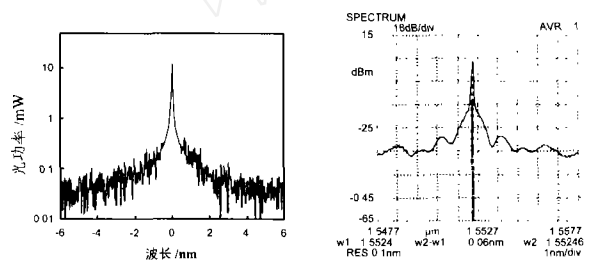


图 7 激光器小信号驱动时光谱的数值解和实测值. ($I_b = 36\text{mA}$, $I_{PP} = 3\text{mA}$, 1nm/div)

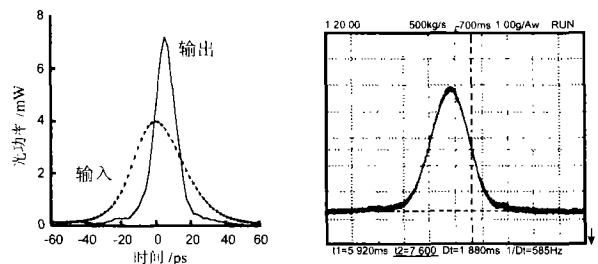


图 8 计算得到的 DCF 输入输出脉冲波形. 输入脉宽为 25ps, 输出脉宽为 11ps.

图 9 增益开关激光器输出经 DCF 补偿后脉冲自相关波形, 7.3ps/div , 脉宽为 12.8ps.

结果与同样驱动条件下的实验结果对比,其结果表明,用以上方法得到的激光器模型参数与实际相符.

进一步地,将其用于脉冲消啁啾和脉冲压缩的数值计算中,同样可证明模拟与实验的一致性,印证了激光器参数的准确性.

感谢武汉电信器件公司提供了 10Gb/s DFB 激光器.

参考文献:

- [1] Cartledge. DFB laser rate equation parameters-for system simulation purposes [J]. IEEE J. L. T, 1997, 15(5): 852 - 860.
- [2] Ramunno L, Sipe J E. Dynamical model of directly modulated semiconductor laser diodes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics 1999, 35(4): 624 - 634.
- [3] Luo Y Sun, Ch - Z Nakano, Y Tada. K Analysis of gain and index coupling coefficients of DFB semiconductor lasers using a practical model [J]. International Journal of Optoelectronics, 1995, 10(5): 331 - 335.
- [4] Jakobsen, Kaj B Karim, Mohammad A. FM modulation response model of direct modulated buried heterostructure semiconductor lasers [J]. Optics Communications, 1991, 82(5 - 6): 456 - 460.
- [5] R S Tucker. High-speed modulation of Semiconductor laser [J]. J of Lightwave Technology, 1985, 3(7): 1180 - 1192.
- [6] Leif Bjerkan, Arne Røyset, Lars Hafskjær, Dagfinn Myhre. Measurement of laser parameters for simulation of High-speed fiberoptic systems [J]. J of Lightwave Technology, 1996, 14(5): 839 - 850.
- [7] R Olshansky, P Hill, V Lanzisera, W Powaznik. Frequency response of $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP high speed semiconductor lasers [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1987, 23(9): 1410 - 1418.
- [8] P A Morton, T Tanbun - Ek, R A Logan, A M Sergent, P F Sciortino, Jr D L Coblentz. Frequency response subtraction for simple measurement of intrinsic laser dynamic properties [J]. IEEE photon technology letter, 1992, 4(2): 133 - 136.

作者简介:

马晓红 女, 1966 年 11 月生于天津, 1990 年 7 月毕业于清华大学电子工程系, 1993 年及 2001 年在天津大学分别获得硕士、博士学位. 主要研究方向为高速光纤通信系统中的传输与交换, 以及相关光电子器件的研究. Email: maxh@ee.tsinghua.edu.cn.