

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0181-05

# 基于硅光波导四波混频的色散监测技术

宋牟平 邹良港

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 光性能监测是实现可重配置波分复用光网络的一个关键技术。随着光通信速度从 10 Gb/s 提升到 40 Gb/s 甚至以上,对光通道残余色散的容忍度下降到原来的 1/16 甚至以下,需要对光通道的色散进行实时监测。利用非线性波导器件可进行全光域色散监测,硅光波导具有较强的非线性特性,其非线性折射率系数可达  $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。当受光网络色散作用的信号光和探测光一起通过硅波导时,将产生四波混频非线性效应,光通道中不同色散值会产生不同程度的四波混频效应,通过测量由四波混频效应产生的光谱变化结果,可对波分复用光网络的色散进行监测。采用损耗系数为 0.2 dB/cm,长度为 3 cm 的硅波导,模拟研究结果表明色散监测范围可达  $\pm 40 \text{ ps/nm}$ ,从而可以实现光网络色散的芯片级监测。

**关键词** 光通信;色散监测;硅光波导;四波混频

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0181

## Chromatic Dispersion Monitoring Based on Four Wave Mixing in Silicon Optical Waveguides

Song Muping Zou Lianggang

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Optical performance monitoring (OPM) is one of the key techniques of the reconfigurable wavelength-division-multiplexing (WDM) optical networks. When the optical communication speed rises from 10 to 40 Gb/s and above, the residual chromatic dispersion (CD) tolerance of the optical channel is only 1/16 of the former 10 Gb/s system. So CD monitoring is the critical technique for WDM optical channels. Integration and all-optical domain can be achieved when using the nonlinear effects of optical waveguides to realize CD monitoring. Silicon optical waveguides have the relatively large nonlinearity with the nonlinear refractive index as  $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ . After going through the WDM network with CD effects, the signal light wave has the four wave mixing (FWM) effect with the probe light in the silicon waveguide. This FWM effect induces changes in the output spectrum, and different dispersions of the optical channel lead to the varied effects of FWM. So, when detecting the different spectrum changes relates to FWM, the optical channel CD can be monitored. In this paper a 3 cm silicon optical waveguide is adopted with the loss index of 0.2 dB/cm. The monitoring dispersion range can be  $\pm 40 \text{ ps/nm}$ . The results indicate that this OPM technique can be used to monitor the CD of the optical network on chip level.

**Key words** optical communications; dispersion monitoring; silicon optical waveguide; four wave mixing

## 1 引 言

随着光通信技术的不断发展和网络通信的持续增长,基于点到点的光通信系统正转变为可重配置的波分复用(WDM)智能光网络<sup>[1]</sup>,相应的光通信传输速率和容量都有很大程度的提高。但随着传输距离的增大和网络路由的变化,端到端光通道中的

色散(CD)和非线性效应等不仅累积而且随时间和环境的改变而改变,对高速光信号通信的影响将变得越来越明显,如 40 Gb/s 系统的色散容限仅仅是 10 Gb/s 系统的 1/16<sup>[2]</sup>。因此,对于高速智能 WDM 光网络,光性能监测(OPM)<sup>[1,3]</sup>是必不可少的,其中色散是光通信系统中影响光性能的一个重

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-06-03

作者简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事新型光子器件及光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

要因素,对色散进行实时监测具有重要的现实意义。

光网络虽可对光通道中的色散进行分段光纤色散补偿,但仍会有残余色散,且随着传输距离的加大,残余色散不断累积,最终影响信号质量。现有的色散监测技术主要方案有:射频时钟信号分析色散监测技术<sup>[4]</sup>、基于异步光取样和柱状图统计分析的色散监测技术<sup>[5]</sup>、副载波调制色散监测技术<sup>[6]</sup>、基于双光子吸收的监测技术以及利用自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等非线性效应<sup>[7~10]</sup>的监测技术。利用光器件或光波导的非线性效应进行色散监测不仅可以实现全光域 OPM,而且可以达到微型化集成化。

随着硅集成电路加工工艺的进步,以及用户对通信带宽要求的不断提高,基于成熟集成电路加工工艺的硅光子器件正成为研究热点<sup>[11,12]</sup>。采用硅基绝缘(SOI)晶片,以 Si (折射率  $n \approx 3.45$ ) 作为芯层,  $\text{SiO}_2$  (折射率  $n \approx 1.45$ ) 作为包层,可制作出高光折射率差的硅光波导。在光通信波长窗口,硅具有杰出的线性和非线性光学性能<sup>[13]</sup>:其光损耗可达 1 dB/cm 以下,模式场有效面积在  $1 \mu\text{m}^2$  以下,光克尔(Kerr)效应是普通光纤的 100 倍。本文利用硅光波导的四波混频效应进行色散监测,研究结果表明此技术不仅可以实现对光通信网络残余色散的监测,还有助于实现光性能监测的芯片级集成化。

## 2 原 理

### 2.1 硅光波导的四波混频效应

硅光波导和光纤都具有四波混频非线性效应。当信号光和探测光一起通过光传输介质时,通过四波混频非线性作用产生新频率光,使得输出光频谱产生变化。假定输入光传输介质的信号光角频率为  $\omega_s$ ,探测光角频率为  $\omega_p$ ,则四波混频<sup>[14,15]</sup>产生新的两束光波的角频率分别为

$$\omega_c = 2\omega_p - \omega_s, \quad (1)$$

$$\omega_{\text{sat}} = 2\omega_s - \omega_p. \quad (2)$$

这里取  $\omega_p > \omega_s$ ,  $\omega_c$  对应的光波称为反斯托克斯光,  $\omega_{\text{sat}}$  对应的光波称为斯托克斯光。

要在光传输介质中产生有效的四波混频作用,信号光、探测光、反斯托克斯光和斯托克斯光必须满足相位匹配条件,即

$$\Delta k = (\bar{n}_c \omega_c + \bar{n}_{\text{sat}} \omega_{\text{sat}} - \bar{n}_s \omega_s - \bar{n}_p \omega_p) / c = 0, \quad (3)$$

式中  $\Delta k$  为波矢失配量,折射率  $\bar{n}_s, \bar{n}_p, \bar{n}_c, \bar{n}_{\text{sat}}$  表示光纤模式下的四种光对应的有效折射率,  $c$  为光速。由于硅光波导具有较大的非线性系数,较短的波导

(厘米量级)就可产生所需的非线性作用,因此可忽略相位匹配条件的限制。

硅光波导中产生的四波混频过程可以描述为<sup>[14,15]</sup>

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_s - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + i\gamma A_p^2 A_c^* + 2i\gamma A_p A_{\text{sat}} A_s^*, \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_p - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + i\gamma A_s^2 A_{\text{sat}}^* + 2i\gamma A_s A_c A_p^*, \quad (5)$$

$$\frac{\partial A_c}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_c - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} + i\gamma A_p^2 A_s^* + 2i\gamma A_p A_s A_{\text{sat}}^*, \quad (6)$$

$$\frac{\partial A_{\text{sat}}}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_{\text{sat}} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{\text{sat}}}{\partial t^2} + i\gamma A_s^2 A_p^* + 2i\gamma A_s A_p A_c^*, \quad (7)$$

式中  $A_s$  表示信号光幅度,  $A_p$  表示探测光幅度,  $A_c$  表示由四波混频效应产生的反斯托克斯光幅度,  $A_{\text{sat}}$  表示斯托克斯光幅度;  $\beta_2$  为二阶色散系数,  $\alpha$  为损耗系数,  $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$  为非线性系数,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $\omega_0$  为中心角频率,  $A_{\text{eff}}$  为有效模式场面积。在一定的硅光波导参数下,运用分步傅里叶方法<sup>[14]</sup>对传输方程组进行数值计算,从而可得到经过硅光波导非线性作用的输出光信号。

### 2.2 色散监测

在 WDM 光网络中,由于色散作用,信号光波形会发生变化。当信号光与探测光一起输入到硅光波导,两束光在波导中将产生四波混频作用,生成反斯托克斯光和斯托克斯光。硅光波导中四波混频的强弱和输入波导的光信号峰值功率有关。在光网络中,由于色散的存在,会使接收光信号波形展宽,峰值功率下降。不同的色散值会使信号峰值功率下降程度不同,进而在硅光波导中产生不同程度的四波混频效应,即生成的新频率光的功率值不同。通过适当设置光带通滤波器的中心频率和带宽,滤出新频率光分量,根据滤出功率即可实现色散监测。即当色散较小时,硅光波导中信号光峰值功率较大,波导中 FWM 效应较强,滤波器滤出的光功率值也较大。当色散较大时,信号光峰值功率较小, FWM 效应相应较弱,则滤波器滤出的光功率值较小。

图 1 为 33% RZ-OOK 信号格式下, CD 值  $f_{\text{CD}}$  分别取 10 ps/nm 和 30 ps/nm 时的硅光波导输出信号频谱图。这里的非线性作用包括自相位调制、交叉相位调制、四波混频效应。滤波器 OBPF1 和

OBPF2 滤取的分别是由四波混频效应生成的反斯托克斯光和斯托克斯光。可以看出,在这两种 CD 值的条件下,两个滤波器滤出的光功率值都是不同的。由此可以通过测量滤波器滤出的光功率来达到对色散监测的目的。

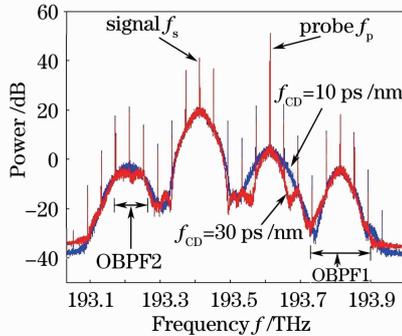


图 1 CD 值取 10 ps/nm 和 30 ps/nm 时的硅光波导输出信号频谱图

Fig. 1 Spectrum at silicon optical waveguide outputs with CD valued in 10 ps/nm and 30 ps/nm

### 3 研究结果

图 2 是基于硅光波导 FWM 效应的色散监测模拟系统。这里采用 3 cm 长的硅光波导,波导有效场面积  $A_{\text{eff}}$  为  $0.18 \mu\text{m}^2$ <sup>[15]</sup>,二阶色散系数  $\beta_2$  为  $1.118 \text{ps}^2/\text{m}$ <sup>[16]</sup>,线性损耗系数  $\alpha$  为  $0.2 \text{dB}/\text{cm}$ <sup>[17]</sup>,非线性折射率系数  $n_2$  为  $5 \times 10^{-18} \text{m}^2/\text{W}$ <sup>[17]</sup>。采用峰值功率 60 mW,中心频率  $f_s$  为 193.414 THz(中心波长为 1550 nm),占空比为 33%的 40 Gb/s RZ-OOK 信号;经过色散模拟器后和直流探测光耦合在一起,探测光中心频率  $f_p$  为 193.614 THz,功率 20 mW。耦合后的光经过硅光波导,由于硅光波导的 FWM 效应,其输出光谱发生畸变。输出光通过耦合器分成功率相等的 3 路,其中一路直接通过光功率计测量功率值  $P_0$ ,其他 2 路通过不同的带通滤波器滤波后再接入光功率计,测出光功率  $P_1$  和  $P_2$ 。采用  $P_1/P_0, P_2/P_0$  作为色散监测的监测参量。对硅光波导的输出光谱进行分析之后,选定的两个滤波波段分别是  $f_p + 200 \text{GHz}, f_s - 200 \text{GHz}$ ,即反斯托克斯光和斯托克斯

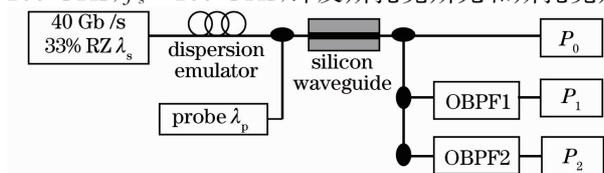


图 2 基于硅光波导四波混频效应的色散监测模拟系统

Fig. 2 Simulation setup for CD monitoring based on FWM in silicon optical waveguide

光的中心频率处,前者滤波器带宽取 170 GHz,后者滤波器带宽取 100 GHz。

#### 3.1 残余色散监测结果

图 3,4 为基于硅光波导四波混频效应的残余色散监测结果曲线。图 3 是带通滤波器 OBPF1(中心频率在  $f_p + 200 \text{GHz}$  波段)的测量光功率比值( $P_1/P_0$ )的归一化结果,即归一化的反斯托克斯光功率;图 4 是带通滤波器 OBPF2(中心频率在  $f_s - 200 \text{GHz}$  波段)的测量光功率比值( $P_2/P_0$ )的归一化结果,即归一化的斯托克斯光功率。可以看出,不同的 CD 值引起不同程度的四波混频效应,最终使得带通滤波器滤得的光功率不同,因此可以利用 FWM 效应实现对 CD 的监测。

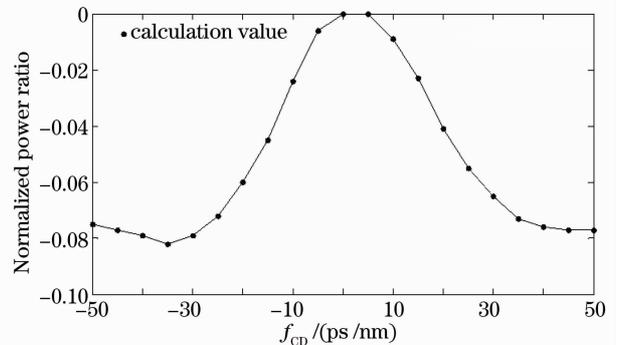


图 3 滤波器 OBPF1( $f_p + 200 \text{GHz}$ )处的归一化光功率比值  $P_1/P_0$

Fig. 3 Normalized optical power ratio  $P_1/P_0$  at the OBPF1 ( $f_p + 200 \text{GHz}$ )

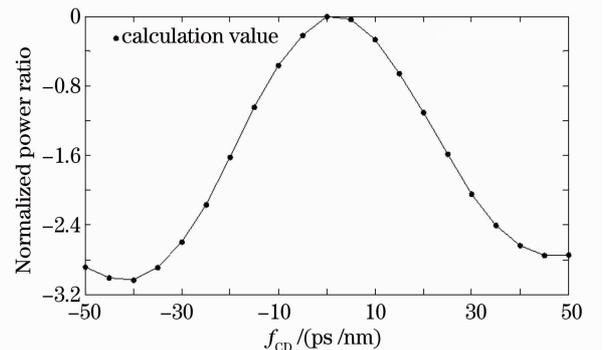


图 4 滤波器 OBPF2( $f_s - 200 \text{GHz}$ )处的归一化光功率比值  $P_2/P_0$

Fig. 4 Normalized optical power ratio  $P_2/P_0$  at the OBPF2 ( $f_s - 200 \text{GHz}$ )

对于如图 3 所示的  $f_p + 200 \text{GHz}$  波段处(反斯托克斯光)的监测结果曲线,光最大功率值和最小功率值相差只有 0.09 dB,这对光功率计的灵敏度要求很高,同时也难以分辨出信道中噪声对监测结果的影响。因此,采用在  $f_s - 200 \text{GHz}$  波段处对斯托

克斯光进行监测,如图 4 所示,监测的最大功率差值约 3.1 dB,监测范围约  $\pm 40$  ps/nm,实现了基于硅光波导 FWM 效应的色散监测。

### 3.2 硅光波导色散对监测结果的影响

硅光波导本身存在一定的色散,需要分析硅波导中存在的色散对监测结果的影响。图 5 为硅光波导的二阶色散系数  $\beta_2$  分别取 1.118, 0 和  $-1.118$  ps<sup>2</sup>/m 时在  $f_s - 200$  GHz 波段处的 CD 监测结果曲线。从图中可以看出,在监测范围内 3 条曲线的形状都很相近,都能实现  $\pm 40$  ps/nm 范围内的残余色散监测。另一方面,曲线间也存在平移现象, $\beta_2$  从 1.118 ps<sup>2</sup>/m 到 0 到  $-1.118$  ps<sup>2</sup>/m 的变化过程中,曲线向左平移;并且在监测范围的边缘处,曲线的差异增大,可以预见到当色散增大到一定程度时,会对监测范围有所影响,因此实验用硅光波导的色散也不能太大。所以,利用硅光波导的 FWM 效应进行残余色散监测,硅光波导自身的色散值在一定范围内时,对监测结果的影响基本可以忽略。

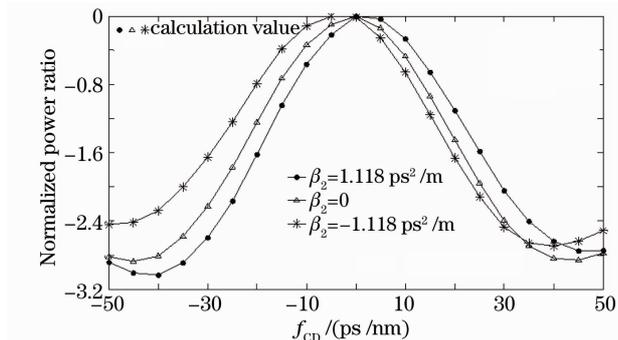


图 5 不同的色散系数  $\beta_2$  下,在滤波器 OBPF2 处的归一化光功率比值  $P_2/P_0$

Fig. 5 Normalized optical power ratio  $P_2/P_0$  at the OBPF2 with different values of  $\beta_2$

### 3.3 硅光波导损耗对监测结果的影响

硅光波导的损耗是一个重要的性能影响因素,需要研究硅光波导损耗对监测结果的影响。图 6 为损耗系数  $\alpha$  分别取 0.1, 0.2 和 4 dB/cm 时在  $f_s - 200$  GHz 波段处的 CD 监测结果曲线。可以看出,3 条曲线形状接近,都能实现  $\pm 40$  ps/nm 范围内的色散监测。但是,当线性损耗比较大时,监测精度有所下降,如线性损耗系数  $\alpha$  为 0.2 dB/cm 时,监测的功率最大差值约 3.1 dB,当  $\alpha$  增大到 4 dB/cm 时,监测的功率最大差值降为 2.4 dB。另外,硅光波导中的总损耗不能太大,否则光功率计将因输出功率过小而难以测量。因此,硅光波导的线性损耗在小于 4 dB/cm 时,对色散监测的影响在可容忍范围内。

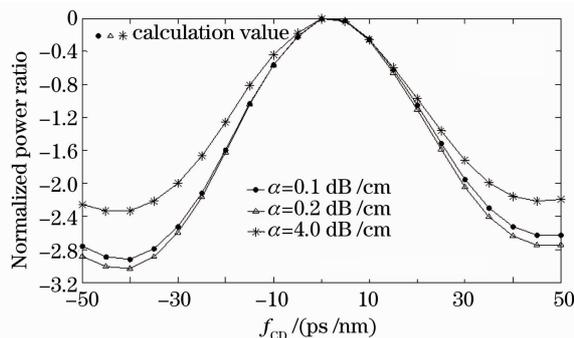


图 6 不同损耗系数  $\alpha$  下,在滤波器 OBPF2 处的归一化光功率比值  $P_2/P_0$

Fig. 6 Normalized optical power ratio  $P_2/P_0$  at the OBPF2 in different values of  $\alpha$

### 3.4 滤波器带宽对监测结果的影响

在前面基于硅光波导 FWM 色散监测的研究中,滤取斯托克斯光的滤波器带宽取 100 GHz。但实际系统中难以保证滤波器带宽非常精准,因此有必要分析带宽对监测结果的影响。图 7 为滤波器中心频率在  $f_s - 200$  GHz 处,带宽为 100 GHz, 110 GHz 时的 CD 监测结果曲线。可以看出,2 条曲线都能实现  $\pm 40$  ps/nm 范围内的残余色散监测。因此在实际应用中,滤波器的带宽略微变化,也不影响对色散的监测。

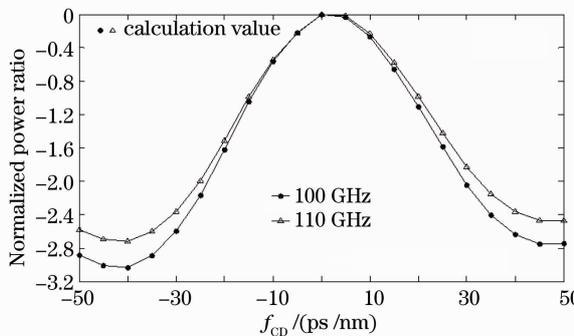


图 7 不同滤波器带宽下,在滤波器 OBPF2 处的归一化光功率比值  $P_2/P_0$

Fig. 7 Normalized optical power ratio  $P_2/P_0$  at the OBPF2 with different filter bandwidths

## 4 结 论

光性能监测是实现 WDM 智能光网络的一种重要技术,基于硅光波导较大的非线性系数,采用硅光波导的四波混频效应可实现对光通道色散的监测。研究表明以四波混频产生的斯托克斯光功率作为监测参数,可较好完成对 CD 的监测,色散监测范围可达  $\pm 40$  ps/nm,而且在硅光波导自身的色散值小于 1.118 ps<sup>2</sup>/m,波导损耗小于 4dB/cm,以

及滤波器带宽略微变化时,对色散监测的影响可以忽略。因此该光性能监测技术可有效应用于40 Gb/s波分复用光网络的芯片级色散监测。

### 参 考 文 献

- 1 Jun Haeng Lee, Hongxiang Guo, Takehiro Tsuritani *et al.*. Field trial of all-optical networking controlled by intelligent control plane with assistance of optical performance monitors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(2): 94~100
- 2 K. F. Tsai, W. I. Way. Chromatic-dispersion monitoring using an optical delay and add filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3737~3747
- 3 Y. C. Chung. Optical performance monitoring techniques; current status and future challenges [C]. 34th European Conference on Optical Communication, 2008, Brussels, 21~25
- 4 Y. K. Lize, L. Christen, J. Y. Yang *et al.*. Independent and simultaneous monitoring of chromatic and polarization-mode dispersion in OOK and DPSK transmission [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(1): 3~5
- 5 Z. Li, G. Li. Chromatic dispersion and polarization-mode dispersion monitoring for RZ-DPSK signals based on asynchronous amplitude-histogram evaluation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(7): 2859~2866
- 6 Chen Ming, Zhang Yejin, He Lina *et al.*. Application of polarization SCM for simultaneous monitoring fiber CD and PMD [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(6): 683~686  
陈明,张冶金,贺丽娜等. 偏振副载波调制在光纤色散与PMD监测技术中的应用[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(6): 683~686
- 7 J. L. Blows, P. Hu, B. J. Eggleton. Differential group delay monitoring using an all-optical signal spectrum-analyser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 288~291
- 8 S. Li, D. V. Kuksenkov. A novel dispersion monitoring technique based on four-wave mixing in optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 942~944
- 9 Wang Qing, Liu Xiaoming, Wang Yan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering suppression and optical parametric amplification in highly nonlinear optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 802~806  
王青,刘小明,王燕等. 高非线性光纤中受激布里渊散射的抑制和光参量放大[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 802~806
- 10 Zou Lianggang, Song Muping. Dispersion monitoring based on self phase modulation and cross phase modulation effects in semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 277~281  
邹良港,宋牟平. 基于半导体光放大器自相位调制和交叉相位调制的色散监测技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 277~281
- 11 A. Barkai, Y. Chetrit, O. Cohen *et al.*. Integrated silicon photonics for optical networks [J]. *J. Opt. Netw.*, 2007, **6**(1): 25~47
- 12 Tang Yanzhe, Wang Yuelin, Wu Yaming. Transition loss and polarization effect in planar lightwave circuits based on silicon-on-insulator rib waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 203~207  
唐衍哲,王跃林,吴亚明. 硅基脊型波导器件过渡区损耗及偏振效应[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 203~207
- 13 B. Jalali, S. Fathpour. Silicon photonics [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4600~4614
- 14 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 234~245  
C. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方,余震虹等译. 北京:电子工业出版社, 2003. 234~245
- 15 Q. Lin, Oskar J. Painter, Govind P. Agrawal. Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: modeling and applications [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16604~16644
- 16 Ozdal Boyraz, Tejaswi Indukuri, Bahram Jalali. Self-phase-modulation induced spectral broadening in silicon waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 829~834
- 17 C. S. Wong, T. K. Liang, M. W. K. Mak *et al.*. Measurement of nonlinear optical properties of silicon waveguide at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength [C]. Lasers and Electro-Optics, 2001, CLEO '01, Baltimore, MD. CLEO 2001, 178