

文章编号: 0258-7025(2005)03-0418-05

基于非线性放大环镜的全光开关特性研究

何慧茹, 元秀华*

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用掺铒光纤放大器(EDFA)和高非线性色散位移光纤(HNL-DSF)组成非线性放大环镜(NALM),利用掺铒光纤放大器的高增益系数和高非线性色散位移光纤的光学克尔效应构造全光开关,实现脉冲整形和消除干扰噪声。采用分布傅里叶法分析了高非线性色散位移光纤的群速度色散(GVD)对非线性放大环镜开关特性的影响,讨论了掺铒光纤放大器的增益系数、增益饱和特性以及耦合器的耦合比等因素的影响,研究了入射光为高斯脉冲的情况下,非线性放大环镜与入射光信号强度相关的放大滤波特性。通过优化非线性放大环镜的各项参数,可以在实现高开关效率的同时,降低对开关功率的要求,对峰值功率低于 1 mW 的超短脉冲进行 Tbit/s 量级的开关操作,从而适用于超高速大容量光通信系统中。

关键词 光通信;全光开关;非线性放大环镜;高非线性色散位移光纤;掺铒光纤放大器

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Analysis of the Characteristics of the All-Optical Switch Based on Nonlinear Amplifying Loop Mirror

HE Hui-ru, YUAN Xiu-hua

(Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A kind of all-optical switch, which is constructed by a nonlinear amplifying loop mirror (NALM) based on erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and high nonlinear dispersion shifted fiber (HNL-DSF), is presented. With the high gain coefficient of EDFA and the optical Kerr effect of HNL-DSF, this configuration can be used to shape the optical pulse and suppress the pedestal and noise. The effect of group velocity dispersion (GVD) of HNL-DSF on the switch characteristics of NALM is analyzed by split-step Fourier method. Meanwhile, the effects of the gain coefficient, the saturation of EDFA and the coupling ratio of optical coupler are discussed theoretically and numerically. NALM has intensity-dependent filtering character and the input power required to obtain nonlinear input-output relationship reduces to a low level. Through optimizing every parameter, a switching operation over 1 Tbit/s can be realized on the short pulse and the threshold value of the switch can be lower than 1 mW.

Key words optical communication; all-optical switch; nonlinear amplifying loop mirror; high nonlinear dispersion shifted fiber; erbium-doped fiber amplifier

1 引言

宽带网和全光网的飞速发展对信息传输容量和路由交换速率的要求越来越高。纵观近几年来通信系统的发展,波分复用、时分复用、码分复用等多种

复用方式有效结合的混合复用传输,已成为提升网络通信速率和容量的最具潜力的技术。如何对高速率信号进行整形和再生,消除多种复用方式引起的信道间干扰、码间干扰,是混合复用传输系统的关键

收稿日期:2003-12-30;收到修改稿日期:2004-05-11

基金项目:国家 863 计划(2002AA122035)资助项目。

作者简介:何慧茹(1981—),女,江西南昌人,华中科技大学光电子工程系硕士研究生,主要从事高速大容量光纤通信系统中光纤非线性效应的影响和作用研究。E-mail:huiruhe@163.com

* 通信联系人。E-mail: yuanxh@mail.hust.edu.cn

技术。可以由非线性放大环境(NALM)构造超快全光开关,利用其强度滤波特性实现光信号整形和消除干扰噪声^[1,2]。

非线性放大环境是对非线性光学环境(NOLM)^[3]的直接扩展。非线性光学环境首先由 N. J. Doran 等^[3]提出,它由一个耦合器和长度达数千米的光纤构成,结构简单,但对输入功率的要求十分高,而且过长的光纤使这种结构的环镜稳定性差。为了降低开关功率,减小环长,可在环镜中非对称地放置一个半导体光放大器(SOA),通过它的增益饱和效应,使相向传输的两束光波在环镜内运行一周再次到达耦合器时,具有不同的振幅和相位^[4,5]。半导体光放大器的引入使装置易于集成,并且开关功率降低至 1 mW,但是,半导体光放大器的非线性响应速度限制了它在超高速光通信中的应用。这种装置的速率取决于半导体光放大器的增益恢复时间,在恒定电流注入下,半导体光放大器载流子密度需要经过一段时间的弛豫才能达到未饱和时的状态,恢复时间依赖于半导体光放大器的自发载流子寿命。为了提高速率,可通过半导体制造工艺尽量减少载流子自发寿命,尽管如此,用常规方法实现高速开关仍然受到限制。

本文利用掺铒光纤放大器(EDFA)和高非线性色散位移光纤(HNL-DSF)构成非线性放大环境,这种环境是利用非线性光纤的克尔效应使相向传输的光波产生非线性相移,可以认为是近似瞬时效应(小于 10 fs)。而且利用掺铒光纤放大器放大高速超短脉冲时,放大器的增益色散可以忽略,光脉冲的输入输出频谱保持不变;前后光脉冲、光脉冲前后沿在掺铒光纤放大器中任一点对应的反转粒子数差的抖动可忽略,从而所获得的增益相同,放大光脉冲的波形也保持不变^[6]。因此,利用掺铒光纤放大器和高非线性色散位移光纤构成非线性放大环境,具有极高的响应速度,可用于 Tbit/s 量级超高速光通信中。

本文对该非线性放大环境的开关特性进行了研究,建立了理论模型,对各项关键参数对光信号的影响进行了理论分析和数值计算。

2 理论模型研究

2.1 理论模型

非线性放大环境的原理装置图如图 1 所示。掺铒光纤放大器放置在耦合器的其中一个输出端,对前向和后向的光波进行放大,掺铒光纤放大器的高

增益系数可以在很大程度上降低输入功率;在环内使用具有高非线性系数的高非线性色散位移光纤以减小环长。

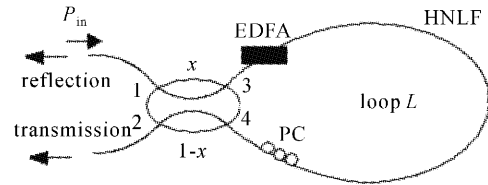


图 1 非线性放大环境原理装置图

Fig. 1 Schematic configuration of NALM

图 1 中,非线性放大环境中包含一个增益为 G 的双向掺铒光纤放大器,长度为 L 的高非线性色散位移光纤,一个功率耦合器(耦合比为 $x : (1-x)$) 和一个偏振控制器(PC)。掺铒光纤放大器靠近端口 3 放置,即位于不对称位置。光信号从端口 1 输入,分为两束光信号,分别从端口 3 和 4 开始在环境中按相反方向传播。在环镜中经过一周的传输,且光强均被掺铒光纤放大器放大后,由两束光波的相位差 $\Delta\phi$ 来决定从耦合器输出的光强分布。设输入为无啁啾高斯脉冲,脉冲表达式即为

$$A_0(t) = \sqrt{P_{in}} \exp[-t^2/(2T_0^2)], \quad (1)$$

其中 P_{in} 为峰值功率, T_0 为脉冲半宽(在光强度峰值的 $1/e$ 处)。

低功率短脉冲在非线性放大环境环内传输时,可以忽略两个反向传输的光波的交叉相位调制(XPM)对脉冲相位的影响。由于掺铒光纤放大器中掺铒光纤的长度只有数米,远小于色散长度和非线性长度,因此掺铒光纤放大器的作用是放大信号,不会引起时域和频域的变化;并且当耦合器的耦合比处于最佳值 0.5 时(将在 3.4 中予以讨论),耦合器的两个输出端口的光波功率相等,在掺铒光纤中传输时产生的非线性相移亦相等,不会引起相位差,在这种情况下,掺铒光纤中的非线性效应对非线性放大环境的开关特性没有影响。所以,在分析非线性放大环境的环长时,不考虑掺铒光纤的长度。

设 $A_3(z, t)$ 和 $A_4(z, t)$ 分别表示环内沿顺时针和逆时针方向传播的脉冲的振幅, z 为脉冲沿光纤传播的距离。则从端口 3 出射并经掺铒光纤放大器放大后的光场振幅为

$$A_3(0, t) = \sqrt{xG}A_0(t), \quad (2)$$

从端口 4 输出的光场振幅为

$$A_4(0, t) = i\sqrt{1-x}A_0(t). \quad (3)$$

对于 A_3 , 当入射脉冲的宽度大于 1 ps 时, 在非线形光纤中的传输方程可写为^[7]

$$\frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_3 + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_3}{\partial T^2} = i\gamma |A_3|^2 A_3, \quad (4)$$

式中 T 为随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - z/v_g$); β_2 (ps^2/km) 为二阶色散系数, 为群速度色散 (GVD) 参量; α ($1/\text{km}$) 为光纤损耗系数, 它与用分贝表示的损耗系数 α_{dB} (dB/km) 的关系为: $\alpha_{\text{dB}} = 4.343\alpha$; $\gamma = (n_2 \omega_0)/(cA_{\text{eff}})$ 为高非线性色散位移光纤的非线性系数, 与非线性折射率 n_2 及光纤有效芯径面积 A_{eff} 有关。

当不考虑群速度色散的影响时, 即令 $\beta_2 = 0$, 方程(4) 可以写为

$$\frac{\partial A_3}{\partial z} = i\gamma |A_3|^2 A_3 - \frac{\alpha}{2} A_3, \quad (5)$$

用 $A_3(z, t) = V_3 e^{-\alpha z/2} e^{i\phi_{3\text{spm}}}$ 作代换, 指数因子 $e^{-\alpha z/2}$ 代表光纤引起的损耗, $\phi_{3\text{spm}}$ 表示自相位调制 (SPM) 引起的相移。令方程(5) 两边的实部和虚部相等, 则有

$$\frac{\partial V_3}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \phi_{3\text{spm}}}{\partial z} = \gamma e^{-\alpha z} |V_3|^2, \quad (6)$$

则 A_3 在长度为 L 的非线性光纤中传输时自相位调制引起的相移

$$\phi_{3\text{spm}} = \int_0^L \gamma |V_3|^2 e^{-\alpha z} dz = \gamma |V_3|^2 \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} = \gamma |A_3(0, t)|^2 L_{\text{eff}}, \quad (7)$$

式中 $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ 为有效传输距离。

同理, A_4 在非线形光纤中传输时自相位调制引起的相移

$$\phi_{4\text{spm}} = \gamma |A_4(0, t)|^2 L_{\text{eff}}. \quad (8)$$

两光场在非线形放大环境环内传输一周到达耦合器后变为

$$A_3(L, t) = A_3(0, t) \exp(i\phi_0 + i\gamma |A_3|^2 L_{\text{eff}}), \quad (9)$$

$$A_4(L, t) = \sqrt{G} A_4(0, t) \exp(i\phi_0 + i\gamma |A_4|^2 L_{\text{eff}}), \quad (10)$$

式中 $\phi_0 = \beta L$ 为线性相移, β 为环内传输常数。

利用光纤耦合器的传输矩阵可以得到反射和透射的光场为

$$\begin{pmatrix} A_r \\ A_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x} \\ i\sqrt{1-x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3(L, t) \\ A_4(L, t) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

得到非线形放大环境的透射率 $T_{\text{NALM}} = |A_t|^2 / |A_0|^2$ 为

$$T_{\text{NALM}} = G \{1 - 2x(1-x)[1 + \cos(\Delta\phi)]\}, \quad (12)$$

两束光波的相位差

$$\Delta\phi = \gamma [(1-x) - xG] |A_0|^2 L_{\text{eff}}. \quad (13)$$

2.2 开关特性研究

由(12)式和(13)式可以看出, 只要满足 $\Delta\phi = (2m-1)\pi, m=0, 1, 2, \dots$, 自相位调制引起的相移就会使输入信号 100% 透射。实际中, 只用第一个透射峰作为开关, 此时所需要的功率最小。若 $x = 0.5$, 则开关功率为

$$P_{\text{in}} = 2\pi / [(G-1)\gamma L_{\text{eff}}], \quad (14)$$

可见掺铒光纤放大器的引入, 使非线形放大环境的开关功率仅为非线形光学环境开关功率的千分之一, 对峰值功率低于 1 mW 的脉冲实现了开关功能。

图 2 为非线形放大环境的放大滤波功能。假设输入为高斯脉冲, 并带有一些旁瓣, 脉冲半宽 $T_0 = 10$ ps, 峰值功率 $P_{\text{in}} = 0.3$ mW, 掺铒光纤放大器的增益系数 $G = 25$ dB, 耦合器耦合比为 0.5:0.5, 非线形放大环境环内高非线形色散位移光纤的长度 $L = 150$ m, 非线形系数 $\gamma = 21/(\text{W} \cdot \text{km})$, 损耗系数 $\alpha_{\text{dB}} = 0.59$ dB/km。从图 2 可以看到, 透射率 T_{NALM} 随着光功率的增加而增大, 脉冲的旁瓣被抑制。由此可知, 非线形放大环境可以放大功率较大的脉冲, 同时有效滤除脉冲基座及低功率噪声。

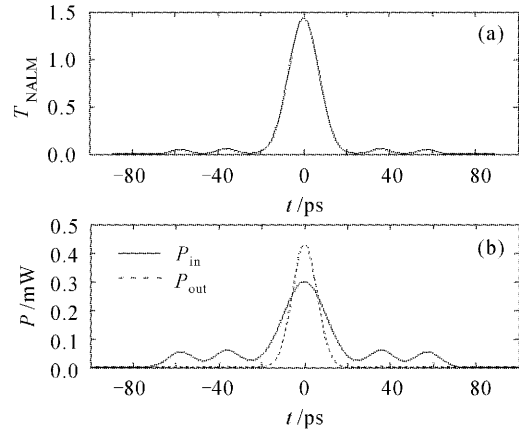


图 2 非线形放大环境的传输特性
(a) 非线形放大环境的透射率; (b) 输入与输出的比较
Fig. 2 Transmission characteristic of NALM
(a) transmissivity of NALM;
(b) input and output pulse comparison

3 关键参数对开关特性的影响分析

假设非线形放大环境环内高非线形色散位移光纤的长度 $L = 75$ m, 损耗系数 $\alpha_{\text{dB}} = 0.59$ dB/km, 二阶色散系数 $\beta_2 = 15.29$ ps²/km, $\gamma = 21/(\text{W} \cdot \text{km})$; 输入信号为高斯脉冲, 脉冲半宽为 $T_0 = 5$ ps, 脉冲重复频率为 40 GHz。

3.1 高非线性色散位移光纤的群速度色散对开关特性的影响

我们在分析非线性放大环境理论模型时忽略了高非线性色散位移光纤的群速度色散参量 β_2 的影响。光脉冲在高非线性色散位移光纤内传输时,色散和非线性将影响其形状^[8],这会对非线性放大环境的开关窗口产生影响。下面将讨论考虑 β_2 时光脉冲的传输特性。

方程(4)完整地描述了光场在光纤中的传输过程。定义归一化振幅

$$U = A(z, t) / \sqrt{P_0},$$

P_0 为入射脉冲的峰值功率,方程(4)可改写为

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}U - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + i\gamma P_0 |U|^2 U, \quad (15)$$

只要已知在光纤输入端的光信号归一化复振幅 $U(0, t)$, 通过求解方程(15) 就可得到输出端的振幅 $U(L, t)$ 。

方程(15)是非线性偏微分方程,在一般情况下不适于解析求解,除非是在能使用逆散射方法等某些特殊情况下才有可能^[9]。为阐明光纤的群速度色散的影响,采用分步傅里叶法对方程求数值解^[7]。

假设 $P_0 = 3 \text{ mW}$, 输入的高斯脉冲归一化振幅为

$$U(0, t) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right].$$

首先忽略群速度色散效应,对方程(15)求解;将其结果作为初始条件,再对忽略自相位调制效应下的方程求解。计算结果用图表的方式给出,图3给出了每隔 200 m 脉冲的波形变化。可以看出脉冲在高非线性色散位移光纤中传播时,群速度色散和自相位调制的共同影响使脉冲波形发生展宽,但由于构造非线性放大环境所需的高非线性色散位移光纤长度仅为几十米,脉冲展宽很小,只是功率发生了

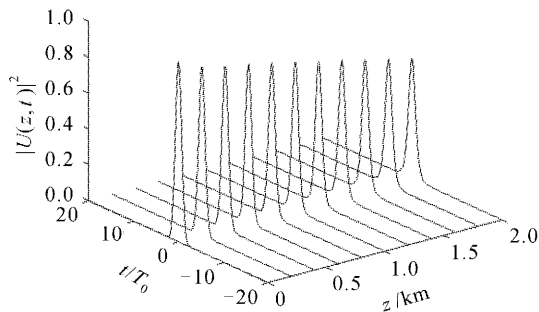


图3 脉冲在高非线性色散位移光纤中传输的波形变化
Fig. 3 Evolution of the shape for the pulse transmitted in the HNL-DSF

衰减,对非线性放大环境的开关特性不会产生很大的影响。经过上述讨论,我们在分析非线性放大环境的理论模型时,忽略高非线性色散位移光纤的群速度色散参量 β_2 是合理的。

3.2 掺铒光纤放大器增益饱和对开关特性的影响

当掺铒光纤放大器的入射光信号为短脉冲序列时,增益饱和和由信号的平均功率决定,放大器增益不因脉冲而变化,掺铒光纤放大器的增益可以表示为^[10]

$$G = G_0 \exp[(1 - G)P_i/P_s], \quad (16)$$

其中 G_0 为小信号增益, P_i 为掺铒光纤放大器的输入信号功率(这里是指非线性放大环境中反向传输的两束光波的平均功率之和), P_s 为饱和信号功率(增益系数下降到一半时的信号功率)。

设 $x = 0.5$, 图4给出了当 $G_0 = 25 \text{ dB}$, $P_s = 10 \text{ mW}$, 20 mW , 35 mW 时非线性放大环境的透射率和输入功率的关系。可以看到,透射率 T 随着 P_s 的改变发生显著的变化。当 P_i 很小时 ($P_i \ll P_s$), 掺铒光纤放大器的增益保持恒定,相位差 $\Delta\phi$ 与 P_i 呈线性关系, T_{NALM} 可以达到很大的值。当 P_i 可与 P_s 相比较时,掺铒光纤放大器的增益 G 逐渐减小,使得 $\Delta\phi$ 的变化趋势也随之相应减小, T_{NALM} 的极值亦减小。当 P_i 足够大时,掺铒光纤放大器达到深度饱和,此时 T_{NALM} 十分小。可以看出,掺铒光纤放大器的饱和增益使非线性放大环境避免了周期性的完全反射,只放大透射一定功率范围内的信号,而将其他信号反射,这是与普通非线性光学环境的不同之处。可以通过选择 P_s 来控制非线性放大环境的开关窗口。

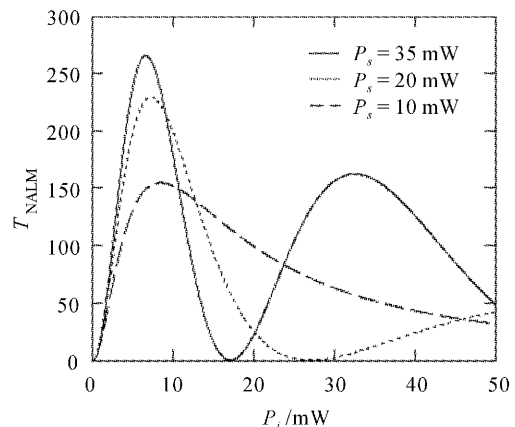


图4 不同的 P_s 下 T_{NALM} 与 P_i 的关系

Fig. 4 Relationship between the transmissivity of NALM and P_i under different P_s

图5给出了 $P_s = 20 \text{ mW}$ 时,不同 G_0 下非线性

放大环境的透射率随输入功率的变化。可以看出, G_0 的增加使非线性放大环境的开关功率降低, 第一开关窗口也变窄。

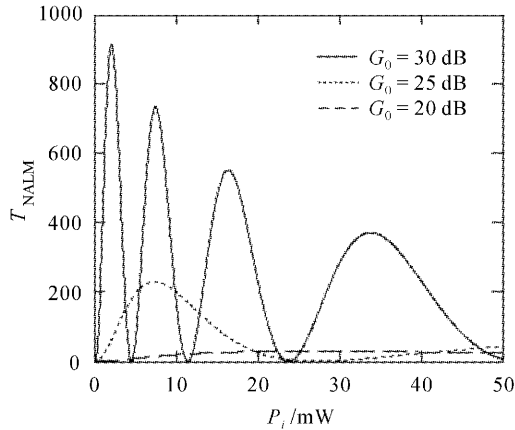


图 5 不同 G_0 下 T_{NALM} 与 P_i 的关系

Fig. 5 Relationship between the transmissivity of NALM and P_i under different G_0

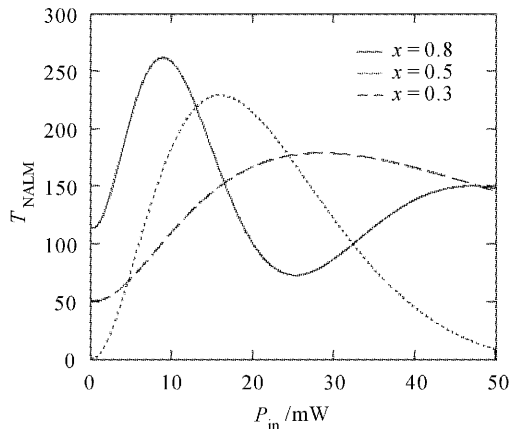


图 6 不同 x 下 T_{NALM} 和 P_{in} 的关系

Fig. 6 Relationship between transmissivity of NALM and P_{in} under different x

3.3 耦合器耦合比 x 对开关特性的影响

耦合器的耦合比不同, 会使非线性放大环境表现出不同的开关特性。设掺铒光纤放大器的 $G_0 = 25$ dB, $P_s = 20$ mW, 图 6 给出了 $x = 0.3, 0.5, 0.8$ 时非线性放大环境的透射率 T_{NALM} 与输入光信号峰值功率 P_{in} 的关系。结果显示, 当耦合分光比不为 $0.5 : 0.5$ 时, T_{NALM} 不可能有零值, 这会导致非线性放大环境的开关性能恶化。同时, 随着耦合比的升高, 非线性放大环境的开关阈值降低, 开关窗口变窄。在实际应用中, 为了确保非线性放大环境达到最佳消光比, 应当选择耦合比为 0.5 的耦合器。

4 结 论

从以上的分析和数值结果可以得出: 1) 由于光纤内的克尔效应可认为是近似瞬时效应, 所以采用非线性放大环境的开关效应和高非线性色散位移光纤内的自相位调制效应具有极高的开关速度, 可用于 Tbit/s 量级超高速光传输系统中; 2) 使用具有高非线性系数的高非线性色散位移光纤构成环境, 可以将环长减小到 100 m 以下, 降低了光纤的衰减及群速度色散对脉冲传输的影响; 3) 在非线性光学环境中引入掺铒光纤放大器可以减小对输入信号的功率要求, 掺铒光纤放大器的增益饱和现象使得非线性放大环境的传输特性与非线性光学环境大不相同; 4) 耦合器的耦合比 $x \neq 0.5$ 将导致环境的消光比恶化。

参 考 文 献

- 1 K. Smith, E. J. Greer, N. J. Doran. Square pulse amplification using nonlinear loop mirror incorporating saturable gain [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(22):2046~2048
- 2 E. Yamada, M. Nakazawa. Reduction of amplified spontaneous emission from a transmitted soliton signal using a nonlinear amplifying loop mirror and a nonlinear optical loop mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8):1842~1850
- 3 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1):56~58
- 4 M. Eiselt, W. Pieper, G. Großkopf *et al.*. One million pulse circulations in a fiber ring using a SLALOM for pulse shaping and noise reduction [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **4**(4):422~424
- 5 Wu Zhilin, Yao Minyu, Gao Yizhi *et al.*. 4×2.5 GHz OTDM demultiplexing using SLALOM [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1):77~80
吴之林, 姚敏玉, 高以智 等. 利用半导体光放大器环路镜实现 4×2.5 GHz OTDM 解复用[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1):77~80
- 6 Mao Qinghe, Yu Hong, Yang Xianglin. Study on amplification of highspeed picosecond laser diode pulse in EDFA [J]. *Research & Progress of SSE*, 1997, **17**(4):409~413
毛庆和, 于虹, 杨祥林. 掺铒光纤放大器放大高速 ps 半导体激光脉冲的研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 1997, **17**(4):409~413
- 7 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 21~36
G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 21~36
- 8 Lian He, Tan Weihai. Supercontinuum of high intensity ultrashort laser pulse in nonlinear medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(3):192~196
连合, 谭维翰. 强激光超短脉冲在非线性介质中传输引起的超加宽[J]. *中国激光*, 1991, **18**(3):192~196
- 9 D. Anderson, M. Lisak, A. Berntson. A variational approach to nonlinear evolution equations in optics [J]. *Pramana-J. Phys.*, 2001, **57**(5&6):917~936
- 10 A. E. Siegman. *Lasers* [M]. Sausalito, California: University Science Books: Oxford. Univ. Press, 1986. 297~299