

doi:10.3788/gzxb20154403.0323002

反常色散亚微米硫系玻璃脊形波导 及其在光学相位共轭中的应用

邹林儿¹, 姚松超¹, 陈抱雪², 矶守³

(1 南昌大学 物理系, 南昌 330031)

(2 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(3 日本东京农工大学 工学院应用化学系, 日本 184-8588)

摘要:基于有限元法仿真计算了脊高 850 nm、脊宽 800~2 000 nm、刻蚀深度 200~600 nm 的亚微米结构尺寸 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导的有效折射率和色散特性. 结果显示在光通信波段内准 TM 模式下一定波导结构存在反常色散, 且同一脊宽和脊高下零色散波长位置随刻蚀深度增加出现蓝移; 同时合适结构的波导还存在两个零色散波长, 如脊高 850 nm、脊宽 1 000 nm、刻蚀深度 350 nm 的脊形波导, 准 TM 模式下两个零色散波长为 1 510 nm 和 1 746 nm, 波长 1 550 nm 处的色散值为 $-28.62 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$. 在此基础上, 利用此具有反常色散的脊形波导作为光学相位共轭介质, 将其应用在 220 km 远距离光纤链路的 $3 \times 40 \text{ Gb/s}$ 高比特率波分复用系统中进行仿真实验, 结果显示该硫系玻璃脊形波导构建的光学相位共轭器有效地实现了四波混频效应, 且对整个系统的色散进行了有效补偿.

关键词:集成光学; 光学相位共轭; 脊形波导; 色散; 硫系玻璃

中图分类号: TN252; O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0323002-6

Sub-micron Chalcogenide Glass Ridge Waveguides with Anomalous Dispersion and Its Application to Optical Phase Conjugation

ZOU Lin-er¹, YAO Song-chao¹, CHEN Bao-xue², MAMORU Iso³

(1 *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

(2 *School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

(3 *Department of Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan*)

Abstract: The finite element method was employed to analyze the effective refractive index and the dispersion characteristics for sub-micron As_2S_3 chalcogenide glass ridge waveguides with ridge height of 850 nm, ridge width of 800~2 000 nm, and etch depth of 200~600 nm. The results show that some certain structure ridge waveguides have anomalous dispersion for the quasi-TM mode within optical communications band, and their zero dispersion wavelengths take place the blue shift with the increasing of etch depth in the same ridge width and ridge height. Moreover, there are two zero dispersion wavelengths in these waveguides with an appropriate structure, the As_2S_3 waveguide with ridge height of 850 nm, ridge width of 1 000 nm, and etch depth of 350 nm presents two the zero-dispersion wavelengths of 1 510 nm and 1 746 nm, and the dispersion value of $-28.62 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ in the quasi-TM mode at 1 550 nm. On this basis, the As_2S_3 chalcogenide glass ridge waveguide with anomalous dispersion was used as an optical phase conjugation medium, and then applied in 220 km long distance fibre link with $3 \times 40 \text{ Gb/s}$ high bit-rate wavelength division multiplexing system by the experimental simulation. The results

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61465008, 60967003, 61077042)资助

第一作者:邹林儿(1971-),男,副教授,博士,主要研究方向为集成光学与光波导器件技术. Email:linerzou@gmail.com

收稿日期:2014-09-15;录用日期:2014-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

show this optical phase conjugator based on the chalcogenide glass ridge waveguide achieves availably the four-wave mixing effect and offers effectively the dispersion compensation for the whole system.

Key words: Integrated optics; Optical phase conjugation; Ridge waveguides; Dispersion; Chalcogenide glasses

OCIS Codes: 230.7370; 130.2755; 160.4330; 190.4380; 130.4310

0 引言

硫系玻璃是硫族元素如 S、Se、Te 等与金属元素或者非金属元素组合形成的非晶态玻璃材料,具有高敏感性、高折射率、宽红外窗口和高光学非线性系数(高于石英玻璃两个数量级)等特点^[1-4],作为非线性材料备受关注^[5].应用硫系玻璃光波导的高非线性光学效应在超高速全光信息处理中实现了全光开关、信号再生和波长变换等功能^[6-10].

在硫系玻璃、硅、铋和二氧化硅等非线性材料中,人们已经观察到四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)效应^[11-13].利用 FWM 效应实现光学相位共轭(Optical Phase Conjugation, OPC)^[14-15],通过相位共轭产生时间反演波从而实现色散补偿.文献[16-17]利用硅纳米线通过波导色散补偿材料色散实现了 1 550 nm 波长附近的零色散,但其在波长 1 550 nm 光通信波段因受高双光子吸收和自由载流子吸收的影响,限制了其非线性处理效率^[18].对硫系玻璃而言,如 As_2S_3 ,虽然在光通信波段有低的双光子吸收且不存在载流子的吸收^[19],但因其较高的材料正常色散,导致实现 FWM 效应困难.通过在 As_2S_3 单模光纤上拉锥一段长 5 cm、直径为 1.9 μm 光子线能实现 FWM^[20],但混频效率不高.

本文选取脊形波导结构,应用基于有限元法的多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 设计仿真了亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导,利用其在光通信波段内准 TM 模式下存在的反常波导色散克服高的材料色散,使得零色散波长位于光通信波长附近,容许一定相位失配,更容易实现 FWM 效应.基于此,由亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建 OPC,并应用于 3 \times 40 Gb/s 的高比特率波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统中,利用光通信系统软件 OptiSystem 实验获得 220 km 远距离传输的有效色散补偿.

1 As_2S_3 硫系玻璃

As_2S_3 硫系玻璃谐振波的光子能量约为 2.4 eV,远离光通信波段,可利用 Sellmerier 公式近似得出光通信波段的折射率,即

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (1)$$

其材料色散参量 β_2 (Group Velocity Dispersion,

GVD 系数)为

$$\beta_2(\lambda) = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中, As_2S_3 硫系玻璃材料的 Sellmerier 系数为^[21]: $B_1 = 1.898\ 368$, $B_2 = 1.922\ 298$, $B_3 = 0.876\ 513\ 8$, $B_4 = 0.118\ 878$, $B_5 = 0.956\ 998$; $\lambda_1 = 0.1\ \mu m$, $\lambda_2 = 0.25\ \mu m$, $\lambda_3 = 0.35\ \mu m$, $\lambda_4 = 0.45\ \mu m$, $\lambda_5 = 27.386\ 1\ \mu m$.

图 1 是 As_2S_3 硫系玻璃材料折射率和材料色散 GVD 系数与波长关系,波长 1 550 nm 处有约为 2.437 的高折射率和约为 463.78 $ps^2 \cdot km^{-1}$ 高的材料正常色散.为了在光通信波段内实现高效 FWM 效应,泵浦光抽运必须在零色散附近进行.因 As_2S_3 材料具有高折射率,传输光被强烈地限制在波导内,可以设计具有反常波导色散的波导结构,补偿材料正常色散,使得零色散波长在 1 550 nm 附近.

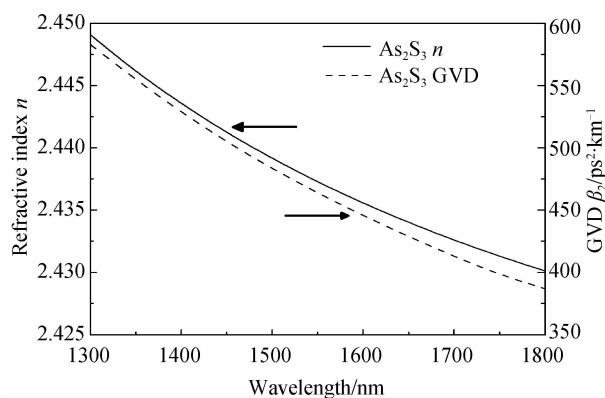


图 1 As_2S_3 硫系玻璃材料折射率和材料色散

Fig. 1 As_2S_3 chalcogenide glass refractive index (λ) and material dispersion (λ)

2 亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导

图 2 是脊高 H 、脊宽 W 、刻蚀深度 h 的 As_2S_3 脊形波导结构.芯层为 As_2S_3 硫系玻璃,折射率为 2.437(波

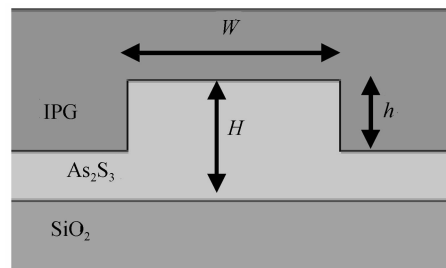


图 2 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导结构示意图

Fig. 2 The schematic plot of As_2S_3 chalcogenide glass ridge waveguide

长为 1 550 nm);衬底为 SiO₂,折射率为 1.458;选用无机高分子玻璃(IPG)为覆盖层,折射率为 1.520.在设计仿真中,其结构尺寸为亚微米级,根据优化结果选定脊高为 850 nm,脊宽 800~2 000 nm,刻蚀深度 200~600 nm.同时考虑到波长 1 550 nm 附近 As₂S₃ 材料色散远高于 SiO₂ 材料色散^[22],在波导色散仿真中可以忽略 SiO₂ 材料色散.

2.1 结构参量对有效折射率的影响

图 3 是脊高 H 为 850 nm 的 As₂S₃ 脊形波导在准 TE 和准 TM 模式下的有效折射率 n_{eff} 与脊宽 W 和刻蚀深度 h 的关系(波长为 1 550 nm).图 3(a)显示,在准 TE 模式下同一脊宽模场有效折射率随刻蚀深度有较好的线性关系;而在准 TM 模式下有效折射率出现转折点,如图 3(b),过转折点会出现反常色散(小于零).从图 3 中还得知:脊宽一定时,随着刻蚀深度的增加波导有效折射率减小;刻蚀深度一定时,随着脊宽的减小波导有效折射率也随着减小.

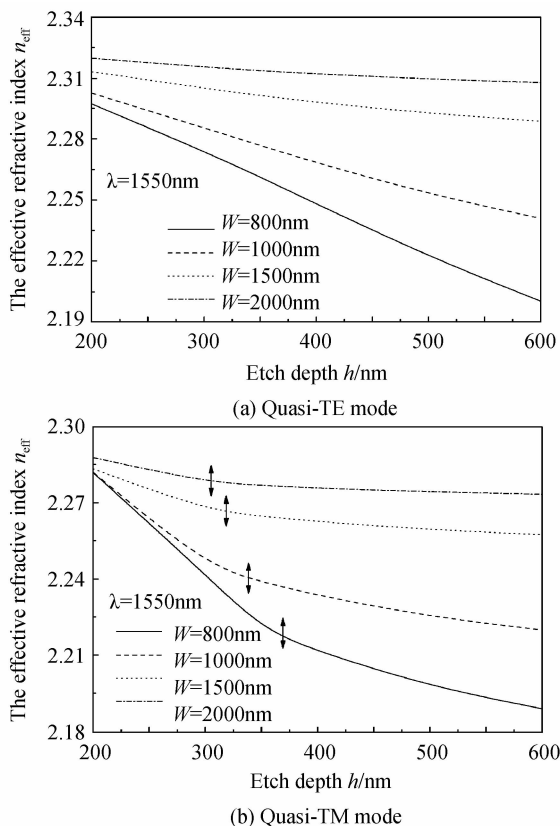


图 3 亚微米 As₂S₃ 脊形波导在准 TE 模式和准 TM 模式下有效折射率 n_{eff} 与脊宽和刻蚀深度的关系
Fig. 3 The effective refractive index n_{eff} of the quasi-TE and quasi-TM modes in sub-micron As₂S₃ ridge waveguide depending on the ridge width and the etch depth

2.2 亚微米硫系玻璃脊形波导色散

图 4 和图 5 是 As₂S₃ 硫系玻璃脊形波导的脊宽 W 分别为 1 000 nm 和 800 nm 时在同一脊高 H 为 850 nm 情况下不同刻蚀深度 h 的色散曲线.图 4(a)和

图 5(a)显示亚微米 As₂S₃ 硫系玻璃脊形波导在光通信

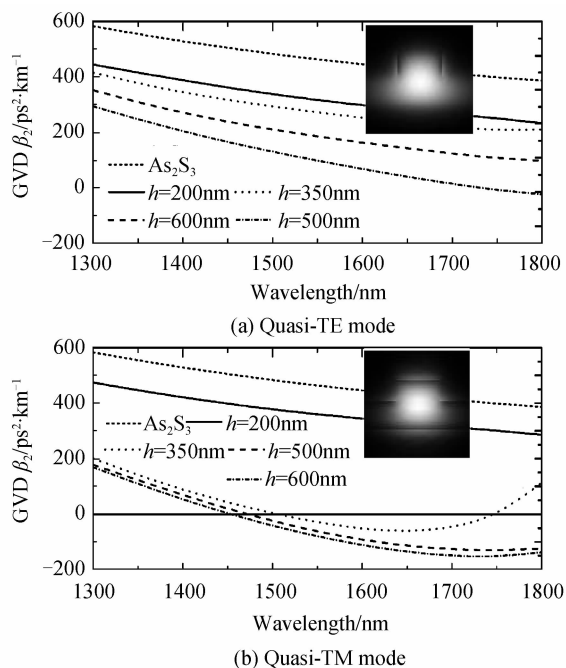


图 4 脊高 850 nm、脊宽 1000 nm 的 As₂S₃ 波导在不同刻蚀深度下的色散曲线(插图是 1 550 nm 波长在刻蚀深度 350 nm 下的模场分布)

Fig. 4 The calculated GVD in ridge height of 850 nm and ridge width of 1 000 nm As₂S₃ waveguides with the different etch depth (the distribution of mode field in etch depth of 350 nm for 1 550 nm wavelength are inset)

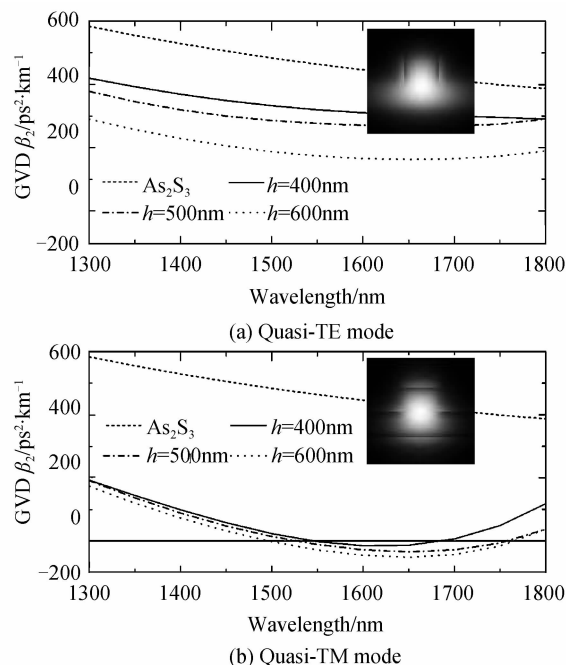


图 5 脊高 850 nm、脊宽 800 nm 的 As₂S₃ 波导在不同刻蚀深度下的色散曲线(插图是 1 550 nm 波长在刻蚀深度 400 nm 下的模场分布)

Fig. 5 The calculated GVD in ridge height of 850 nm and ridge width of 800 nm As₂S₃ waveguides with the different etch depth (the distribution of mode field in etch depth of 400 nm for 1 550 nm wavelength are inset)

波段内准 TE 模式下没有出现反常色散现象,但在准 TM 模式下存在反常色散,如图 4(b)和图 5(b). 同时图 4(b)和图 5(b)显示在同一结构中,零色散波长位置随刻蚀深度增加出现蓝移,如脊宽为 1 000 nm 的结构中,刻蚀深度从 350 nm 到 600 nm,零色散波长位置从 1 510 nm 移至 1 458 nm. 当脊宽改变为 800 nm 时,刻蚀深度从 400 nm 到 600 nm,零色散波长位置从 1 548 nm 移至 1 490 nm. 值得注意的是,选择合适的波导结构参量会出现两个零色散波长,如脊高为 850 nm、脊宽为 1 000 nm、刻蚀深度为 350 nm 时,两个零色散波长分别为 1 510 nm 和 1 746 nm,在波长 1 550 nm 处色散值为 $-28.62 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$;脊高为 850 nm、脊宽为 800 nm、刻蚀深度为 400 nm 时,两个零色散波长分别为 1 548 nm 和 1 685 nm,在波长 1 550 nm 处色散值为 $-1.81 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$. 另外,图 4 和图 5 里的插图表示的模场分布指出了它们是基模.

从仿真结果可以得出,亚微米尺寸结构下的 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导在准 TM 模式下色散 GVD 会出现反常现象,且调控波导结构参量如脊宽、刻蚀深度等,可以设置不同零色散波长位置.

3 构建 OPC 于 WDM 系统

利用亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导具有的反常波导色散特性,克服高材料色散,使得总色散值在零色散附近. 容许一定相位失配,来补偿光纤链系统中积累的正色散,使得更容易实现 FWM 效应. 选择脊高 850 nm、脊宽 1 000 nm、刻蚀深度 350 nm 的 As_2S_3 脊形波导结构作为 OPC 介质,其准 TM 模式下波长 1 550 nm 处的色散值是 $-28.62 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$,有效模场面积约 $0.91 \mu\text{m}^2$,非线性折射率系数 n_2 为 $3 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ [21]. 将构建的 OPC 应用于远距离光纤链路的高速多信道 WDM 系统中,可实现色散补偿.

利用 OptiSystem 软件实验仿真了 $3 \times 40 \text{ Gb/s}$ 的 WDM 系统,信道间隔为 200 GHz(信道间隔大,可以忽略由非线性效应引起的交叉相位调制,同时降低受激喇曼散射). 图 6 是长度为 6 cm 的亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建的 OPC 应用于光纤链路的三信道 WDM 通信系统,OPC 前端的光纤传输距离为 105 km,OPC 后端的光纤传输距离为 115 km,它们间可增加若干光纤放大器 EDFA.

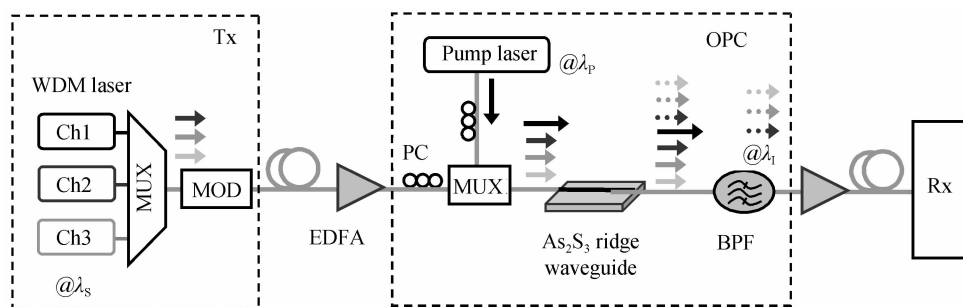
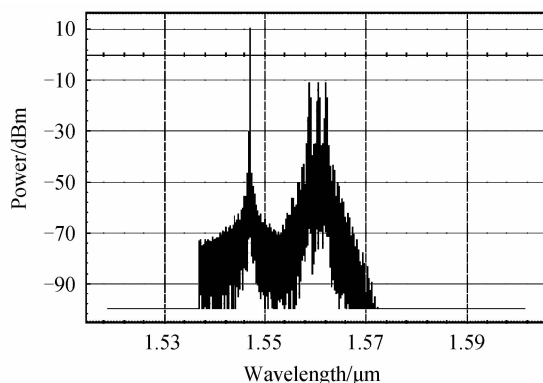


图 6 基于亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建的 OPC 应用于三信道 WDM 系统的示意图

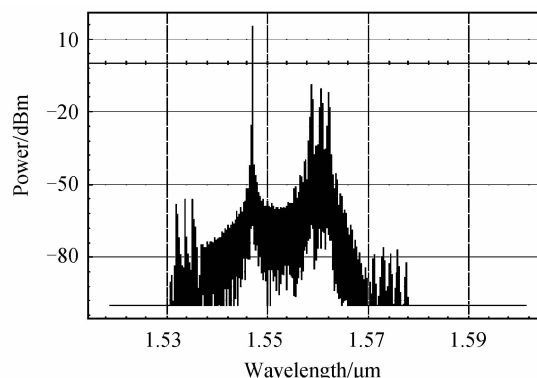
Fig. 6 The schematics of three-channel WDM system with OPC based on sub-micron As_2S_3 chalcogenide glass ridge waveguide

3.1 FWM 效应

信号光波 λ_s 经过亚微米 As_2S_3 脊形波导后,因三阶非线性效应引起的四波混频作用,会产生闲频光 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_P^{-1} - \lambda_s^{-1}$ 和 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_s^{-1} - \lambda_P^{-1}$. 实验仿真中选用信号光的波长分别为 1 559 nm、1 561 nm 和 1 563 nm,泵浦光的波长为 1 547 nm,得到的闲频光波长分别为



(a) The spectrum before As_2S_3 ridge waveguide



(b) The spectrum after As_2S_3 ridge waveguide

图 7 As_2S_3 硫系脊形波导实现 FWM 效应前后的光谱图
Fig. 7 The spectrum before and after the FWM effect performed in As_2S_3 chalcogenide glass ridge waveguide

1 535 nm、1 533 nm、1 531 nm(对应 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_P^{-1} - \lambda_s^{-1}$) 和 1 571 nm、1 575 nm、1 579 nm(对应 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_s^{-1} - \lambda_P^{-1}$). 图 7 是三信道信号光经过波分复用器(MUX)后

的沿光纤链传输 105 km 与泵浦光耦合后在亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导前后的光谱图. 在图 7 中可以得出实验仿真的结果与理论值吻合, 另外对应的 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_s^{-1} - \lambda_p^{-1}$ 闲频波可以忽略不计, 因其功率相对于 $\lambda_1^{-1} = 2\lambda_p^{-1} - \lambda_s^{-1}$ 的闲频波要小很多.

3.2 色散补偿

对 3×40 Gb/s WDM 系统的三个信道进行伪随机序列 RZ 编码, 图 8 是系统中放置 OPC 前后的眼图. 图 8 显示 WDM 系统中加入 OPC 后眼图质量比未加入

OPC 时质量要高, 而且抖动误差明显减小. 这说明 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建的 OPC 对系统的色散和非线性起到了有效抑制作用.

为了更好说明基于亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建的 OPC 对色散的补偿效果, 设计了单通道传输速率为 40Gb/s 的 16 位二进制序列经高斯编码后的单模光纤传输系统. 图 9 是光时域观测仪显示脉冲宽度变化情况的时域图. 图 9(a)是初始信号光, 图 9(b)是信号光经 30 km 光纤处传输后的信号, 图 9(c)是信号

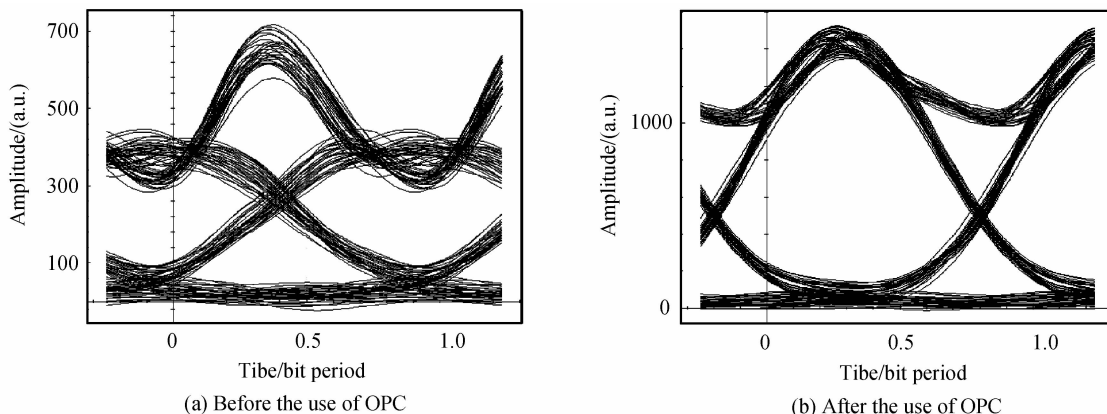


图 8 系统中放置 OPC 前后的眼图
Fig. 8 The eye diagram of the system before and after the use of OPC

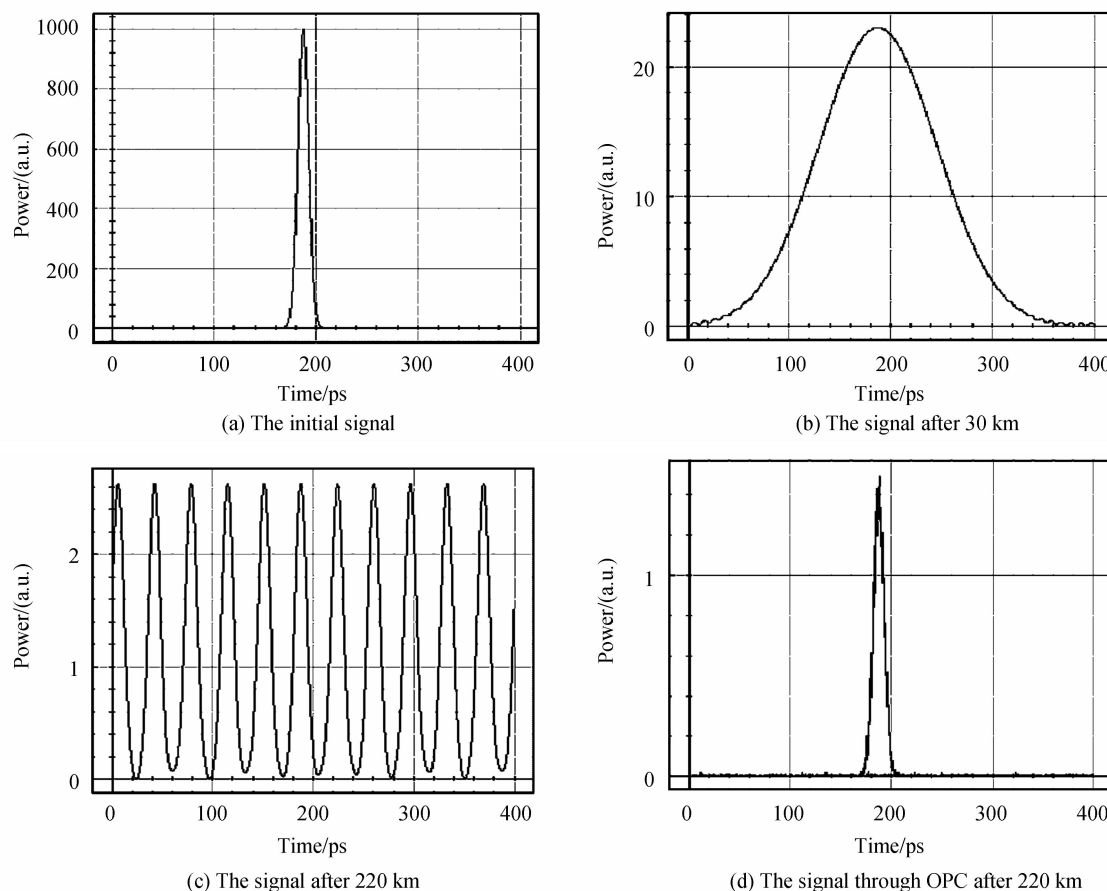


图 9 信号传输的时域图
Fig. 9 The time domain diagram of transmission signal

光经 220 km 光纤处传输后的信号,图 9(d)是信号光传输 220 km 后,经 OPC 后得到信号.图 9 的系列变化显示通过基于硫系玻璃波导构建的 OPC 可以将已经展宽了的信号处理得与初始信号的脉宽近乎相等,说明其能对 220 km 远距离传输进行有效的色散补偿.

4 结 论

本文设计仿真了亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导,在光通信波段内准 TM 模式下存在反常色散,通过调控波导结构参量,可以设置不同零色散波长位置;且同一脊宽和脊高下零色散波长位置随刻蚀深度的增加出现蓝移;选择合适的波导结构会出现两个零色散波长.如脊高 850 nm、脊宽 1 000 nm、刻蚀深度 350 nm 时,准 TM 模式下两个零色散波长分别为 1 510 nm 和 1 746 nm,波长 1 550 nm 处的色散值为 $-28.62 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$;改变脊宽为 800 nm、刻蚀深度为 400 nm 时,准 TM 模式下两个零色散波长分别为 1 548 nm 和 1 685 nm,波长 1 550 nm 处的色散值为 $-1.81 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$.在此基础上,由具有高非线性反常波导色散的亚微米 As_2S_3 硫系玻璃脊形波导构建 OPC,补偿其材料色散,使零色散值在 1 550 nm 波长附近.将构建的 OPC 应用于 220 km 远距离光纤链路的 $3 \times 40 \text{ Gb/s}$ 的 WDM 系统中(信道间隔为 200 GHz),实现了 FWM 效应,并对整个系统提供了有效的色散补偿.

参 考 文 献

- [1] LIU Q, GAN F. Photodarkening in amorphous As_2S_3 thin films[J]. *Chinese Physics Letters*, 2002, **19**(1): 124-126.
- [2] ZOU L E, CHEN B X, CHEN L, *et al.* Fabrication of an As_2S_8 stripe waveguide with an optical stopping effect by exposure to ultraviolet irradiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(15): 3510-3.
- [3] HE Yu-ju, NIE Qiu-hua, SUN Jie, *et al.* Novel Ge-Te-I far-infrared-transmitting chalcogenide glasses system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):1307-1311.
何钰钜, 聂秋华, 孙杰, 等. 新型远红外 Ge-Te-I 硫系玻璃性能研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(9):1307-1311.
- [4] ZOU Lin-er, CHEN Bao-xue, DU Li-ping, *et al.* Study on photoinduced structural changes effect of amorphous semiconductor As_2S_8 film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):1001-1005.
邹林儿, 陈抱雪, 杜丽萍, 等. 非晶态 As_2S_8 半导体薄膜的光致结构变化效应研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(5):1001-1005.
- [5] EGGLETON B J, LUTHER-DAVIES B, RICHARDSON K. Chalcogenide photonics[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(3): 141-148.
- [6] RUAN Y, LUTHER-DAVIES B, LI W, *et al.* Large phase shifts in As_2S_3 waveguides for all-optical processing devices [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19): 2605-2607.
- [7] ZOU L E, KABAKOVA I V, MÄGI E C, *et al.* Efficient inscription of Bragg gratings in As_2S_3 fibers using near bandgap light[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(19): 3850-3853.
- [8] TA'EEED V G, SHOKOOH-SAREMI M, FU L, *et al.* Self-Phase modulation-based integrated optical regeneration in chalcogenide waveguides [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(3): 360-370.
- [9] TA'EEED V G, LAMONT M R E, MOSS D J, *et al.* All optical wavelength conversion via cross phase modulation in chalcogenide glass rib waveguides[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(23): 11242-11247.
- [10] GAO F, PANT R, LI E, *et al.* On-chip high sensitivity laser frequency sensing with Brillouin mutually-modulated cross-gain modulation[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(7): 8605-8613.
- [11] LE S D, NGUYEN D M, THUAL M, *et al.* Efficient four-wave mixing in an ultra-highly nonlinear suspended-core chalcogenide $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$ fiber[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(26): B653-B660.
- [12] FOSTER M A, TURNER A C, SHARPING J E, *et al.* Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. *Nature*, 2006, **441**(7096): 960-963.
- [13] PASQUAZI A, AHMAD R, ROCHETTE M, *et al.* All-optical wavelength conversion in an integrated ring resonator [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(4): 3858-3863.
- [14] JOPSON R M, RADIC S, MCKINSTRIE C J, *et al.* Wavelength division multiplexed transmission over standard single mode fiber using polarization insensitive signal conjugation in highly nonlinear optical fiber[C]. Proceeding of OFC. 2003.
- [15] JANSEN S L, VAN DEN BORNE D, KRUMMRICH P M, *et al.* Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(4): 505-520.
- [16] TURNER A C, MANOLATOU C, SCHMIDT B S, *et al.* Tailored anomalous group-velocity dispersion in silicon channel waveguides [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(10): 4357-4362.
- [17] MATHLOUTHI W, RONG H, PANICCIA M. Characterization of efficient wavelength conversion by four-wave mixing in sub-micron silicon waveguides [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(21): 16735-16745.
- [18] LIN Q, ZHANG J D, FAUCHET P M, *et al.* Ultrabroadband parametric generation and wavelength conversion in silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(11): 4786-4799.
- [19] ASOBE M, KANAMORI T, NAGANUMA K, *et al.* Third-Order Nonlinear Spectroscopy in As_2S_3 Chalcogenide Glass-Fibers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **77**(11): 5518-5523.
- [20] PELUSI M D, LUAN F, MAGI E, *et al.* High bit rate all-optical signal processing in a fiber photonic wire[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(15): 11506-11512.
- [21] CHAUDHARI C, SUZUKI T, OHISHI Y. Design of zero chromatic dispersion chalcogenide As_2S_3 glass nanofibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(12): 2095-2099.
- [22] LI Min, LIAO Yan-biao, SHI Chun-zheng. Dispersion characteristics of single mode As_2S_3 fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 171-173.
黎敏, 廖延彪, 施纯峥. 单模硫系光纤色散特性分析[J]. 光子学报, 2000, **29**(2):171-173.