

文章编号:1004-4213(2010)04-0684-5

## 基于 SOA 器件的色散补偿系统\*

贾大功<sup>a</sup>, 韩丁<sup>a</sup>, 张学敏<sup>a</sup>, 李岩<sup>a</sup>, 张红霞<sup>a</sup>, 于晋龙<sup>b</sup>, 张以谟<sup>a</sup>

(天津大学 a. 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室; b. 电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:**基于半导体光放大器非线性效应提出一种连续可调谐的色度色散补偿方法. 利用 SOA 的交叉相位调制效应, 对 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s RZ 码系统的补偿效果和补偿范围进行了仿真分析. 分析结果表明, 该方法在 10 Gbit/s 传输系统中, 可以实现补偿范围为 400 ps/nm 的正负色散. 在 40 Gbit/s 传输系统中, 可以实现补偿范围为 40 ps/nm 的正负色散. 在理论分析基础上, 进行了 10 Gbit/s 传输系统下连续动态色度色散补偿实验. 实验结果表明, 该方法实现了 -40~60 ps/nm 范围内色度色散的连续可调谐补偿.

**关键词:**动态色散; 色散补偿; 高速传输系统; 半导体光放大器; 交叉相位调制

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103904.0684

### 0 前言

随着光纤通信技术的发展, 单信道光传输速率也随之飞速发展. 目前, 单信道传输速率已经由 10Gbit/s 向 40Gbit/s, 甚至更高速率转化<sup>[1]</sup>. 众所周知, 色散引起光脉冲展宽, 是光纤通信系统中影响长距离光传输速率的因素之一. 通常, 光通信系统的色散容量会随着系统传输速率的增加而急剧降低, 如 40 Gb/s 光通信系统中, 系统的色散容限约为 50~100 ps/nm, 是 10 Gb/s 系统的 1/16<sup>[2]</sup>. 当系统中光交换路径、温度、频率漂移等因素变化时, 将引起系统的色散发生变化, 这时这部分系统固定补偿后残余的色散很容易就突破系统的色散容限, 从而对系统性能造成严重破坏. 因此, 为了保证高速通信系统的信号传输质量, 必须对系统的残余色散进行检测和补偿, 也就是需要一种动态色散补偿技术来消除残余色散的影响<sup>[3-5]</sup>. 本文提出一种动态可调谐色散补偿技术, 能够实现高速光通信系统中残余色散补偿. 该技术利用半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) 的交叉增益调制效应引入一定啁啾量, 再通过固定长度色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF) 对 40 Gbit/s RZ 码系统进行残余色散补偿.

### 1 系统原理

SOA 作为光放大器<sup>[6]</sup> 可用作短距离线路/中继放大器, 但 SOA 在使用过程中易产生非线性效应, 所以在线性放大方面应用不如掺饵光纤放大器 (Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA). 不过, SOA 作为非线性器件, 它可以提供强非线性效应, 具有处理高速光信号的能力<sup>[7]</sup>. 由于光纤中 CD 的存在使得通过的光信号产生正啁啾或负啁啾. 由于 SOA 具有交叉增益调制 (Cross Gain Modulation, XPM) 效应, 两束光入射到 SOA 中时, 会引起各光波传输相位的变化, 也就是会产生一个附加的啁啾变化量, 当该变化量与 CD 引起的啁啾量性质相反, 数量相等时, 便可实现光纤中 CD 的动态补偿.

当两路光同时入射到 SOA 器件中, 由于 SOA 器件的交叉相位调制效应引起信号光产生啁啾, 其公式表示为

$$\Delta v_c = \frac{\beta_c}{4\pi} \frac{dh(T)}{dT} \quad (1)$$

式中  $\beta_c$  是线宽增强因子,  $h(T)$  是积分增益. 同时由增益系数方程

$$\frac{\partial g(z, t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z, t)}{\tau_c} - \frac{g(z, t)}{E_{\text{sat}}} \sum_{i=1,2} P_i(z, t) \quad (2)$$

式中  $g_0$  为小信号增益,  $E_{\text{sat}}$  为饱和能量,  $g(z, t)$  为增益系数,  $\tau_c$  为载流子寿命,  $P_i$  为输入光信号的功率函数,  $i=1, 2$  分别对应输入信号光脉冲和时钟光脉冲.

通过式(2)可以求得输入信号光脉冲和时钟光脉冲之间的关系, 可表示为

$$P_{\text{out}i}(t) = P_{\text{in}i}(t) \exp[h(t)] \quad (3)$$

\*国家自然科学基金(60577013)、天津市自然科学基金(09JCYBJC01300)和深圳市传感器技术重点实验室开放基金(SST200909)资助

Tel: 022-27403147

Email: dagongjia@tju.edu.cn

收稿日期: 2009-05-11

修回日期: 2009-11-11

$$\phi_{\text{out}}(z, t) = \phi_{\text{in}}(0, t) - \frac{1}{2}\beta_c h(z, t) \quad (4)$$

由式(3)和(4)可以知道,当输入光信号的功率和积分增益变化时,会引起输出光信号的相位变化.同时,由式(1)也知道,这时信号的啁啾也发生变化.由于对于一个 SOA 来说,  $\beta_c$  是一个固定值,因此通过调节  $h(T)$  就能使得信号光的啁啾随之变化,由于  $h(T)$  与输入光能量有关,所以调节注入电流和时钟光功率便可实现光信号啁啾的调节.为了更好地分析 SOA 增益变化引起的信号光啁啾变化情况,本文分析了 CD、SOA 注入电流和时钟光功率与信号光啁啾之间的关系,见图 1.

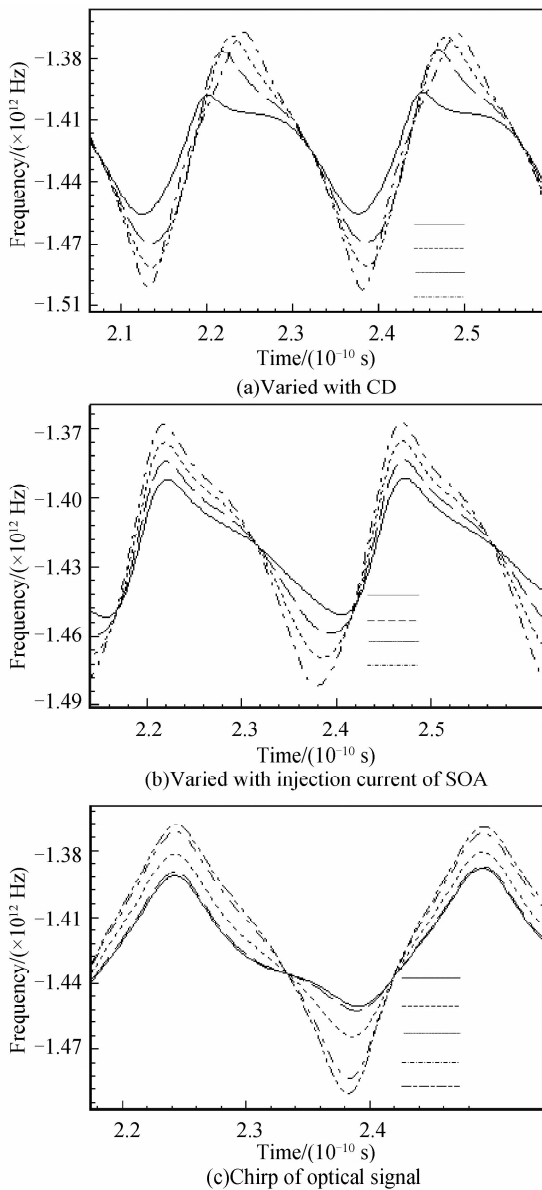


图 1 信号光啁啾的变化情况  
Fig. 1 Chirp of optical signal

从图 1(a)中,可以看到随着 CD 值的增加,负啁啾增大,正啁啾变化很小,这是由于受正 CD 影响的光脉冲本身带有负啁啾,且随 CD 的增大而增大.图 1(b)表示 SOA 的注入电流对信号光信号啁啾之间

的影响,从图中可了解到随着注入电流的增大,正啁啾和负啁啾均变大.图 1(c)为输入时钟光功率分别取  $-30$  dBm、 $-20$  dBm、 $-10$  dBm、 $0$  dBm 和  $10$  dBm 时的啁啾曲线.从图中看出,当时钟功率很大或很小时信号光脉冲啁啾几乎不受时钟功率变化的影响,这是由于时钟功率很小或很小时,SOA 的载流子浓度变化很小.因此,通过调节注入时钟光功率能够实现输出信号脉冲啁啾的变化,但其调节范围有限,且注入时钟功率大于一定的阈值后,再加大功率对啁啾的改变影响变小.

通过图 1 的关系曲线,可以看到通过调节 SOA 注入电流和时钟光功率使得输出光信号的啁啾发生了变化,使得输出脉冲的脉宽达到最窄,从而实现传输系统中 CD 补偿.

## 2 试验结果及分析

基于 SOA 的 XPM 效应对  $40$  Gbit/s 高速传输系统连续可调 CD 补偿原理如图 2.

图 2 中,DCF<sub>1</sub> 用于调整系统输入 CD 补偿的相对范围,DCF<sub>2</sub> 用于补偿 SOA 引入的负啁啾,衰减器用于调节时钟信号的光功率,窄带光滤波器 OBPF 用于滤除 SOA 输出信号中的时钟光.

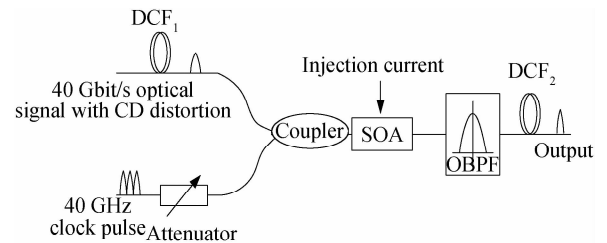


图 2 基于 XPM 效应的连续可调 CD 补偿原理框图  
Fig. 2 Schematic diagram of dynamical CD compensation based on XPM

为了分析连续可调 CD 补偿方案在  $40$  Gbit/s 中的补偿范围和补偿效果,利用仿真软件对  $10$  Gbit/s 和  $40$  Gbit/s 高速传输系统进行了仿真.图 3 为  $10$  Gbit/s 系统下补偿前后 Q 值随 CD 变化

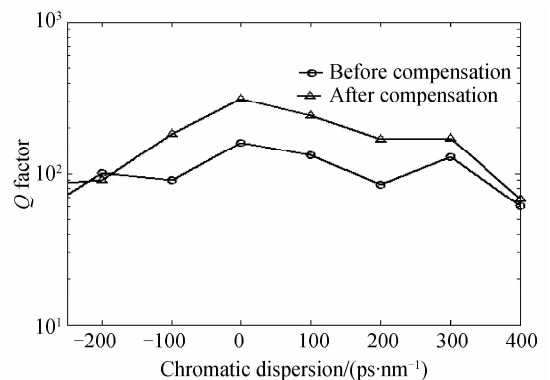


图 3 补偿前后 Q 值变化情况  
Fig. 3 Change of value Q before and after compensation in  $10$  Gbit/s

情况.从图 3 中看出,CD 在  $-100\sim 300$  ps/nm 范围内补偿系统能够有效提高 Q 值.图 4 为 CD 300 ps/nm 时补偿前后眼图变化情况.从图 4 中看出,补偿后脉冲被充分压窄,补偿后的脉宽远小于初始脉冲宽度,有效改善了通信系统性能.经过分析可以知道,本文提出的补偿方案能实现的 CD 补偿范围为 400 ps/nm 的正负色散.

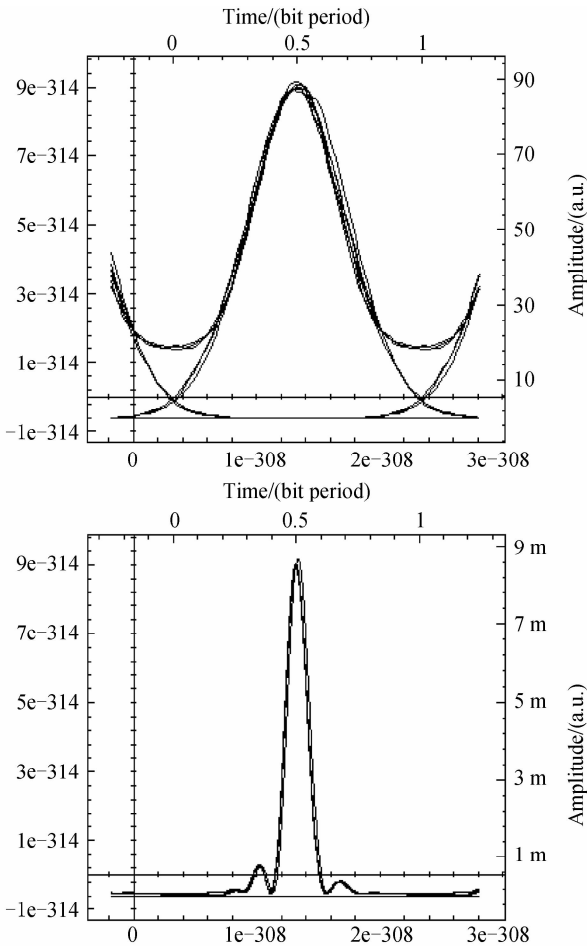


图 4 CD=300 ps/nm 时补偿前后眼图变化  
Fig. 4 Change of eye diagram before and after compensation in 10 Gbit/s

当传输速率为 40 Gbit/s 时,其 CD 补偿前系统的 Q 值变化见图 5.从图 5 中可以了解到,该补偿方

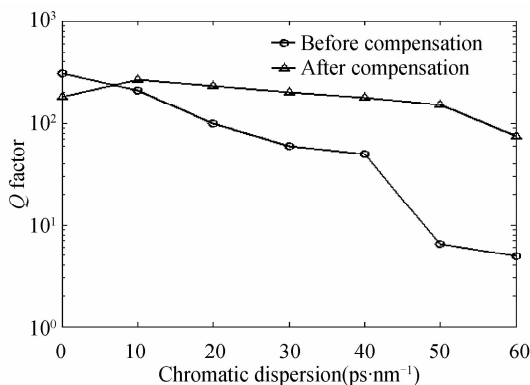


图 5 补偿前后 Q 值变化情况  
Fig. 5 Change of value Q before and after compensation in 40 Gbit/s

案有效提高了系统的 Q 值,且在  $CD_{SMF} = 0\sim 40$  ps/nm 范围内,补偿后系统的 Q 值大于 170,且比较稳定.当  $CD=40$  ps/nm 时 40 Gbit/s 系统补偿前后信号脉冲眼图变化情况如图 6.从图中看出,当  $CD=40$  ps/nm 时,受 CD 恶化的波形能够被有效的补偿.同样,分析结构表明基于 SOA 的 XPM 效应的 CD 补偿方案在 40 Gbit/s 速率下可以实现补偿范围为 40ps/nm 的正负色散,完全可以用于补偿 DCF+光开关的离散 CD 补偿方案的残余色散.

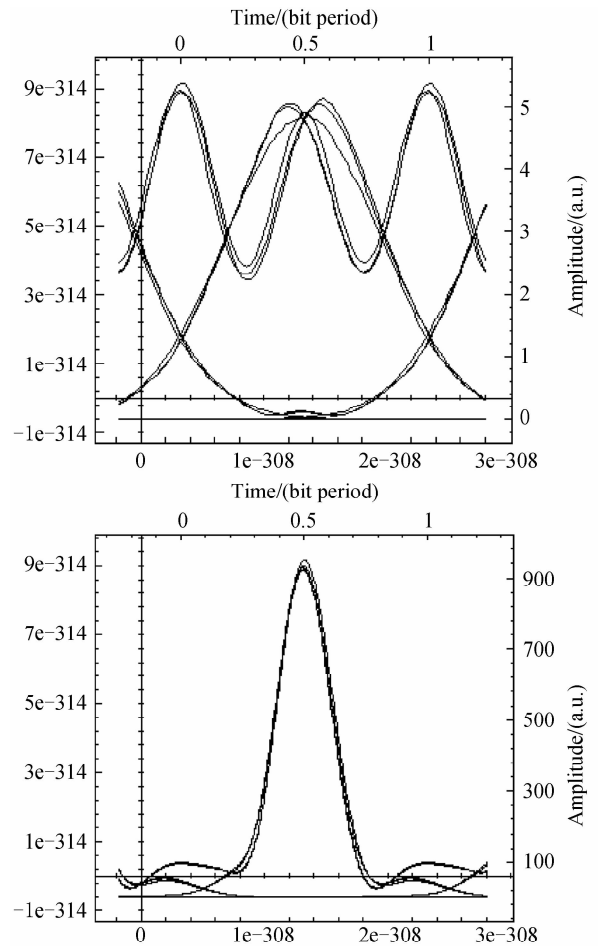


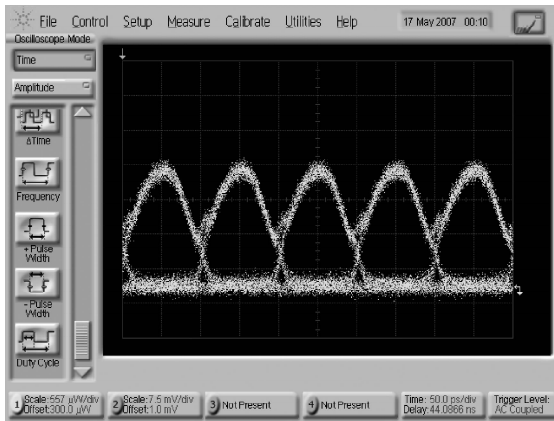
图 6 高速系统 CD 补偿前后信号脉冲眼图变化情况  
Fig. 6 Change of eye diagram before and after compensation in 40 Gbit/s

在前文分析的基础上,建立基于 SOA 的 XPM 效应的连续可调节 CD 补偿实验系统,限于实验条件,只进行 10 Gbit/s 传输速率下的 CD 补偿实验.实验过程中 SOA 注入电流的调节范围在  $50\sim 250$  mA,注入时钟功率的调节范围在  $-20\sim 5$  dBm,输入信号光功率为  $-5$  dBm.通过单模光纤和色散补偿光纤引入的 CD 在  $-60\sim 60$  ps/nm 范围内.

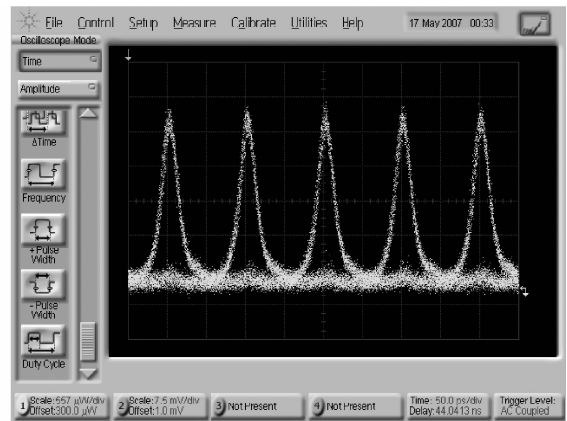
图 7 给出了 10 Gbit/s 传输系统下信号恶化和补偿效果波形图.其中图 7(a)和(b)是系统引入 60 ps/nm 正色散时输出光信号恶化的波形和利用 SOA 补偿后系统的波形,此时 SOA 注入电流为 220 mA,注入时钟功率为  $-5$  dBm.图 7(c)和(d)是

系统引入  $-40$  ps/nm 负色散时输出光信号恶化的波形和利用 SOA 补偿后系统的波形,此时 SOA 注

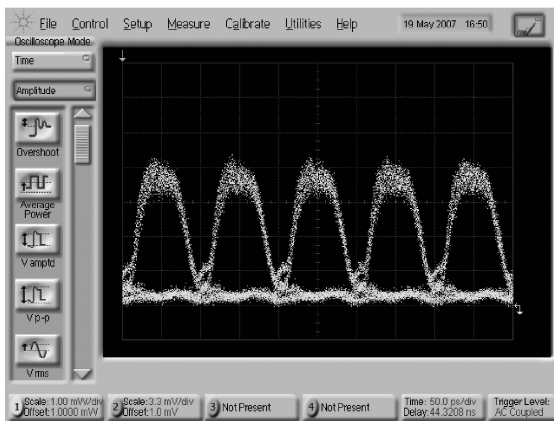
入电流为  $250$  mA,注入时钟功率为  $3$  dBm.



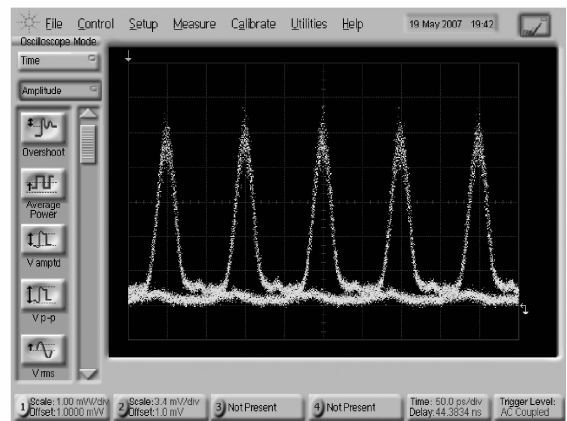
(a) Eye diagram with  $60$  ps/nm



(b) Eye diagram after compensation



(c) Eye diagram with  $-40$  ps/nm



(d) Eye diagram after compensation

图 7 补偿效果

Fig. 7 Eye diagrams of CD compensation

通过上述实验可知,整个补偿系统实现了  $-40 \sim 60$  ps/nm 范围内 CD 恶化波形的连续动态补偿,恢复了信号的原始波形.与仿真结果相比,CD 补偿范围降低,主要由于在光源中引入了啁啾,加快了 CD 恶化速度,同时光源中使用的调制器也引入部分非线性,使得 CD 补偿范围降低.通过实验还知道,增加时钟光功率和注入电流  $I$  会加大 SOA 引入的啁啾,从而实现高速系统下动态可调谐 CD 补偿<sup>[5]</sup>,即实现对残余色散的实时补偿.

### 3 结论

本文利用 SOA 的 XPM 效应和固定长度 DCF 对高速传输系统的 CD 进行连续动态补偿.仿真分析了  $40$  Gbit/s 和  $10$  Gbit/s 系统中 CD 补偿前后系统补偿方法范围和效果.在理论分析的基础上进行了  $10$  Gbit/s 系统中基于 SOA 的 XPM 效应的连续动态 CD 补偿实验,实验结果表明:该补偿系统实现了  $-40 \sim 60$  ps/nm 范围内 CD 连续动态补偿,补偿效果明显,但是由于光源中引入啁啾,使得 CD 补偿范围降低.

### 参考文献

- [1] HE Feng. Application of 40Gbit/s optical transmission systems[J]. *Guangdong Communication Technology*, 2005, **25** (11): 43-45.  
何锋. 浅议 40 Gbit/s 光传输系统的应用[J]. *广东通信技术*, 2005, **25**(11): 43-45.
- [2] CHEN Ming, ZHANG Ye-jin, HE Li-na, *et al.* Chromatic dispersion monitoring method based on frequency-shift of SOA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 544-547.  
陈明, 张冶金, 贺丽娜, 等. 基于半导体光放大器频移的色散监测方法研究[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(4): 544-547.
- [3] CHEN Min, HE Li-na, YANG Si-gang, *et al.* Chromatic dispersion and PMD monitoring and compensation techniques studies in optical communication systems with single channel speed 40 Gbit/s and CSRZ format [J]. *Opt Express*, 2007, **15** (12): 7667-7676.
- [4] CHEN Ming-hua, SHI Ying, QIU Ci-yuan, *et al.* Residual chromatic-dispersion monitoring and dynamic compensation in 40-Gb/s systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2007, **19**(15): 1142-1144.
- [5] ZHANG Li-tai, YU Jin-long, LI Yan, *et al.* Tunable chromatic dispersion compensation using chirp control based on XPM in a SOA [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1463-1466.  
张立台, 于晋龙, 李岩, 等. 基于 SOA 啁啾管理的连续可调谐色度色散补偿的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(11): 1463-1466.

- [6] LI Bao-hai, WU Chong-qing, FU Song-nian, *et al.* Advances in research of SOA and new applications [J]. *Optical Communication Technology*, 2004(04):18-21.  
李保海, 吴重庆, 付松年, 等. 半导体光放大器的研究进展与新应用[J]. 光通信技术, 2004(04):18-21.
- [7] WU Chong-qing. Interaction of two light beams in semiconductor optical amplification and applications in all-optical signal processing[J]. *Physics*, 2007, **36**(8):631-636.  
吴重庆. 半导体光放大器的光-光互作用及其应用[J]. 物理, 2007, **36**(8):631-636.

## Chromatic Dispersion Compensation Based on SOA

JIA Da-gong<sup>a</sup>, HAN Ding<sup>a</sup>, ZHANG Xue-min<sup>a</sup>, LI Yan<sup>a</sup>,  
ZHANG Hong-xia<sup>a</sup>, YU Jin-long<sup>b</sup>, ZHANG Yi-mo<sup>a</sup>

(a. *Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering;*

b. *College of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** A new tunable chromatic dispersion (CD) compensating method is presented based on the nonlinear effect of semiconductor optical amplifier (SOA). The compensation effect and range of dynamical chromatic dispersion is simulated and analyzed using the XPM of SOA on the 10 Gbit/s and 40 Gbit/s RZ code systems. The analyzing results indicate that its compensating range can reach 400 ps/nm in the 10 Gbit/s transmitting system and 40 ps/nm in the 40 Gbit/s transmitting system. The experiment of dynamical chromatic dispersion compensation is conducted in the 10 Gbit/s transmitting system on the basis of the analytical results. The experimental result shows that the dispersion compensating range of  $-40\sim 60$  ps/nm is realized.

**Key words:** Dynamic chromatic dispersion; Dispersion compensation; High-bit-rate optical transmission system; Semiconductor optical amplifier; Cross-phase modulation (XPM)



**JIA Da-gong** was born in 1972, and received his Ph. D. degree in optical engineering in 2004 from Tianjin University. He works as an associate professor, and his research interests focus on optical interconnection, optical communications, fiber sensing, and opto-electrical detecting technology.