

文章编号: 0258-7025(2003)01-0012-05

增益开关半导体激光器最佳工作状态研究

伍剑, 张帆, 左鹏, 郭宏翔, 林金桐

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要 研究了不同调制速率下的增益开关半导体激光器的最佳工作状态。理论分析表明,在不同的调制速率下,激光器的最佳工作状态有较大的差异。在低速调制下,激光器应该工作在较小的直流偏置下,以避免输出脉冲拖尾的产生。在高速调制下,激光器应该工作在较高的直流偏置下,以提高输出脉冲的消光比。理论结果同实验结果相吻合。

关键词 激光技术;增益开关半导体激光器;消光比;光时分复用

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Study on Optimal Operating Condition of Gain-switched Semiconductor Laser Diode

WU Jian, ZHANG Fan, ZUO Peng, GUO Hong-xiang, LIN Jin-tong

(Center of Optical Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The optimal operating condition of gain-switched semiconductor laser with different modulation rate is studied in this paper. The theoretical results point that the optimal operating condition is quite different for the variation of modulation rate. In the condition of low modulation rate, small bias current should be applied to avoid the tailing of output pulse. In the condition of high modulation rate, large bias current should be applied in order to improve the extinction ratio of the pulse. The theoretical results agree well with the experimental results.

Key words laser technique; gain-switched semiconductor laser; extinction ratio; optical time division multiplexing

1 引言

增益开关半导体激光器^[1] (Gain-Switched semiconductor laser, G-S)具有结构紧凑、性能稳定的特点,在高速正弦电信号^[2~4]调制下即可产生超短脉冲序列,且重复速率可调,易于实现与通信系统中其他设备的同步操作,因此,G-S超短脉冲激光器可用作未来高速、大容量的光时分复用(OTDM)通信系统的光发射源或光时钟源^[5~8]。

高速 OTDM 系统要求光脉冲源具有较小的定时抖动和不大于 1/3 码元周期的脉冲宽度,同时还要具有良好的消光比性能。这是因为低的消光比将增大 OTDM 信号中临近信道之间的干扰,直接导致系统传输性能的恶化。目前,OTDM 系统的单信

道速率已上升到 10 Gbit/s 甚至更高,因而当激光器模块带宽一定时,通常采用增加激光器偏置电流的方法来提高其频率响应。偏置电流的变化将会导致激光器输出脉冲消光比的变化,在不同的调制速率下,其表现特征也有所不同。因此,研究高速调制情况下输出光脉冲消光比的变化对 G-S 超短脉冲激光器在系统中的应用具有重要价值。

本文以脉冲的消光比作为衡量激光器性能的主要标准,研究不同调制速率下的最佳工作状态,为 OTDM 系统应用提供理论依据。

2 增益开关激光器速率方程

对于 DFB 半导体激光器,载流子密度 $N(t)$,光子密度 $S(t)$ 以及光场相位 $\phi(t)$ 随时间 t 的变化关系

收稿日期:2001-10-29;收到修改稿日期:2001-12-30

作者简介:伍剑(1971—),男,北京邮电大学光通信中心副教授,博士,主要从事高速光时分复用网络、光接入网及高速光电子器件技术的研究。E-mail: jianwu@bupt.edu.cn

由下面的耦合非线性速率方程描述^[9]

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g_0[N(t) - N_0] \frac{1}{1 + \epsilon S(t)} S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0[N(t) - N_0] \frac{1}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N(t)}{\tau_n} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left\{ \Gamma g_0[N(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} \quad (3)$$

其中, q 为电子电荷, V 为有源层体积, $I(t)$ 为注入电流, τ_n 为自发载流子寿命, g_0 为增益系数, N_0 为透明载流子密度, ϵ 为增益压缩因子(非线性增益系数), Γ 为模限制因子, τ_p 为光子寿命, β 为自发发射因子(耦合成激射模的自发发射比率), α 为线宽增强因子。

激光器的输出光功率 $P(t)$ 和啁啾 $\Delta\nu$ (即瞬时频率偏差 $\nu - \nu_0$, ν 为激光器的瞬时光频率, ν_0 为激光器未被调制时的光频率。) 分别为

$$P(t) = \frac{V \eta_0 h \nu}{2 \Gamma \tau_p} S(t) \quad (4)$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (5)$$

其中 η_0 为微分量子效率, h 为普朗克常数。

激光器输出光脉冲的复振幅可以表示成

$$U(t) = \sqrt{P(t)} \exp\{j[2\pi\nu_0 t + \phi(t)]\} \quad (6)$$

将正弦调制电信号叠加在激光器直流偏置之上实现增益开关, 则激光器的注入电流可表示为

$$I(t) = I_b + I_m \sin(2\pi f_m t) \quad (7)$$

其中, I_b 为偏置电流, I_m 为调制电流幅度, f_m 为调制频率。

方程(1)~(7)构成了对增益开关半导体激光器动力学过程的完整的速率方程描述。运用四阶 Runge-Kutta 法对速率方程进行数值求解, 可得出载流子密度、光子密度、输出光脉冲及其相位、啁啾随时间的变化关系。

当直流偏置电流 I_b 位于阈值电流 I_{th} 之上时, 从小信号分析可得到激光器的张弛振荡频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_n} \left(\frac{I_b}{I_{th}} - 1 \right) \left(\Gamma g_0 N_0 + \frac{1}{\tau_p} \right)} \quad (8)$$

可以看出, 激光器的张弛振荡频率即小信号调制带宽除了与偏置电流有关外, 还取决于激光器本身的自发载流子寿命、光子寿命、模式限制因子、微分增益和透明载流子密度等参数。增加激光器的偏置电

流, 可以在一定程度上提高激光器的调制带宽。

3 理论结果与分析

首先采用数值分析的方法, 研究 G-S 半导体激光器在不同的调制速率下, 输出波形随工作状态的变化关系。以脊波导型半导体激光器为例, 计算中选取的典型参数为: $V = 2.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3$, $\tau_n = 0.83 \text{ ns}$, $\tau_p = 0.91 \text{ ps}$, $g_0 = 1.87 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 \text{ ps}^{-1}$, $N_0 = 1.46 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\Gamma = 0.26$, $\beta = 1.2 \times 10^{-4}$, $\alpha = 4$, $\epsilon = 1.72 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$ 。在下面的数值分析中, 除了变化参数外, 其余的参数均按以上给出的数据选取。

当调制速率为 2.5 GHz 和 10 GHz 时, 激光器的输出特性随偏置电流和调制深度的变化会表现为不同的特征, 计算结果如图 1 所示。图中 m 为调制深度, 定义为调制电流幅度同偏置电流的比值; r_0 代表偏置大小, 为偏置电流与阈值电流之比。

对于 2.5 GHz 的调制速率, 偏置电流对激光器输出波形有较大的影响, 随着偏置电流的增大, 激光器输出波形在脉冲后会携带明显的拖尾, 偏置电流越大, 拖尾越严重。比较调制深度为 0.3 和 0.8 时的计算结果, 还可看出, 当调制深度较小时, 高偏置状态下的拖尾现象更严重。对于 10 GHz 速率的调制, 激光器输出脉冲波形没有明显的拖尾现象, 且偏置电流越高, 脉冲消光比越大。在相同的偏置电流下, 调制深度越大, 脉冲宽度越小, 消光比越大。

可以通过研究激光器在直流偏置下的张弛振荡现象和小信号调制特性来解释不同调制频率下的脉冲拖尾现象。图 2 给出了计算结果。张弛振荡频率随着偏置电流的升高而增大, 且更快的趋向于稳定态。当偏置电流大于 1.5 倍的阈值电流时, 激光器的张弛振荡频率大于 5 GHz。这说明对于 2.5 GHz 的调制, 一个调制周期内实际上对应着两个张弛振荡脉冲, 虽然正弦调制下的增益开关过程可以抑制后续振荡脉冲的建立, 但是对同一个周期内后续振荡脉冲的抑制还是有限的, 这就是造成低速调制高偏置状态下脉冲拖尾的主要原因。对于高速调制, 由于一个调制周期内的振荡脉冲数刚好唯一, 因此可以有效地激励第一个振荡脉冲而抑制后续的振荡脉冲, 因此脉冲拖尾现象不明显。

在实际应用中, 同脉冲序列较低的消光比一样, 脉冲拖尾也将造成 OTDM 临近信道之间强烈的干扰, 导致系统性能恶化。由此可见, 调制速率对增益开关激光器的影响主要是造成激光器最佳工作状态

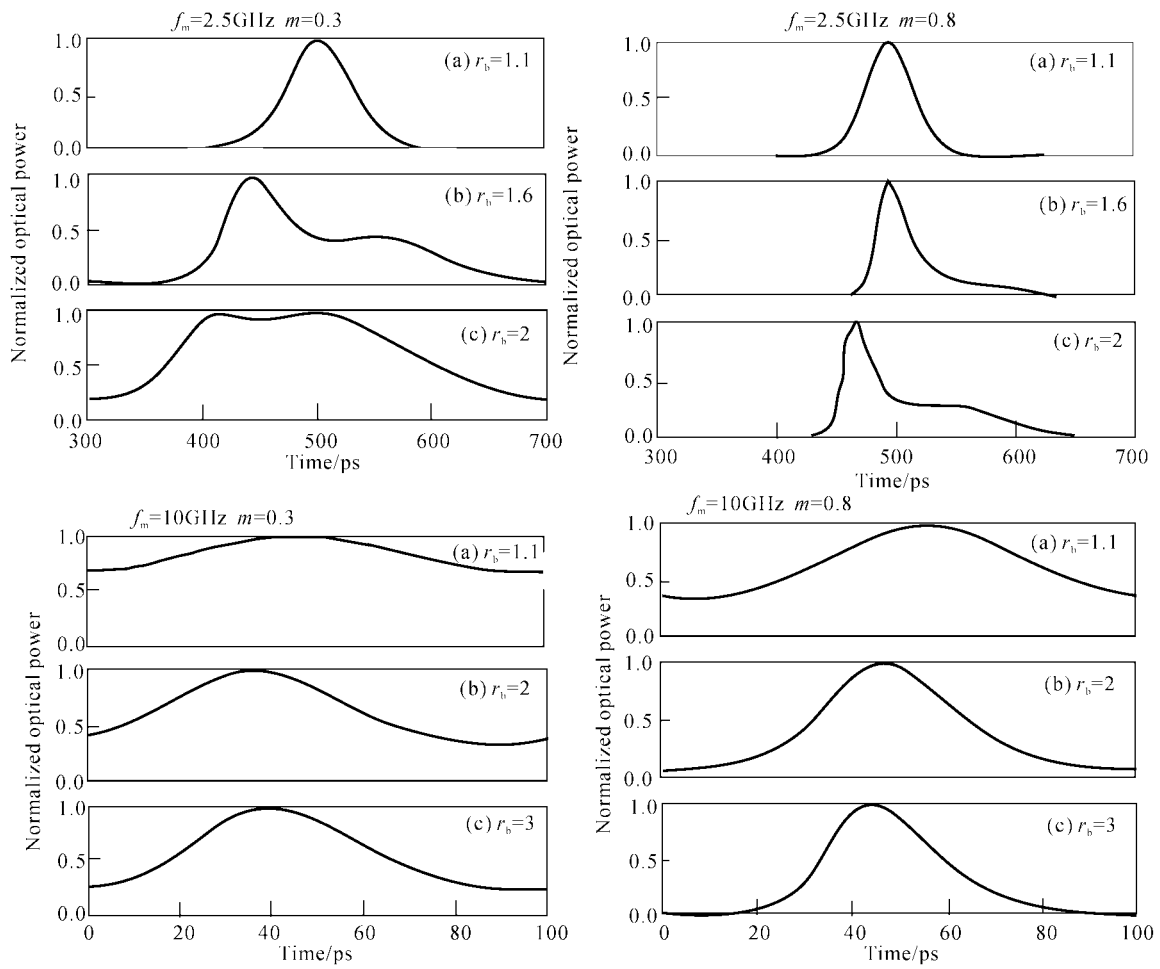


图 1 不同调制速率下输出光脉冲的波形

Fig. 1 Waveform of output pulses under the condition of different modulation rate

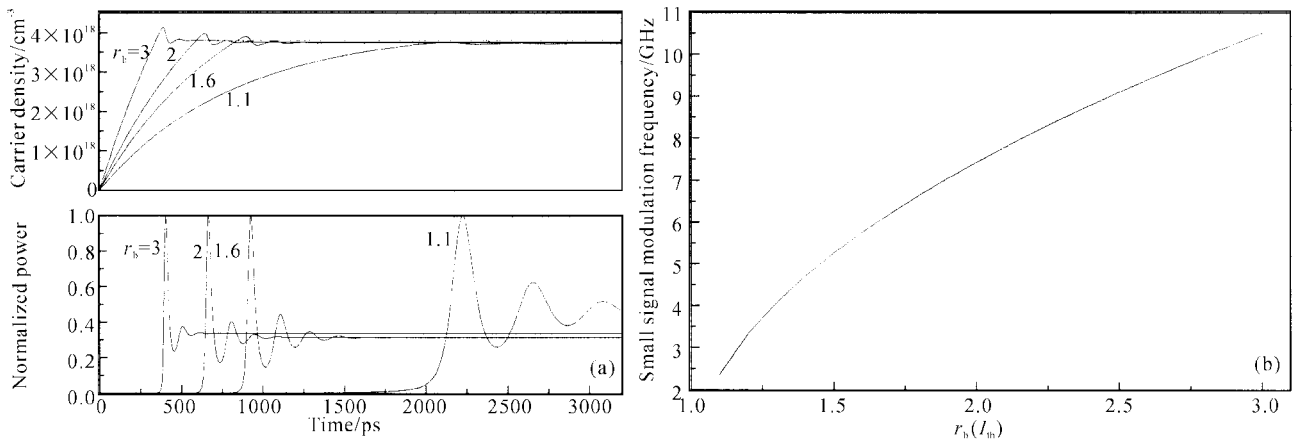


图 2 增益开关激光器的张弛振荡特性

(a) 激光器载流子密度及输出归一化光强的变化; (b) 小信号调制频率随偏置电流的变化

Fig. 2 Characteristics of gain-switched laser

(a) waveform of carrier density of laser and output optical intensity;

(b) small signal modulation frequency vs bias current

状态的偏移,因为偏置电流对激光器的张弛振荡频率有直接的影响,所以在不同的调制速率下,激光器应工作在不同的直流偏置下,以达到既要满足激光器调制带宽的要求,又要抑制脉冲拖尾的目的。对于 2.5 GHz 的调制速率,激光器宜工作在低偏置高调制深度状态下。当调制速率达到 10 GHz 调制速率时,影响激光器输出优劣的主要因素不再是脉冲拖尾现象,而是激光器的小信号调制频率,适当地增大偏置电流和调制深度,可以提高激光器的小信号调制频率,从而促使激光器载流子可以迅速跟上调制电流的起伏波动,因此脉冲具有较高的消光比。

分析图 1 中的结果,可以得到,在最佳的工作状态下,对于 2.5 GHz 速率的调制,可以获得接近 30 dB 的消光比;而对于 10 GHz 调制速率,在最佳工作状态下,脉冲序列的消光比不到 20 dB。这说明,从总体来看,2.5 GHz 速率调制的激光器脉冲消光比要好于 10 GHz 速率状态。其原因在于激光器的调制响应,在低速调制下,激光器在较低的偏置电流下即可充分响应调制电流的波动;相反地,对于高速调制,必须通过提高激光器的偏置电流强度的方式来增加激光器的小信号调制带宽,在这种情况下,增益开关过程中输出的光脉冲实际上是在一个较高的直流本底上产生的,因此消光比要小于低偏置下的低速增益开关激光器。为进一步提高高速增益开关激光器的消光比,必须增加激光器在低偏置状态下的调制带宽。

4 实验验证

理论分析表明,在不同的调制速率下,偏置电流强度对激光器的输出性能具有重大的影响。对 2.5 GHz 速率,增加偏置电流,将导致脉冲拖尾现象的产生。相反地,对于 10 GHz 调制速率,脉冲不会具有拖尾现象,增加偏置电流,可以有效地提高消光比,减小脉冲宽度。下面通过实验来验证这一结论。

实验装置如图 3 所示。激光器采用中国科学院半导体研究所的脊波导 DFB 管芯,室温下中心波长为 1545.7 nm,3 dB 调制带宽大约为 8 GHz。激光器的阈值电流大约为 24 mA(室温下)。实验中所用示波器为 Tek801c 型示波器,其光采样头和电采样头带宽分别为 20 GHz 和 50 GHz。

图 4 为 2.5 GHz 速率的增益开关激光器在不同偏置电流下的脉冲波形。图中(a),(b)和(c)对应

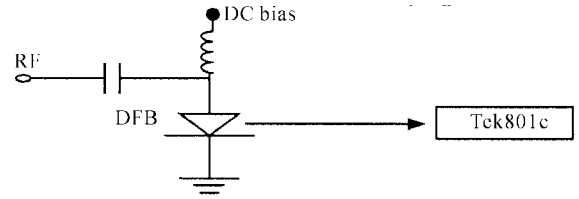


图 3 实验装置

DFB: 分布反馈半导体激光器; RF: 调制电流;

DC Bias: 偏置电流; Tek801c: 示波器

Fig. 3 Experimental setup

DFB: distributed-feedback Bragg laser; RF: radio frequency;

DC Bias: direct current bias; Tek801c: oscilloscope

的偏置电流 r_0 分别为 2 倍, 1.6 倍和 1.1 倍的阈值电流, 调制深度为 0.8。可以看出, 激光器在偏置电流为 2 倍和 1.6 倍阈值电流时, 其输出脉冲携带较大的拖尾。当偏置电流为 1.1 倍阈值电流时, 激光器输出的脉冲没有拖尾现象。实验结果同理论结果相吻合。

图 5 为 10 GHz 速率下, 增益开关激光器在不同偏置电流下的脉冲波形。其中(a),(b)和(c)所对应的偏置电流分别为阈值电流强度的 3 倍, 2.4 倍和 2 倍, 调制深度为 0.8。为了对比分析, 将不同偏置状态下的示波器采样脉冲基线调整到相同值, 如图 5 中的虚线所示。在相同的调制深度下, 三种偏置状态下的脉冲底部基本上处于相同的强度水平, 而偏置电流越高, 其脉冲峰值越高。很明显可以得出结论, 随着偏置电流的增加, 脉冲消光比也将随着增加, 脉冲宽度减小, 这同理论结果是一致的。

对于 2.5 GHz 速率的增益开关半导体激光器, 采用正弦调制时, 激光器应该工作在低偏置、高调制状态下, 这样可以获得比较理想的脉冲质量。由于偏置电流可以接近阈值电流, 且激光器对于低速调制具有足够的响应带宽, 因此, 2.5 GHz 的增益开关激光器输出脉冲通常具有相当高的消光比, 图 4 (c) 所对应的消光比可高达 25 dB, 所以, 当 OTDM 的单信道速率为 2.5 Gbit/s 时, 采用增益开关半导体激光器是一种理想的方案。

对于 10 GHz 的增益开关半导体激光器, 其脉冲消光比要低于 2.5 GHz 的增益开关半导体激光器。为满足超高速 OTDM 通信系统的需求, 必须提高增益开关半导体激光器的小信号调制带宽, 使其在较小的偏置下就能够充分响应调制电流的波动, 进而提高脉冲消光比。

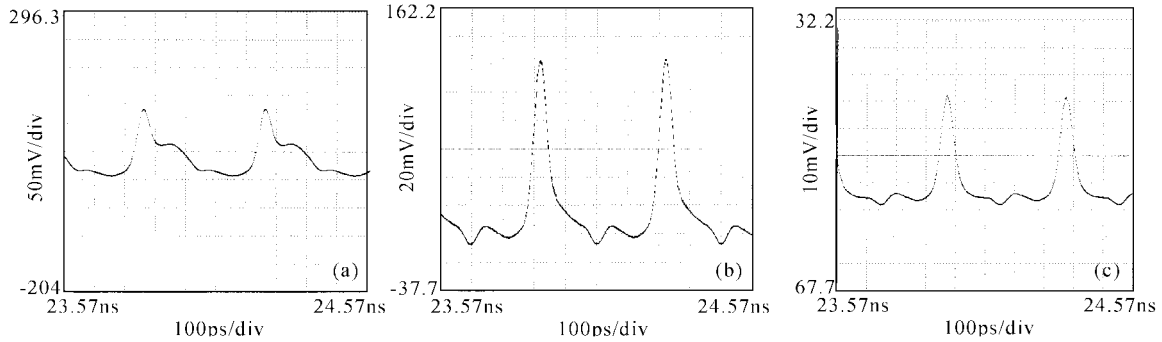


图 4 2.5 GHz 增益开关半导体激光器在不同偏置电流下的输出脉冲波形

Fig. 4 Output waveform from gain-switched semiconductor laser with 2.5 GHz repetition rate under the condition of different bias current

(a) $r_b = 2$; (b) $r_b = 1.6$; (c) $r_b = 1.1$

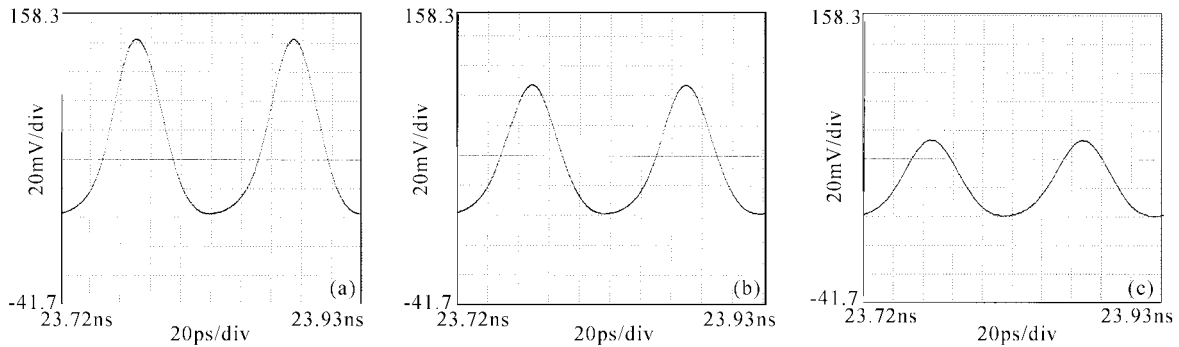


图 5 10 GHz 增益开关半导体激光器在不同偏置电流下的输出脉冲波形

Fig. 5 Output waveform from gain-switched semiconductor laser with 10 GHz repetition rate under the condition of different bias current

(a) $r_b = 3$; (b) $r_b = 2.4$; (c) $r_b = 2$

参 考 文 献

- 1 C. Lin, P. L. Liu, T. C. Damen *et al.*. Simple picosecond pulse generation scheme for injection lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(15):600~602
- 2 J. A. Yeung. Picosecond optical pulse generation at gigahertz rates by direct modulation of a semiconductor laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(5):308~310
- 3 C. Lin, C. A. Burrus, G. Eisenstein *et al.*. 11.2 GHz picosecond optical pulse generation in gain-switched short cavity InGaAsP injection lasers by high-frequency direct modulation [J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(6):238~240
- 4 N. Onodera, H. Ito, H. Inaba. Fourier-transform-limited single-mode picosecond optical pulse generation by a distributed feedback InGaAsP diode laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(8):843~845
- 5 G. Eisenstein, R. S. Tucker, G. Raybon. Optical time-division multiplexed transmission at 8 Gbit/s using single laser and semiconductor optical power amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(6):1034~1036
- 6 K. Suzuki, K. Iwatsuki, S. Nishi *et al.*. 160 Gbit/s sub-picosecond transform-limited pulse signal generation utilizing adiabatic soliton compression and optical time-division multiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(3):352~354
- 7 K. Iwatsuki, K. Suzuki, S. Nishi *et al.*. 60 Gb/s \times 2 ch time/polarization-multiplexed soliton transmission over 154 km utilizing an adiabatically compressed gain-switched DFB-LD pulse source [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(11):1377~1379
- 8 S. B. Alleston, P. Harper, I. S. Penketh *et al.*. 1000 km transmission of 40 Gbit/s single channel RZ data over dispersion managed standard (non-dispersion shifted) fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(10):823~824
- 9 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