

文章编号:1004-4213(2010)03-0417-6

硅狭缝光波导的色散特性及其色散补偿应用的研究

杨纪超, 宋牟平[†]

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要:对硅狭缝光波导色散特性进行了数值研究. 研究表明, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 工作波长附近, 硅狭缝光波导色散随结构参量的改变而改变, 一般在 $-1\ 000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 以下, 最大可达到 $-6\ 700 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 左右, 同时其相对色散斜率可小于 0.009 nm^{-1} . 因此, 选取合适的结构参量, 硅狭缝光波导可被用于补偿高速宽带光通信链路的残余色散, 且比现有的色散补偿光纤具有一定的优势.

关键词:光波导; 狭缝; 硅; 色散特性; 色散补偿

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0417

0 引言

随着人们对通信速度要求的不断提高, 光通信系统的传输速度和通道数也在不断增加. 在高速多路波分复用光通信系统中, 色散是限制信号传输速度的一个重要原因, 因此色散补偿是光通信系统中的一项关键技术. 现在有一些比较成熟的色散补偿方法, 例如光子晶体光纤色散补偿技术^[1-3], 电子色散补偿技术^[4]和光纤光栅色散补偿技术^[5-6]. 但是, 色散补偿光纤可补偿的波长范围宽, 但损耗大; 色散补偿光栅损耗小, 但光谱通带很小. 这些都不能很好满足高速多路波分复用光通信系统的色散补偿要求, 现仍在寻找更好的色散补偿的方案. 例如使用混合纤芯光子晶体光纤达到超平坦色散^[7]等等, 另外使用可集成的光波导结构也是研究方向之一.

2004 年, 一种新的光波导结构被提出, 这种光波导结构被称为硅狭缝(Slot)光波导^[8]. 其理论传输损耗要小于传统光波导, 可实现长波导光传输. 其是由高折射率差介质构成的, 所以其不具有严格的横电场(TE)或横磁场(TM)模, 没有严格的模式场解析解. 本文采用有限元(Finite Element Method, FEM)的方法, 对硅狭缝波导模式场进行详细的数值求解, 研究表明该波导具有准 TE 模, 并且, 截面参量不同时, 其具有不同的色散曲线, 其中一些色散曲线的相对色散斜率小于 0.009 nm^{-1} , 从而使得硅狭缝波导可以被应用于高速多路波分复用光通信系统的残余色散补偿.

1 理论模型

硅狭缝光波导的结构如图 1, 低折射率介质(SiO_2)狭缝被嵌在两块高折射率介质(Si)之间. 由麦克斯韦方程可知, 为了满足电位移的连续性, 在两介质的交界面, 电场强度必然是不连续的, 低折射率介质中的电场强度大于高折射率介质中的电场强度, 如果狭缝的宽度达到纳米级别, 则光可以被限制在这低折射率狭缝中传输.

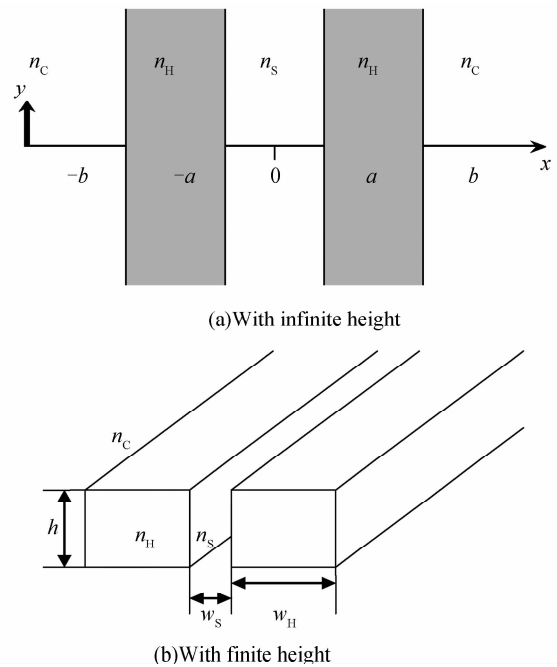


图 1 狭缝波导结构图解

Fig. 1 Schematic of the slot waveguide structure

当高折射率介质的高度无限时, 如图 1(a), 狭缝光波导可以工作在一个 TM 模的单模状态, 其横向 x 方向的电场 E_x 的解析解可以由式(1)得出.

[†] Tel: 0571-87951699

Email: songmp@zju.edu.cn

收稿日期: 2009-10-23

修回日期: 2009-11-06

$$E_x(x) = \begin{cases} A \cosh(\gamma_s x) / n^2 & |x| < a \\ A [\cosh(\gamma_s a) \cos[k_H(|x| - a)] / n_H^2 + \gamma_s \sinh[k_H(|x| - a)] / n_s^2 k_H] & a < |x| < b \\ A [\cosh(\gamma_s a) \cos[k_H(b - a)] + n_H^2 \gamma_s \sinh(\gamma_s a) \sin[k_H(b - a)] / n_s^2 k_H] e^{-\gamma_c(|x| - b)} / n_c^2 & |x| > b \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_H 是高折射率介质中的横向波数, γ_c 是包层的场衰减系数, γ_s 是狭缝的场衰减系数, 常数 A 由式(2)定义

$$A = A_0 \sqrt{k_0^2 n_H^2 - k_H^2} / k_0 \quad (2)$$

式中, A_0 是任意常数. 以上参量满足公式(3)

$$k_0^2 n_H^2 - k_H^2 = k_0^2 n_s^2 - \gamma_s^2 = \beta^2 \quad (3)$$

式中, β 是该模式的传播常数.

从公式(1)中可以看出, 狭缝和高折射率介质交界处, 狭缝一边的电场是高折射率介质一边电场的 n_H^2/n_s^2 倍.

当厚板的高度不是无限的时候, 如图 1(b). 由于硅狭缝光波导是高折射率差介质构成的波导, 因此, 其不存在严格的 TE 或 TM 模. 下述的数值计算表明, 其可以工作在一个准 TE 模的单模状态.

2 波导仿真分析

有限元方法是研究光波导模式场比较常用的方法^[9]. 本文根据狭缝光波导的结构模型, 针对不同的狭缝宽度、硅介质宽度和高度, 使用有限元方法进行了数值计算仿真, 得到了不同结构参量下的模式场和色散曲线^[9], 其中色散包括了材料色散和波导色散. 在以下计算中, 狭缝光波导都处于单模(准 TE 模)工作状态下.

2.1 模式和色散

根据参考文献[8]中给出的硅狭缝光波导模型, 取各参量值为: $n_c = n_s$, 为二氧化硅折射率(约 1.45); 为硅折射率(约 3.45); $h = 300$ nm; $w_H = 180$ nm; $w_s = 50$ nm. 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下的模式如图 2, 可以看出, 硅介质外侧存在部分的横向场强, 硅介质中横向场强相对较弱, 而狭缝中的横向场强最强. 说明两硅介质的模式场发生了相互作用, 光信号被限制在狭缝中, 从而形成了狭缝波导的模式场.

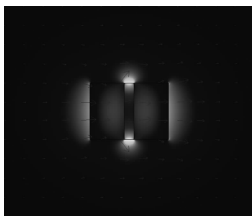


图 2 准 TE 模横向电场

Fig. 2 Transverse E-field profile of the quasi-TE mode

经过计算, 可以得到上述硅狭缝光波导在光波长为 $1.45 \mu\text{m}$ 到 $1.65 \mu\text{m}$ 之间的色散曲线, 如图 3.

该曲线的拐点在 1.520 nm 处, 当波长大于 1.520 nm, 曲线单调减少, 色散值为负.

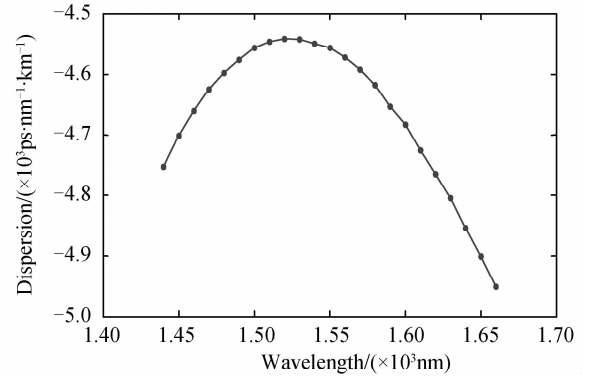


图 3 硅狭缝光波导色散曲线图

Fig. 3 The dispersion curve of the silicon slot waveguide

2.2 结构参量的改变

光波导的模式场和色散特性都随波导结构参量的变化而变化, 下面分别改变狭缝的宽度, 硅介质的宽度和高度, 来研究模式场和色散曲线的变化规律.

2.2.1 改变狭缝宽度

当狭缝宽度分别为 20 nm、 80 nm、 110 nm 和 140 nm 的情况下, 硅狭缝光波导在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长时的模式场如图 4.

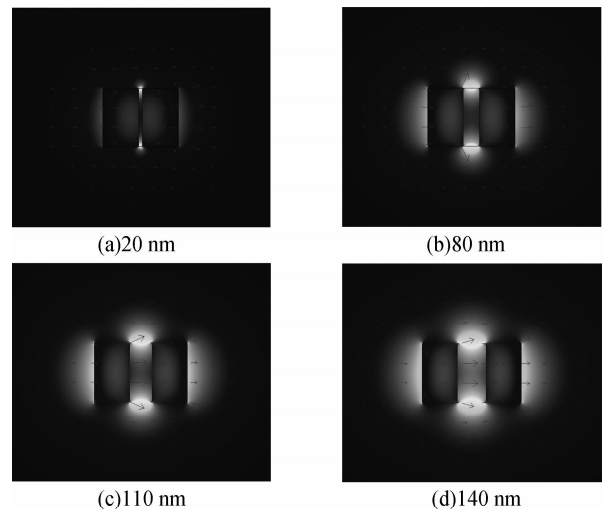


图 4 不同狭缝宽度的模式场

Fig. 4 The mode figures with different slot width

可以看出, 随着狭缝的展宽, 在硅波导的外侧横向场强逐渐变大, 狭缝内的场强有所减小. 这是因为, 随着狭缝的逐渐展宽, 两硅介质模式场的相互作用逐渐减弱, 狭缝对光信号的约束能力也就逐渐减弱. 当狭缝的宽度达到一定程度时, 两硅介质模式场之间的相互作用将消失, 该模型趋近于两个平行的硅波导.

不同狭缝宽度下,模式场在狭缝中的光能量的归一化值,如图 5.

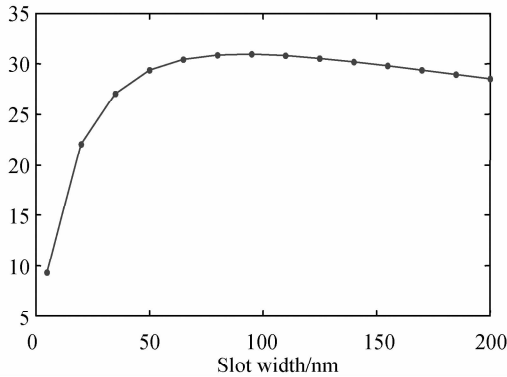


图 5 不同狭缝宽度的归一化光能值
Fig. 5 Normalized optical power in slot with different slot width

可以看出在只改变狭缝宽度的情况下,当狭缝宽度从 5 nm 增加到 50 nm,狭缝中的归一化光能显著增加;当狭缝宽度在 50 nm 以上时,狭缝中的归一化光能保持在一个比较稳定的范围.由图 4 可知,这是因为随着狭缝宽度的增加,有更多的能量可以从狭缝中通过;但是当狭缝展宽到一定程度之后,两硅波导模式场的相互作用减弱,狭缝中通过的能量小幅下降.

狭缝宽度变化时的色散曲线如图 6.从图中可以看出:当狭缝宽度小于 50 nm 时,色散曲线单调下降;当狭缝宽度为 50 nm 时,色散曲线呈弧状;当狭缝宽度大于 50 nm 时,色散曲线单调上升.随着狭缝宽度的增加,同一波长下的色散绝对值不断增加.

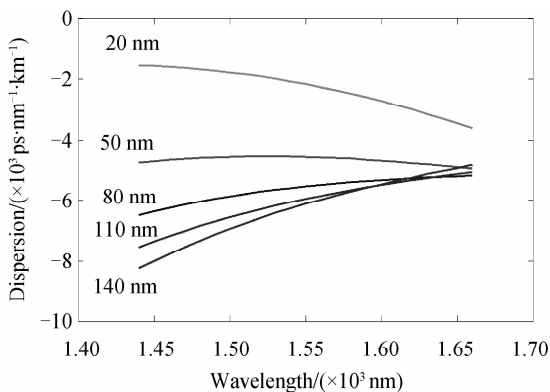


图 6 不同狭缝宽度的硅狭缝光波导色散曲线
Fig. 6 The dispersion curves with different slot width

2. 2. 2 改变硅介质高度

当硅介质高度在 210 nm、270 nm、330 nm 和 450 nm 的情况下,硅狭缝光波导在 1.55 μm 波长处的模式场如图 7.

可以看出,随着硅介质高度的增加,硅介质外侧的横向电场强度逐渐减小.这是因为,随着狭缝高度的增加,更多的光信号被限制在狭缝中.

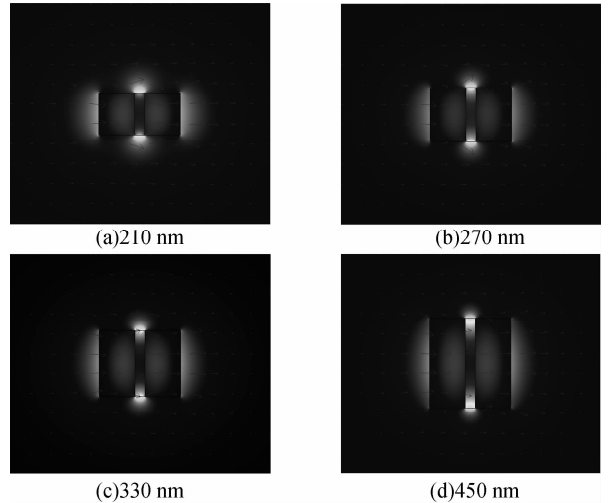


图 7 不同硅介质高度的模式图
Fig. 7 The mode figures with different Si height

不同硅介质高度下,模式场在狭缝中的光能量的归一化值,如图 8.

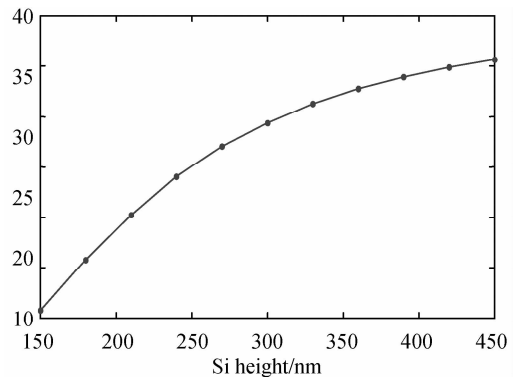


图 8 不同硅介质高度的归一化光能值
Fig. 8 Normalized optical power in slot with different Si height

可以看出在只改变硅介质高度的情况下,随着硅介质高度的增加,狭缝中的归一化光能不断增加.由图 7 可知,在狭缝宽度不变的情况下,狭缝越高,其截面积就越大,通过的能量也就越多.

硅介质高度变化时的色散曲线如图 9.从图中可以看出:当硅介质高度大于 330 nm 时,色散曲线单调上升;当硅介质高度在 270~330 nm 之间时,

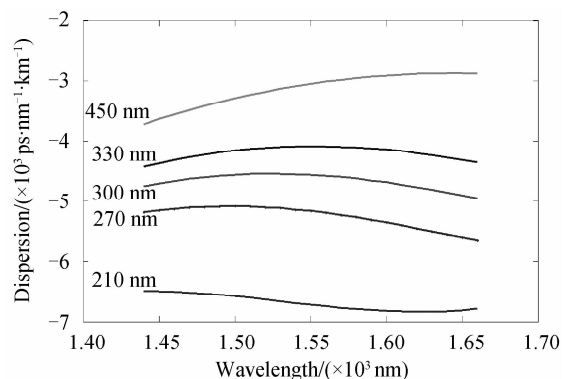


图 9 不同硅介质高度的色散曲线
Fig. 9 The dispersion curves with different Si height

色散曲线呈弧状;当硅介质高度小于 270 nm 时,色散曲线单调下降.随着硅介质高度的增加,同一波长下的色散绝对值是不不断减小的.

2.2.3 改变硅介质宽度

当硅介质宽度为 140 nm、160 nm、200 nm 和 240 nm 时,硅狭缝光波导在 1.55 μm 波长处的模式场如图 10.

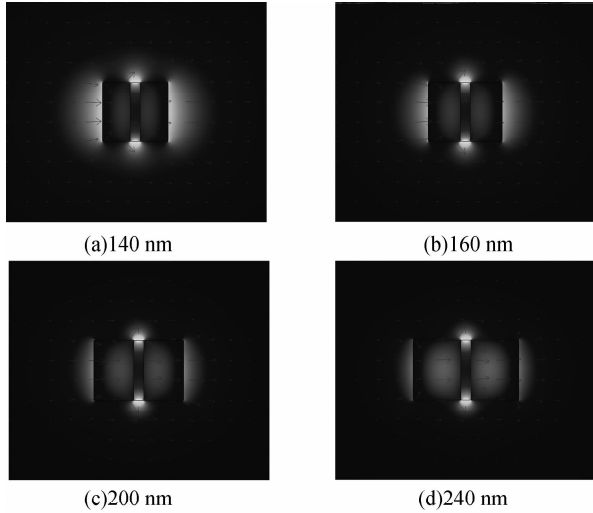


图 10 不同硅介质宽度的模式

Fig. 10 The mode figures with different Si width

可以看出,随着硅介质宽度的展宽,硅介质外侧的横向场强逐渐减弱,而硅介质内部的横向场强逐渐增大.

在不同硅介质宽度下,图 11 狭缝中传输的光能量的归一化值.

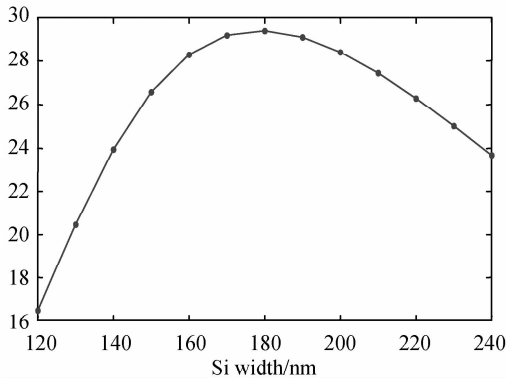


图 11 不同硅介质宽度的归一化光能值

Fig. 11 Normalized optical power in slot with different Si width

可以看出在只改变硅介质宽度的情况下,当硅介质宽度为 180 nm 时,狭缝中的归一化光能达到最大.由图 10 可知其原因是:狭缝中的光信号能量为总能量减去两硅介质中和其外侧传输的光能量.随着硅介质宽度展宽,两硅介质外侧传输的光能量减少,而硅介质内部传输光能量增多.所以狭缝中的

光能量会在某个硅介质宽度(180 nm 左右)出现最大值.

硅介质宽度变化时的色散曲线如图 12.从图中可以看出:当硅介质宽度大于 200 nm 时,色散曲线单调上升;当硅介质宽度在 180~200 nm 之间时,色散曲线呈弧状;当硅介质宽度在 160 nm 左右时,色散曲线单调下降;当硅介质宽度在 140 nm 左右时,色散曲线呈弧状.随着硅介质宽度的减小,同一波长下的色散绝对值不断增加.

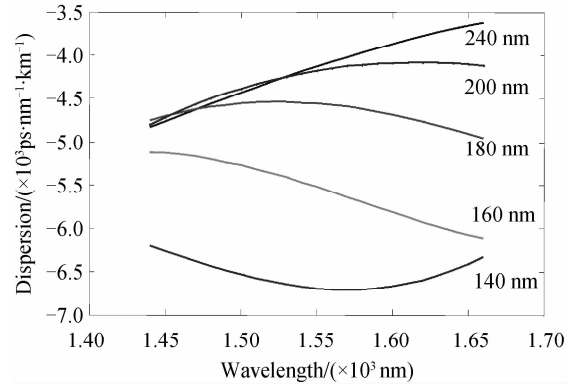


图 12 不同硅介质宽度的色散曲线

Fig. 12 The dispersion curves with different Si width

3 色散补偿应用

要对高速(大于 40 Gbit/s)宽频带(包含多个波分复用通道)光通信链路进行完全补偿色散,传输光纤的相对色散斜率(Relative Dispersion Slope, RDS)定义为 S/D , D 为色散, S 为色散斜率^[10]要等于补偿单元的 RDS. 光纤的色散曲线为正,且单调递增^[11].为了在高速宽带情况下补偿光纤色散,补偿单元的色散值必须为负,色散曲线单调递减,且相对色散斜率要匹配.传输光纤的 RDS 值一般小于 0.009 nm^{-1} ^[11],例如标准单模光纤在 1.55 μm 波长时的 RDS 为 0.0035 nm^{-1} ^[12]. 现有的大部分色散补偿光纤 RDS 值大于 0.009 nm^{-1} ^[11],因此,难以在高速宽频带光通信链路中完全补偿色散.

对于硅狭缝光波导,这里给出了几组符合要求的波导结构,及其在 1.55 μm 波长时的 RDS,如表 1.从表 1 中可以看出,所选取的狭缝光波导截面参量相对应的 RDS 都小于 0.009 nm^{-1} ,因此,对于具体的光纤或光链路,可以找到合适的截面参量来进行色散补偿.只要在狭缝宽度 20~50 nm 之间寻找合适参量,就可以使狭缝光波导的 RDS 为 0.0035 nm^{-1} ,这样就可实现在宽频带范围内对标准单模光纤进行色散补偿.

表 1 符合要求的波导结构及其在 1.55 μm 波长时的 RDS
Table 1 The waveguide's RDSs with different cross-section parameters

Cross-section parameters			Dispersion/ (ps \cdot nm ⁻¹ \cdot km ⁻¹)	RDS/ (nm ⁻¹)
Si width/ nm	Slot width/ nm	Si height/ nm		
140	50	300	-6 691	0.000 254
160	50	300	-5 515	0.000 988
180	20	300	-2 160	0.004 398
180	50	210	-6 720	0.000 379
180	50	270	-5 160	0.000 484
180	50	300	-4 556	0.000 252

4 结论

硅狭缝光波导具有模式场尺寸小、理论传输损耗低的优点,具有较好的应用前景.本文对不同横截面参量下硅狭缝光波导的色散进行了研究,研究表明,在 1.55 μm 通信工作波长附近,硅狭缝光波导的色散值可达 -6 700 ps/(nm \cdot km) 以下.同时,针对高速宽频带光通信链路的色散补偿要求,选择合适的截面参量,得到低相对色散斜率的硅狭缝光波导,可用作色散补偿.

参考文献

- [1] LI Shu-guang, LIU Xiao-dong, HOU Lan-tian. Numerical study on dispersion compensating property in photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6):1880-1886.
李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 光子晶体光纤色散补偿特性的数值研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6):1880-1886.
- [2] WANG Hong-hua, XUE Wen-rui, ZHANG Wen-mei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):27-30.
王红华, 薛文瑞, 张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):27-30.
- [3] YANG Guang-qiang, ZHANG Xia, REN Xiao-min, et al. Experimental research on dispersion compensation of 10 Gb/s clock signal using photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(9):1221-1224.
杨广强, 张霞, 任晓敏, 等. 利用光子晶体光纤实现 10Gb/s 光传输系统的色散补偿[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1221-1224.
- [4] ZHANG Cui-hong, LI Wei, LI Hai-tao. Application of electronic dispersion compensation technology in high-speed optical transmission systems [J]. *Study On Optical Communications*, 2006, **138**(6):52-55.
张翠红, 李蔚, 李海涛. 电子色散补偿技术在高速光传输系统中的应用[J]. *光通信研究*, 2006, **138**(6):52-55.
- [5] PEI Li, JIAN Shui-sheng, YAN Feng-ping, et al. The dispersion compensation of optical fiber bragg grating on the long-distance G. 652 fiber transmission system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):220-224.
裴丽, 简水生, 延凤平, 等. 普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):220-224.
- [6] NING Ti-gang, JIAN Wei, PEI Li, et al. Study on dispersion compensation of 40Gb/s optical time division multiplexing transmission over G. 652 fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1091-1092.
宁提纲, 简伟, 裴丽, 等. 40Gb/s 光时分复用传输光纤光栅补偿色散研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):1091-1092.
- [7] WU Wei-qing, CHEN Xiong-wen, ZHOU Hui, et al. Investigation of the ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):109-113.
吴维庆, 陈雄文, 周辉, 等. 混合纤芯光子晶体光纤超平坦色散的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):109-113.
- [8] ALMEIDA V R, XU Qian-fan, CARLOS A, et al. Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(11):1209-1211.
- [9] GUAN Chun-ying, YUAN Li-bo. Characteristic analysis of photonic crystal fibers based on FEM[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, **25**(4):532-535.
关春颖, 苑立波. 基于有限元方法的光子晶体光纤特性分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, **25**(4):532-535.
- [10] KEISER G. Optical fiber communications [M]. LI Yu-quan, CUI Min, PU Tao, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:83-88.
KEISER G. 光纤通信 [M]. 李玉权, 崔敏, 蒲涛, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002:83-88.
- [11] KAMINOW I P, LI Ting-ye. Optical fiber telecommunications [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006:25.
甘民乐 I P, 厉鼎毅. 光纤通信 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006:25.
- [12] LIU Wen-cong, LI Song-zhan. Design of broadband dispersion compensating fiber with the photonic crystal fiber [J]. *Ome Information*, 2008, **25**(1):47-50.
刘文琮, 李颂战. 基于光子晶体光纤的宽带色散补偿光纤的设计[J]. *光机电信息*, 2008, **25**(1):47-50.

Dispersion Characteristics and the Application for Dispersion Compensation of Silicon Slot Optical Waveguides

YANG Ji-chao, SONG Mu-ping

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

Abstract: Waveguides' dispersion characteristics are studied. The conclusion shows that if changing the slot's structural parameters, the value of the slot waveguide's dispersion is also changed when the optical frequency is around $1.55 \mu\text{m}$, and the values are all smaller than $-1000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$. The minimal one is about $-6700 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, and its Relative Dispersion Slope is smaller than 0.009 nm^{-1} . By selecting suitable slot's structural parameters, silicon slot waveguide could be used to compensate the residual dispersion of optical communication link, and it has more advantage than DCF.

Key words: Optical waveguide; Slot; Silicon; Dispersion characteristics; Dispersion compensation



YANG Ji-chao was born in 1985. Now he is a candidate for the M. S. degree at Zhejiang University. His current research interests focus on optical waveguide devices.



SONG Mu-ping was born in 1971 and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 1998. Now he is a teacher at Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University. His current research interests focus on silicon photonics, optical-fiber communication and sensor.