

文章编号: 0253-2239(2010)04-0944-05

基于硅光波导非线性效应的色散监测技术研究

邹良港 宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 色散监测是实现高速光通信的一项关键技术,利用光波导器件的非线性效应进行色散监测可以实现集成化。硅光波导具有强烈的非线性特性,其非线性折射率系数约为 $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。当信号光和抽运光耦合后通过硅光波导,会产生自相位调制(SPM),交叉相位调制(XPM)等非线性效应,这些效应都能引起光谱的变化。光通信链路中存在的不同色散值会使得信号波形发生变化,波形变化的信号会在硅光波导中产生不同程度的 SPM, XPM 效应。通过合理设置滤波器的中心频率和带宽,同时测量由 SPM, XPM 效应产生的光谱变化结果,可实现对链路中残余色散的监测。研究表明色散监测范围可达 $\pm 40 \text{ ps/nm}$ 。

关键词 光通信;色散监测;硅光波导;非线性效应

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0944

Dispersion Monitoring Based on Nonlinear Effects in Silicon Optical Waveguides

Zou Lianggang Song Muping

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

Abstract Dispersion monitoring is a key technique of realizing high-speed optical communication. The structure can be integrated on a chip when using the nonlinear effects of optical waveguides to monitor dispersion. Silicon optical waveguides have notable nonlinearity with the nonlinear refractive index as $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$. When the signal and the pump light go through the silicon optical waveguide after being coupled, high nonlinear effects, such as self-phase modulation (SPM) and cross-phase modulation (XPM) will occur. These effects will induce changes in the spectrum of the optical signal. The different dispersions of the link lead to different extent effects of SPM and XPM. By effectively setting the central frequency and bandwidth of the filters, the different spectrum changes related to SPM and XPM can be detected simultaneously, so to monitor the link dispersion can be realized. The monitoring dispersion range reaches $\pm 40 \text{ ps/nm}$.

Key words optical communications; dispersion monitoring; silicon optical waveguides; nonlinear effects

1 引言

高速波分复用(WDM)光通信网络是光通信系统的发展方向,但网络中色散(CD)容限与光链路的传输速率成反比,随着传输速率和传输距离的大幅提高,链路中的色散对信号质量的影响大幅增大,如 40 Gb/s 系统的色散容限仅仅是 10 Gb/s 系统的 $1/16$ ^[1],因此对系统中存在的色散进行动态补偿就显得十分重要。一般情况下,要实现色散补偿,需要

事先实现对链路中色散的实时监测,再根据监测得到的残余色散值设计实时补偿系统,因此色散监测技术是实现高速 WDM 网络的一项关键技术。

目前常用的色散监测技术主要有:副载波调制色散监测技术^[2]、基于波形分析的监测技术^[3]、时钟信号分析色散监测技术^[4]和利用自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频等非线性效应的色散监测技术等。利用光器件或光波导的非线性效应进行

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-10-08

作者简介: 邹良港(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信监测方面的研究。E-mail: zjuzlg@zju.edu.cn

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

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

色散监测往往可以实现全光网络监测系统,而且可以达到微型化集成化。国内外诸多学者也做了大量研究,如基于半导体光放大器(SOA)的自相位调制、交叉相位调制^[5,6]的色散监测,基于高非线性光纤(HNLF)的非线性效应^[7,8]的色散监测等。

随着硅集成电路加工工艺的提高,硅光子器件正成为研究热点,硅光波导受到了越来越多的关注。采用硅基绝缘(SOI)晶片,以 Si($n=3.45$)作为芯层, SiO₂($n=1.45$)作为包层,可制作出高光折射率差的硅波导。考虑到在光通信窗口,硅具有良好的非线性光学性能,本文利用硅光波导的非线性效应进行色散监测,研究此技术在光通信网络残余色散

监测和光子器件监测方面的应用^[9]。

2 色散监测原理

2.1 硅光波导的非线性效应

硅光波导具有强烈的非线性效应,包括自相位调制和交叉相位调制,其非线性系数约为普通光纤的 10000 倍。当信号通过硅光波导时,信号频谱将产生畸变,SPM 会使得光谱在信号中心频率附近展宽以及产生红移现象,而 XPM 会使得光谱在抽运光附近产生新的频率的光。此外还必须考虑到硅光波导的色散特性和损耗,硅光波导的信号传递方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial A_s}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_s}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2}A_s + i\gamma(|A_s|^2 + 2|A_p|^2)A_s, \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_p}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2}A_p + i\gamma(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p, \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_s 表示信号光, A_p 表示抽运光, β_2 为二阶色散系数, α 为损耗系数, $\gamma = \frac{n_2\omega_0}{cA_{\text{eff}}}$ 为非线性系数, n_2 为非线性折射率系数, ω_0 为中心角频率, c 为光速, A_{eff} 为波导有效场面积。对于(1)式, $i\gamma|A_s|^2A_s$ 项即对应于 SPM 效应, $2i\gamma|A_p|^2A_s$ 项即对应于 XPM 效应, (2)式类似。采用分步傅里叶方法对(1)式, (2)式进行数值计算^[10], 假定

$$\begin{cases} D = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} \\ N_s = i\gamma(|A_s|^2 + 2|A_p|^2), \\ N_p = i\gamma(|A_p|^2 + 2|A_s|^2) \end{cases} \quad (3)$$

则可以得到(1)式, (2)式的数值解

$$\begin{cases} A_s(z+h, T) \approx \exp(hD)\exp(hN_s)A_s(z, T) \\ A_p(z+h, T) \approx \exp(hD)\exp(hN_p)A_p(z, T) \end{cases} \quad (4)$$

2.2 色散监测

信号在光纤链路中传输时,由于色散的存在,会使信号波形展宽,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,而不同的峰值功率会使硅光波导产生不同程度的非线性效应^[11],包括 SPM 和 XPM。因此可以通过对 SPM 和 XPM 的测量实现色散监测。当色散比较小时,进入硅光波导前的信号光波形较窄,峰值功率较大,硅光波导中的 SPM 和 XPM 效应较强,输出光谱在信号中心频率附近的展宽比较多,抽运光附近新产生光的功率也比较大,通过合理设计带通滤波器的中心频率和带宽,对边带进行滤波,滤出的光功率也较大。当色散

比较大时,信号光波形较宽,峰值功率较小,SPM 和 XPM 效应相应地较弱,同样地滤波器滤出的光功率就会较小。

如图 1 所示为 33% RZ-OOK 信号格式下, CD 值分别取 10 ps/nm 和 30 ps/nm 时的光硅波导输出信号频谱图。滤波器 OBPF1 和 OBPF2 滤取的是由 SPM 效应引起的频谱变化量,滤波器 OBPF3 和 OBPF4 滤取的是由 XPM 效应引起的频谱变化量。可以看出,在这两种 CD 值的条件下,4 个滤波器滤出的光功率都有比较明显的变化。由此可以通过测量滤波器滤出的光功率来达到对链路中残余色散监测的目的。

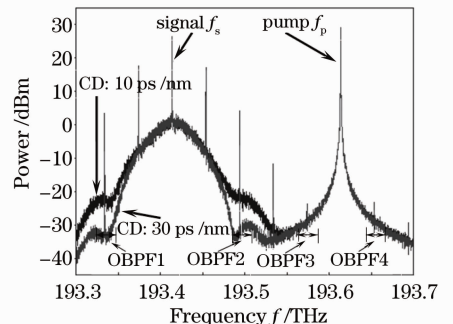


图 1 硅光波导输出信号频谱图

Fig. 1 Spectrum at silicon optical waveguide outputs

3 实验方案与结果

图 2 是基于硅光波导的 SPM 和 XPM 效应的色散监测模拟系统,可实现对残余色散的监测。这

里采用 2 cm 长的硅光波导,波导有效场面积 A_{eff} 为 $0.13 \mu\text{m}^2$ ^[12],二阶色散系数 β_2 为 $1.118 \text{ ps}^2/\text{m}$ ^[13],损耗系数 α 为 0.2 dB/cm ^[14],非线性折射率系数 n_2 为 $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ^[14]。并采用峰值功率 45 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抽运光耦合在一起,抽运光中心频率 (f_p) 为 193.614 THz,功率 15 mW。耦合后的光经过硅光波导,由于硅光波导的非线性效应,其输出光谱发生畸变。实验中采用的光信号功率比较低,因此可以忽略硅光波导中的双光子吸收(TPA)等效应^[15]。输出光通过耦合器分成功率相等的 5 路。其中第一路直接通过光功率计测量功率值 P_0 ,后面 4 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 $P_1 \sim P_4$ 。对硅光波导的输出光谱进行分析后,选定的四个滤波波段分别是 $f_s - 80 \text{ GHz}$, $f_s + 80 \text{ GHz}$, $f_p - 40 \text{ GHz}$, $f_p + 40 \text{ GHz}$,即 SPM 或 XPM 效应变化比较明显的 4 个波段,滤波器带宽都是 15 GHz。本文采用 $P_1/P_0 \sim P_4/P_0$ 作为色散监测的监测参量。

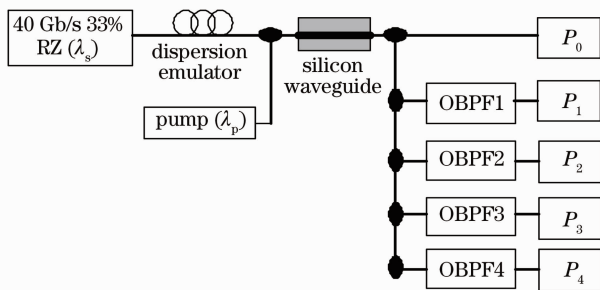


图 2 基于硅光波导的色散监测模拟系统

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

3.1 残余色散监测结果

图 3 和图 4 所示为残余色散监测结果曲线。图 3 是带通滤波器在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段和 $f_s + 80 \text{ GHz}$ 波段的测量结果,这是由硅光波导的 SPM 效应引起的光谱畸变。图 4 是带通滤波器在 $f_p - 40 \text{ GHz}$ 波段和 $f_p + 40 \text{ GHz}$ 波段的测量结果,这是由硅光波导的 XPM 效应引起的光谱畸变。可以看出利用这两种效应都能实现对 CD 的监测。对比 4 条曲线,考虑监测范围和精度,利用硅光波导的 SPM 效应进行监测的结果要比 XPM 更好一些,监测范围达 $\pm 40 \text{ ps/nm}$ 。此外,当结合 SPM 和 XPM 的色散监测方案,可以分辨出 CD 的正负符号。如取 $f_s + 80 \text{ GHz}$ 波段和 $f_p - 40 \text{ GHz}$ 波段的测量曲

线,由于两条曲线的对称特性不同,根据在两条曲线上所取得的数值,即可确定此时的 CD 值,包括正负符号。从图 3 可以看出监测曲线并不完全中心对称,这是因为 SPM 效应不仅会引起信号光谱的展宽,还会引起光谱的红移,在这两种效果的共同作用下,监测曲线会产生偏移。

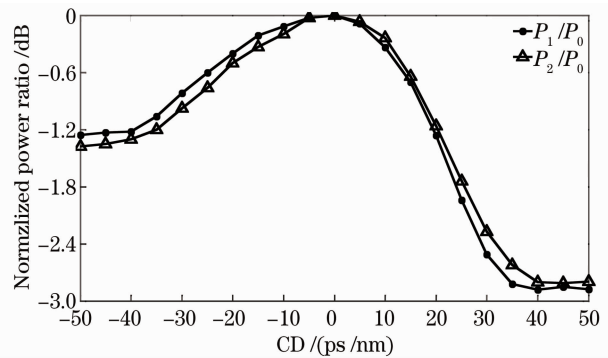


图 3 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 和 $f_s + 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测曲线
Fig. 3 CD monitoring curve with the center of OBPF in $f_s - 80 \text{ GHz}$ and $f_s + 80 \text{ GHz}$

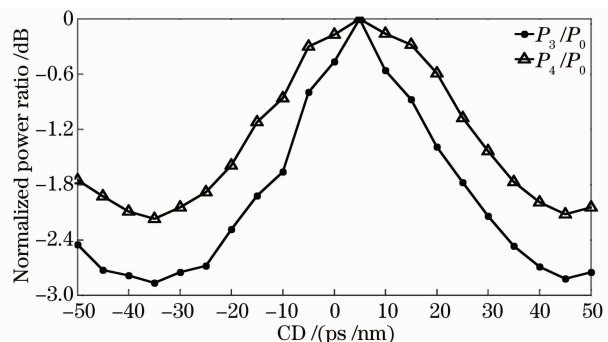


图 4 $f_p - 40 \text{ GHz}$ 和 $f_p + 40 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测曲线
Fig. 4 CD monitoring curve with the center of OBPF in $f_p - 40 \text{ GHz}$ and $f_p + 40 \text{ GHz}$

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,下面将讨论硅

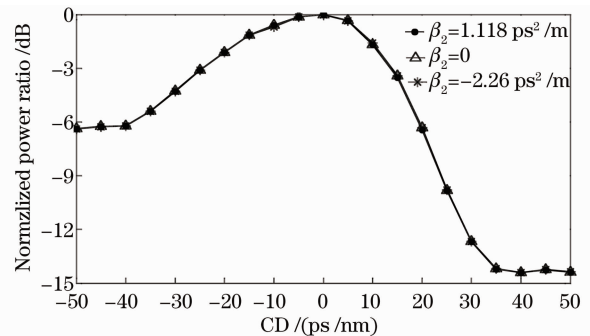


图 5 不同的色散系数下在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测曲线

Fig. 5 CD monitoring curve with the center of OBPF in $f_s - 80 \text{ GHz}$ in different values of β_2

光波导中存在的色散对实验结果的影响。图 5 所示是硅光波导的二阶色散系数 β_2 分别取 1, 118, 0 和 $-2.26 \text{ ps}^2/\text{m}$ 时在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测结果曲线。从图中可以看出, 3 条曲线基本重叠, 说明实验中引入的硅光波导的色散值非常小, 对实验光通信链路中残余色散监测的影响基本可以忽略。因此即便采用的硅光波导本身存在一定量的色散, 也不影响利用该方案对链路中色散进行监测的精确度。

3.3 硅光波导损耗对监测结果的影响

损耗是硅光波导性能的一个基本影响因素, 需要对硅光波导中的损耗对监测结果的影响做一定的分析。图 6 所示为损耗系数 α 分别取 0.1, 0.2 和 4 dB/cm 时在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测结果曲线。从图可以看出, 3 条曲线基本重叠, 在硅光波导的线性损耗达到 4 dB/cm 时, 由该方案测得的残余色散监测曲线还基本保持不变, 这为硅光波导的设计与选取提供了宽泛的指标。但硅光波导中的总损耗量不能太大, 否则光功率计将因输出功率过小而难以测量。

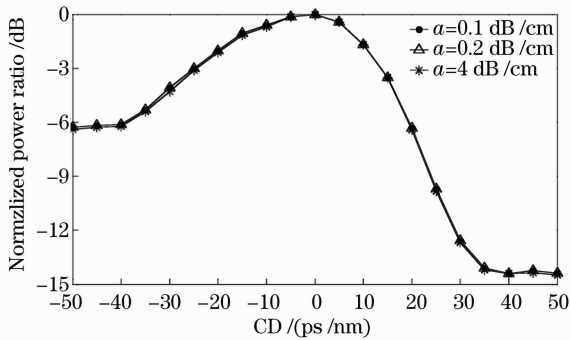


图 6 不同的损耗系数下在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测曲线

Fig. 6 CD monitoring curve with the center of OBPF in $f_s - 80 \text{ GHz}$ in different values of α

3.4 滤波器带宽对监测结果的影响

滤波器的设计是该监测方案中很重要的一个环节, 实验中滤波器的带宽都取用 15 GHz, 但由于工艺限制, 滤波器在实际制作中很难保证带宽如此精准, 往往会稍有扩大, 因此有必要验证带宽的略微增大对监测结果的影响。图 7 所示为滤波器中心频率在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 处, 带宽为 15 和 20 GHz 时的 CD 监测结果曲线。随着 CD 增大, 两种滤波器的监测结果曲线差别有所增大, 但这并不影响对 CD 的监测, CD 的监测范围同样约为 $\pm 40 \text{ ps/nm}$ 。因此在实际应用中, 即便滤波器的带宽有所扩大, 也不影响该技术对 CD 的监测。

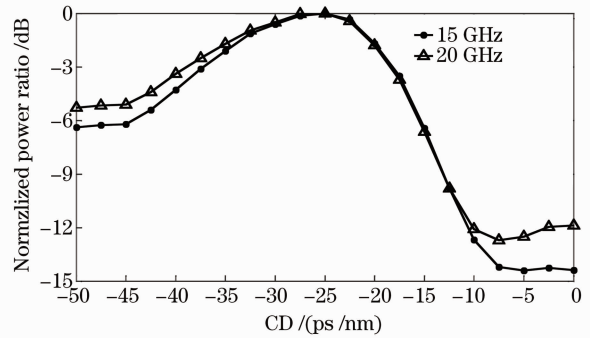


图 7 不同的滤波器带宽下在 $f_s - 80 \text{ GHz}$ 波段处的 CD 监测曲线

Fig. 7 CD monitoring curve with the center of OBPF in $f_s - 80 \text{ GHz}$ in different bandwidths of OBPF

4 结 论

本文采用硅光波导的 SPM 和 XPM 效应实现对光通信链路残余色散的监测, 研究结果表明这两种效应都能实现对 CD 的监测, 而基于 SPM 效应的监测结果优于基于 XPM 效应的监测结果, 监测范围可达 $\pm 40 \text{ ps/nm}$ 。如同时考虑 SPM 和 XPM 的监测结果曲线, 还可以分辨出色散的正负符号。此外, 硅光波导中的色散和滤波器带宽对该监测方案的影响可忽略。在硅光波导的线性损耗不至于过大时, 该损耗对监测方案的影响也可忽略。该技术可应用于 40 Gb/s 高速波分复用光网络的残余色散实时监测。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 Chen Ming, Zhang Yejin, Si Zhijian *et al.*. Research progresses of chromatic dispersion monitoring techniques in dynamic compensation systems [J]. *Semicond. Optoelectronics*, 2006, **27**(5): 503~507
陈明, 张冶金, 司治建等. 动态色散补偿系统中色散监测技术的研究进展[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5): 503~507
- 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]. *Photonics Technol Lett., IEEE*, 2007, **19**(1): 3~5
- 5 Zhang Aixu, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Noninverted wavelength conversion for 40 Gb/s return-to-zero signal based on semiconductor optical amplifier and optical bandpass filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 249~254
张爱旭, 于晋龙, 王耀天等. 基于半导体光放大器和整形滤波器的 40 Gb/s 的归零码波长变换研究[J]. *光学学报*, 2008,

- 28**(2); 249~254
- 6 Ying Shi, Minghua Chen, Shizhong Xie. A novel chromatic dispersion monitoring method in terms of SOA spectral shift[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 383~384
- 7 J. Y. Yang, L. Zhang, X. Wu *et al.*. All-optical chromatic dispersion monitoring for phase-modulated signals utilizing cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1642~1644
- 8 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
- 9 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
- 10 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics Application of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu zhenhong, Tan Bin Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 34~35
阿戈沃, 阿格拉瓦尔. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 34~35
- 11 Eric Dulkeith, Yurii A. Vlasov, Xiaogang Chen *et al.*. Self-phase-modulation in submicron silicon-on-insulator photonic wires [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5524~5534
- 12 Jidong Zhang, Qiang Lin, Giovanni Piredda *et al.*. Optical solitons in a silicon waveguide[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(12): 7682~7688
- 13 Ozdal Boyraz, Tejaswi Indukuri, Bahram Jalali. Self-phase-modulation induced spectral broadening in silicon waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 829~834
- 14 C. S. Wong, T. K. Liang, M. W. K. Mak *et al.*. Measurement of nonlinear optical properties of silicon waveguide at 1.55 μm wavelength[C]. CLEO, 2001, **178**
- 15 Richard L. Espinola, Jerry I. Dadap, Richard M. Osgood Jr. C-band wavelength conversion in silicon photonic wire waveguides [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4341~4349