

Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ 硫系脊形光波导的色散特性

刘 珊 沈 祥* 徐铁峰 陈 昱 陈 芬 李 军 戴世勋 聂秋华

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要 采用有限差分方法计算出 Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ 脊形波导的有效模式折射率, 系统地分析了 1550 nm 光通信波长上的波导准 TM 基模的群速度色散特性与波导关键结构参数之间的关系。大量模拟结果表明: 较大的材料色散可以通过设计亚微米波导结构得到降低。在脊宽和脊高分别控制在 500~900 nm 和 400~1000 nm 范围内的情况下, 通过增大波导的刻蚀深度能获得零色散甚至反常色散。另外, 波导脊高变化比脊宽变化对色散的影响更大。研究结果为应用于非线性全光器件的硫系光波导提供了尺寸设计和色散管理的依据, 对用于全光信号处理的硫系玻璃光波导器件的设计具有一定的参考价值。

关键词 集成光学; 群速度色散; 有限差分法; 硫系玻璃; 非线性光器件

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0513001

Dispersion Characteristics of Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ Chalcogenide Rib Waveguides

Liu Shan Shen Xiang Xu Tiefeng Chen Yu Chen Fen Li Jun

Dai Shixun Nie Qiuhua

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract The model effective index for Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ rib waveguides are calculated using the finite difference method. The group velocity dispersion properties of the quasi-TM single polarization of waveguides are systematically studied around the optical fiber communication wavelength (1550 nm), and their relationship with the key structural parameters of the waveguide is also studied. Extensive simulation results show that the larger material dispersion can be reduced through the design of sub-micron waveguide structure. The rib width and height are controlled in the range of 500~900 nm and 400~1000 nm, respectively, zero dispersion or anomalous dispersion can be obtained by increasing the etched depth. In addition, the impact of rib width on dispersion is less obvious than that of rib height. The investigation results provide the basis of the size design and dispersion management for the chalcogenide optical waveguide applied to nonlinear all-optical devices. The results have some reference value to the design of chalcogenide glass optical waveguide devices used in all-optical signal processing.

Key words integrated optics; group velocity dispersion; finite difference method; chalcogenide glass; nonlinear optical devices

OCIS codes 160.4330; 230.7370; 260.2030; 310.6845

1 引 言

近年来, 光电信号转换能力的滞后和电子线路速度的限制已成为制约信息传输的瓶颈问题, 解决

此问题的关键是开发新型非线性超快光子学器件以推动全光网络的发展, 而器件微型化、高度集成化是大容量超高速全光通信的必然发展趋势^[1]。随着超

收稿日期: 2012-12-24; **收到修改稿日期**: 2013-01-17

基金项目: 国家科技部重大国际合作项目(2011DFA12040)、国家 973 计划(2012CB722703)、国家自然科学基金(61008041, 60978058)、宁波市自然科学基金(2011A610092)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

作者简介: 刘 珊(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事硫系玻璃脊形光波导超快非线性方面的研究。

E-mail: liushan9808@163.com

导师简介: 徐铁峰(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术、特种玻璃光纤、红外光学材料和红外信息系统等方面的研究。E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: shenxiang@nbu.edu.cn

快全光网络的发展以及光器件集成度的不断提高,波导已进入亚微米甚至纳米级尺度,此时色散在光脉冲传输过程中的影响已不能忽略。当色散长度和非线性长度可与波导传输长度相比拟时,光脉冲在波导中的传输有可能受群速度色散(GVD)和非线性效应[如自相位调制(SPM)]共同作用,从而产生许多新的光学现象。例如,在波导的反常色散区,GVD与SPM共同作用导致光孤子现象的产生,使波导中传输脉冲形状保持不变^[2]。在波导的正常色散区,GVD与SPM共同作用引起频谱展宽,有利于光通信中的全光再生^[3,4]。而在波导的近零反常色散区,容易使信号光满足相位匹配条件而产生四波混频(FWM)效应^[5],从而获得高效的波长转换^[6,7]。由此可见对波导进行色散管理在非线性光学应用中具有非常重要的意义。此外,在不同的色散特性作用下还可实现超连续谱^[8~10]的产生。

色散为材料色散和波导色散之和。对于确定的材料,色散只来源于波导色散。光在波导传输过程中传播模式与波导的结构有关。通过改变脊形光波导的结构如脊高、脊宽和刻蚀深度等参数就能获得不同频率的模传播常数,这为管理色散提供了可能性。目前在用于制作平面集成波导器件的材料中,硅基和石英基作为集成光学和光电子学的理想平台得到了广泛的研究,硅基材料虽然在制作工艺上和光电子集成电路兼容,并能够与ITU-T标准单模光纤实现很好的模式匹配,但是受材料本身的非线性特性所限^[11,12],难以顺应未来超快非线性光器件微型化、集成化的发展趋势。相比之下,硫系玻璃具有超高的非线性折射率系数 n_2 ($n_2 = 2 \sim 20 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$,为石英材料的100~1000倍^[13])、超快的非线性响应时间(小于200 fs)、可忽略的光生载流子效应和较小的双光子吸收^[12]、与目前半导体工艺兼容等特点^[14~16],已成为超快全光信号处理集成光子芯片理想的基质平台之一^[17]。以澳大利亚CUDOS为代表的研究机构在基于高非线性硫系玻璃波导的全光信号处理上做出了大量创新性的研究工作^[3,18~23],但国内在硫系玻璃的光波导器件设计及制备研究方面基本是空白。

研究 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃脊形光波导的色散特性,给出了材料的Sellmerier方程,并用有限差分法计算了不同结构下波导的有效模式折射率,通过模式折射率分析了脊形光波导的色散与结构之间的关系,该研究工作为后面进一步研究和制备非线性硫系玻璃脊形光波导提供了理论依据。

2 理论分析

脊形波导横截面结构如图1所示,脊形波导结构设计参数包括脊宽 W 、脊高 H 和刻蚀深度 h ,定义采用归一化刻蚀深度 r ,即刻蚀的深度与整个薄膜厚度 H 之比 $r = h/H$ 代替刻蚀深度 h 。当 $r = 1$ 时,介质波导相当于条形波导,否则为脊形波导。选用石英($n_{\text{SiO}_2} = 1.44, \lambda = 1550 \text{ nm}$ 时,下同)为脊形波导的衬底材料、 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃薄膜($n_{\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}} = 2.7065$)为导波芯层、空气($n_{\text{air}} = 1$)为包层。假设衬底和包层厚度为无限厚,从而降低光模式泄漏的可能性。

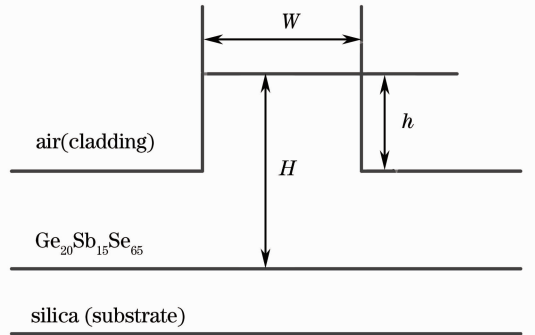


图1 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 脊形光波导横截面示意图

Fig. 1 Structure of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ rib optical waveguide cross-section

一般来说,材料色散的来源与介质通过束缚电子振荡吸收电磁辐射的特征谐振波长有关,当远离介质谐振波长时,折射率可用Sellmerier公式很好地近似^[24]:

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

式中 n 为材料折射率, λ 为波长(nm),系数 B_j 和 λ_j 与薄膜材料成分有关。为了研究 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 材料的色散特性,利用磁控溅射法制备了 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃薄膜,具体制备工艺见文献^[25]。采用薄膜综合参数测量仪(FilmTek 4000)测试其700~1700 nm波段范围薄膜样品的折射率变化曲线,如图2所示。实验上通过取(1)式的 $m=3$ 与测得的折射率曲线拟合获得 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃的Sellmerier系数分别为 $B_1 = 1.67511, B_2 = 4.00553, B_3 = 0.37981$,相应参考波长为 $\lambda_1 = 289.7789 \text{ nm}, \lambda_2 = 289.8416 \text{ nm}, \lambda_3 = 568.7939 \text{ nm}$ 。由于光波不可避免有部分能量在衬底层传输,为了获得更精确的高阶色散效应,有必要考虑石英衬底的材料色散。石英材料的Sellmerier系数分别为 $B_1 = 0.6961663, B_2 = 0.4079426$ 和 $B_3 = 0.8974794$,相应参考波长 $\lambda_1 = 68.404 \text{ nm}, \lambda_2 = 116.2414 \text{ nm}$ 和 $\lambda_3 = 9896.1663 \text{ nm}$ ^[24]。

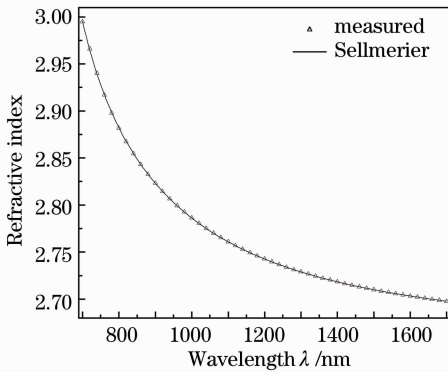


图2 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 薄膜折射率与波长的关系曲线
Fig. 2 Relation curves between refractive index of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ film and wavelength

3 色散特性分析与讨论

在弱限制光波导中,色散主要来源于材料色散,但是在亚微米尺寸的限制波导结构中,波导色散占主要地位。因此,通过合理设计脊形波导的结构,可以获得零色散甚至反常色散。为方便分析色散特性,用参量 β_2 来表示 GVD 系数:

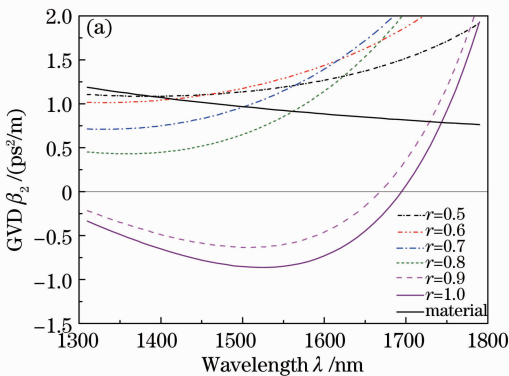
$$\beta_2(\lambda) = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (2)$$

式中 n_{eff} 为利用有限差分方法计算获得的有效折射率, λ 为中心波长, c 为真空中的光速。

以准 TM 基模为研究对象,系统研究了 β_2 与脊形波导 W 、 H 和 r 各参数之间的关系,并用材料折射率代替(2)式中的有效折射率,拟合得到 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃的材料色散。

3.1 脊形波导总色散与波长的关系

图 3 给出了 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃光波导在不同 r 下 β_2 与波长的关系曲线,并与材料色散(黑实



线)进行比较。当色散参量 $\beta_2 > 0$ 时称为正常色散,当 $\beta_2 < 0$ 时称为反常色散。从图 3 中可以看出,在 1300~1800 nm 波长范围内 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃具有较大的正常材料色散,并且材料色散随着波长的增加逐渐减小。因为 r 非常小时,脊形波导会表现出非常大的正常色散,所以,本节将讨论 r 在 0.5~1.0 范围内变化产生的色散效应。设定波导尺寸 $W=H=500$ nm,并研究 1300~1800 nm 波长范围内 r 对色散的影响,如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,当 r 相对较小时,该光谱范围内的色散完全表现为正常色散。随着 r 增加到 0.9 时,在 1670 nm 波长附近出现了零色散点,对应波长称为零色散波长(ZDWL) λ_0 ; r 继续增大到 1 时,可以看出 $\lambda_0 = 1700$ nm。由此可以得出, λ_0 随着刻蚀深度的增加往长波方向移动。同时,材料色散与总色散之间有相交的点,表明该点处的波导色散为零。而不同刻蚀深度下的色散曲线之间有相交点,意味着不同的刻蚀深度在某一定的波长下,有可能产生相同的色散效应。

另外,由图 3(a)可以看出,在 1550 nm 通信波长上色散与 r 的关系。色散随着 r 的增加往零色散区域变化,甚至出现了反常色散,表明波导对光限制的能力随着 r 的增大而增强。随刻蚀深度的改变,色散在正常色散与反常色散之间有相应的变化,这满足前文提到过的许多非线性光学应用的要求。

当 W 从 500 nm 增加到 600 nm[图 3(b)]时,色散与 r 的变化关系和图 3(a)相似。但总色散在 1300~1800 nm 光谱范围内有所下降。另外,同刻蚀深度的变化一样,脊宽的增加也能使 λ_0 往长波方向移动。基于以上分析可知,波导结构参量对色散

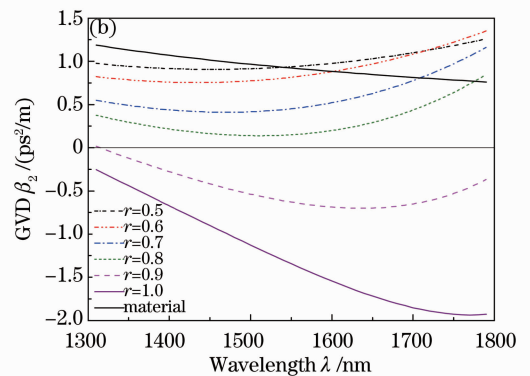


图 3 在不同 r 下,波导 β_2 与波长的关系曲线,黑实线为材料色散。(a) $H=500$ nm, $W=500$ nm;
(b) $H=500$ nm, $W=600$ nm

Fig. 3 Relation curves between waveguide β_2 and wavelength with different r . The black lines represent the material dispersion. (a) $H=500$ nm, $W=500$ nm; (b) $H=500$ nm, $W=600$ nm

特性的影响非常大。

3.2 通信波段色散与脊形波导脊宽关系

图 4 分别给出了 H 为 400 nm 和 500 nm, r 在 0.5~1.0 范围内变化时, 1550 nm 光通信波长上 β_2 与 W 的关系曲线。如图 4(a) 所示, 当 $H=400$ nm 时, 对于 $r=1$ 而言, 其 β_2 在 $-1 \sim 13$ ps²/m 之间变化, 并在 $W=600$ nm 时 β_2 达到负的最大值(约 -1 ps²/m)。当 $W < 600$ nm 时色散从正常色散往反常色散变化, 且下降速度极快; 当 $W > 600$ nm 时色散从反常色散逐渐向正常色散变化, 并趋近于硫系玻璃的材料色散。另外, 从图 4(a) 可以观察到, 条形波导在 W 为 480 nm 和 900 nm 两处存在近零色散。因此, 当脊宽在 480~900 nm 范围内时, 可以通过改变刻蚀深度来剪裁总色散, 色散随着 r 的减小往正常色散方向移动, 然后逐渐趋近于硫系玻璃

的材料色散。

此外, 最大的正常色散随着刻蚀深度的增大而变大, 因为 SPM 和较大正常色散联合作用有利于光谱展宽, 这对设计 2R 全光再生器来说非常重要。而足够深的刻蚀深度才能使色散向零色散或反常色散区域变化。

为证明上述结论的正确性, 重复上述过程, 研究在 $H=500$ nm 尺寸下的色散与波导脊宽的关系, 结果如图 4(b) 所示。在相同的归一化刻蚀深度 r 下, 随脊宽增大色散也有类似于条形波导的色散变化趋势。但 H 的增加导致最大的色散系数急剧下降, 从而使色散变化范围相对缩小。另外, 对图 4(a) 和图 4(b) 中 $r=1$ 、 $W=400$ nm 的色散进行比较发现, 脊高增大明显引起了色散减小。

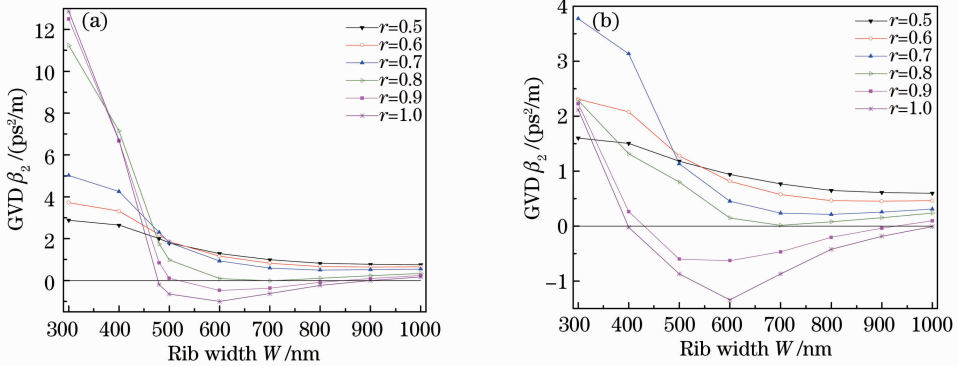


图 4 在 1550 nm 波长和不同 r 下, β_2 与 W 的关系曲线。(a) $H=400$ nm; (b) $H=500$ nm

Fig. 4 Relation curves between β_2 and W with different r at 1550 nm. (a) $H=400$ nm; (b) $H=500$ nm

3.3 通信波段色散与脊形波导脊高关系

作为一个完整的研究, 利用相同的方法研究了 H 对色散的影响。因为从传统的掩膜版制作工艺上来看, 一般采用紫外曝光($\lambda=365$ nm)等方法制作掩模, 所以使得脊宽过窄, 这很容易引起光衍射, 从而难以保证脊宽的精度。基于这一点, 研究了 W

分别为 500 nm 和 600 nm 条件下, r 为 0.5~1.0 时, 在 1550 nm 波长处色散与 H 的关系, 结果如图 5 所示。随着 H 的增加, 色散的变化与改变 W 一样, 有相似的变化趋势, 但变化范围相对缩小。另外, 对比 W 在 500 nm [图 5(a)] 和 600 nm [图 5(b)] 的色散变化发现, 脊宽增大同样引起了色散减小, 也

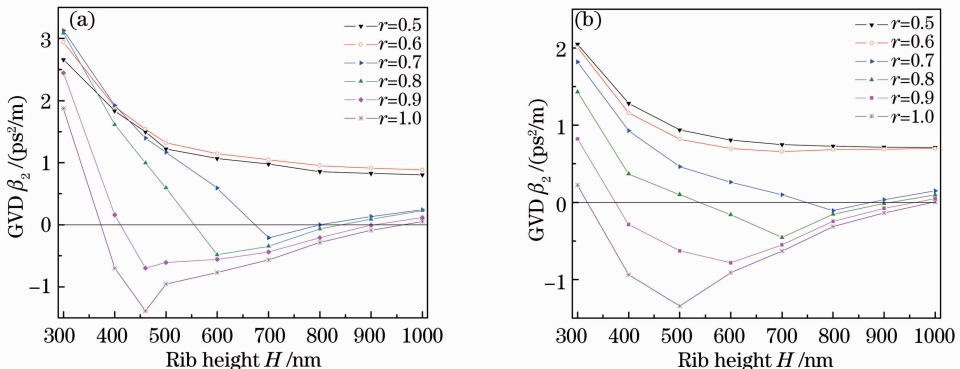


图 5 在 1550 nm 波长和不同 r 下, β_2 与 H 的关系曲线。(a) $W=500$ nm; (b) $W=600$ nm

Fig. 5 Relation curves between β_2 and H with different r at 1550 nm. (a) $W=500$ nm; (b) $W=600$ nm

与前一节描述的变化特性相符。但是脊宽改变引起的色散的变化没有脊高变化引起的色散变化明显,这表明脊宽的变化对色散的影响没有脊高变化对色散的影响大。因此可以得出通过改变 H 能在一个比较大的范围内有效调节波导的色散变化的结论。

综上所述,波导的色散与结构的关系非常复杂,并非所有的脊形波导都可以通过改变刻蚀深度实现色散剪裁。图 4 和图 5 表明,只有当波导脊宽 500~900 nm、脊高在 400~1000 nm 范围内变化时,才能通过改变波导的刻蚀深度实现色散从正常色散向零色散或反常色散变化。因此可满足前文提到过的非线性应用。

4 结 论

利用有限差分法获得 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃脊形波导准 TM 基模的折射率,进而对波导的色散特性进行了数值模拟研究,得到了波导在 1300~1800 nm 波长范围内色散与波长的关系。结果表明,随着波长的增加,色散逐渐趋近于硫系玻璃的材料色散。重点研究在 1550 nm 光通信波长上波导脊宽 W 、脊高 H 以及刻蚀深度 h 等参量对色散的影响。结果表明,通过设计微纳米尺寸脊形波导可以降低波导的材料色散。将 W 控制在 500~900 nm 和控制 H 在 400~1000 nm 范围内,通过改变波导的刻蚀深度能很好地实现零色散和反常色散。对通信波段上波导的色散特性进行管理,这对于全光信号处理中的非线性应用来说非常重要。该研究结果将为用于全光信号处理的硫系玻璃光波导器件的设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0813001
高原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0813001
- L. Yin, Q. Lin, G. P. Agrawal. Dispersion tailoring and soliton propagation in silicon waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1295~1297
- Vahid G. Ta'eed, M. Shokooh-Saremi, L. Fu *et al.*. Integrated all-optical pulse regenerator in chalcogenide waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2900~2902
- Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju *et al.*. 2×40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four-wave mixing in dispersion shifted [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0806004
孟天晖, 于晋龙, 王 菊等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0806004
- F. Luan, M. D. Pelusi, M. R. E. Lamont *et al.*. Dispersion

- engineered As_2S_3 planar waveguides for broadband four-wave mixing based wavelength conversion of 40 Gb/s signals[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3514~3520
- Y. -H. Kuo, H. Rong, V. Sih *et al.*. Demonstration of wavelength conversion at 40 Gb/s data rate in silicon waveguides [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11721~11726
- H. Rong, Y. -H. Kuo, A. Liu *et al.*. High efficiency wavelength conversion of 10 Gb/s data in silicon waveguides[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1182~1188
- Chen Haihuan, Chen Zilun, Zhou Xuanfeng *et al.*. Numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s2): s205002
陈海寰, 陈子伦, 周旋风等. 双零色散波长光子晶体光纤中产生超连续谱的数值模拟[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s2): s205002
- X. Gai, D. Y. Choi, S. Madden *et al.*. Supercontinuum generation in the mid-infrared from a dispersion-engineered As_2S_3 glass rib waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3870~3872
- Wang Yanbin, Hou Jing, Liang Dongming *et al.*. Study of supercontinuum generation in the normal-dispersion regime of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1073~2077
王彦斌, 侯 静, 梁冬明等. 光子晶体光纤正常色散区超连续谱产生的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1073~2077
- X. Gai, S. Madden, D. Y. Choi *et al.*. Dispersion engineered $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ nanowires with a nonlinear parameter of 136 $\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ at 1550 nm[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18866~18874
- A. Zakery, S. R. Elliott. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review[J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 2003, **330**(1-3): 1~12
- Fan Xinye, Xu Tiefeng, Shen Xiang *et al.*. Third order nonlinear optical properties of $\text{GeS}_2\text{-Ga}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-AgCl}$ glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 210~213
范鑫烨, 徐铁峰, 沈 祥等. $\text{GeS}_2\text{-Ga}_2\text{S}_3\text{-Sb}_2\text{S}_3\text{-AgCl}$ 玻璃的三阶非线性光学特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 210~213
- J. T. Gopinath, M. Soljačić, E. P. Ippen *et al.*. Third order nonlinearities in Ge-As-Se-based glasses for telecommunications applications[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(11): 6931~6933
- C. Quémar, F. Smektala, V. Couderc *et al.*. Chalcogenide glasses with high non linear optical properties for telecommunications[J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2001, **62**(8): 1435~1440
- Chen Yu, Shen Xiang, Xu Tiefeng *et al.*. Research progress of chalcogenide glass waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 111301
陈 昱, 沈 祥, 徐铁峰等. 硫系玻璃光波导研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 111301
- X. Gai, T. Han, A. Prasad *et al.*. Progress in optical waveguides fabricated from chalcogenide glasses [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26635~26646
- X. Gai, R. P. Wang, C. Xiong *et al.*. Near-zero anomalous dispersion $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ glass nanowires for correlated photon pair generation: design and analysis[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(2): 776~786
- M. Gallili, J. Xu, H. C. Mulvad *et al.*. Breakthrough switching speed with an all-optical chalcogenide glass chip: 640 Gbit/s demultiplexing[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2182~2187
- M. Lamont, V. Ta'eed, M. Roelens *et al.*. Error-free wavelength conversion via cross-phase modulation in 5 cm of As_2S_3 chalcogenide glass rib waveguide [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(17): 945~947
- V. G. Ta'eed, M. R. E. Lamont, D. J. Moss *et al.*. All optical wavelength conversion via cross phase modulation in chalcogenide glass rib waveguides [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 11242~11247

- 22 S. Madden, D. Y. Choi, D. Bulla *et al.*. Long, low loss etched As_2S_3 chalcogenide waveguides for all-optical signal regeneration [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14414~14421
- 23 V. G. Ta'eed, M. D. Pelusi, B. J. Eggleton *et al.*. All-optical wavelength conversion of 80 Gb/s signal in highly nonlinear serpentine chalcogenide planar waveguides [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2008, OMP2
- 24 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 6~7
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方等译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 6~7
- 25 Y. Chen, X. Shen, R. Wang *et al.*. Optical and structural properties of Ge-Sb-Se thin films fabricated by sputtering and thermal evaporation [J]. *J. Alloys Compd.*, 2013, **548**: 155~160

栏目编辑: 韩 峰