

文章编号:1001-5078(2008)03-0270-05

· 光纤技术 ·

平坦色散高非线性光子晶体光纤的研究与制备

苑金辉,侯蓝田,魏东宾,王海云,周桂耀

(燕山大学信息科学与工程学院,燕山大学红外光纤与传感研究所,河北 秦皇岛 066004)

摘要:运用改进的全矢量有效折射率法(IFVEIM),研究了光子晶体光纤结构(PCF)参数改变时,光纤的色散系数、有效模场面积和非线性系数随波长的变化规律,深入地分析了光纤可调节的色散平坦特性和高非线性特性。课题组自行设计了一种在900nm附近具有低平坦色散高非线性特性的光子晶体光纤。并且在改进工艺的基础上,采用包层孔充气挤压法对其进行制备,虽然制得的光纤各参数未达到设计值,但其在800~1000nm的波段内色散值仅为0.75ps/km/nm,非线性系数值则达到了 $30(\text{W}/\text{km})^{-1}$,这在当前规则结构的纯硅光子晶体光纤中已经较高。

关键词:光子晶体光纤;改进的全矢量有效折射率法;平坦色散;高非线性;包层孔充气挤压法

中图分类号:TN25

文献标识码:A

Fabrication and Investigation of Photonic Crystal Fiber with Flattened Dispersion and High Nonlinearity

YUAN Jin-hui, HOU Lan-tian, WEI Dong-bin, WANG Hai-yun, ZHOU Gui-yao

(Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Using improved fully vectorial effective index method(IFVEID), while keeping the structure parameters altered, the dispersion coefficient, the effective mode area and the nonlinear coefficient of PCF as a function of wavelength is investigated. Based on the analysis, a highly nonlinear PCF with low flattened dispersion on the verge of infrared wave band nearby 900nm is designed by ourselves. Furthermore, it is fabricated with the extrusion method of the cladding holes infused air through improving the technics. Although the PCF fabricated has not achieved the ideal value, its dispersion coefficient is merely 0.75 ps/km/nm and non-linear coefficient achieves $30(\text{W}/\text{km})^{-1}$, higher in PCFs made of silicon.

Key words: photonic crystal fiber; improved fully vectorial effective index method; flattened dispersion; high nonlinearity; extrusion method of the cladding holes infused air

1 引言

光子晶体光纤(PCF)由于其独特的导光机理^[1],使其具有许多传统光纤所没有的特性,例如,可在很大的波长范围内实现单模传输^[2-3],敏感的结构可调色散特性^[4-5],在一定的波长范围内具有很高的非线性特性^[6]。通过运用改进的全矢量有效折射率法(IFVEM)对不同结构的光子晶体光纤进行数值模拟,深入研究了光子晶体光纤灵活的色

散可调特性,进而发现只要合理地调节光子晶体光纤的结构参数,则可以在较宽的波长范围内设计色散平坦的光子晶体光纤,与此同时,发现平坦的色散

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2003CB314905);国家高技术研究发展计划(No. 2003AA311010)项目资助。

作者简介:苑金辉(1981-),男,燕山大学信息科学与工程学院在读研究生,主要从事光子晶体光纤的制备与理论方面的研究。
E-mail:yuanjinhu81@163.com

收稿日期:2007-09-09

特性对光子晶体光纤的非线性特性也具有很大的影响。我们课题组较早地对这种光纤进行了研究与设计,并在国内率先进行了制备工作。

2 理论基础

依据传统阶跃折射率光纤波导模的有效尺寸计算公式^[7],可以得到微结构光纤波导基模的有效半径近似计算公式^[8]:

$$r_{\text{eff}} = r_{\text{co}} + \lambda / [2\pi\sqrt{n_c^2 \cos\theta - n_{\text{eff}}^2}] \quad (1)$$

光纤的有效纤芯面积 S_{eff} 可以由下式确定:

$$S_{\text{eff}} = \pi \cdot r_{\text{eff}}^2 \quad (2)$$

光纤的非线性系数为:

$$\gamma(\omega) = \frac{n_2 \omega_0}{c S_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda S_{\text{eff}}} \quad (3)$$

其中, r_{co} 为纤芯半径; λ 是真空中的波长; n_c 为纤芯折射率; n_{eff} 为包层有效折射率, θ 是描述纤芯模的入射角。

在模拟光子晶体光纤色散时,有效纤芯半径 r_{co} 是一个很关键的参数,关于它的确定,对比于多极法,我们将其表述为如下形式^[9]:

$$r_{\text{co}} = \sum_{j=0}^5 (-1)^{i+j+1} k_{ij} (d/\Lambda)^j (\Lambda/\lambda)^i \Lambda \quad (4)$$

系数 k_{ij} 的取值可在文献[9]中查得。在此表达式中将有效纤芯半径 r_{co} 看作波长 λ 的函数,这对之前只是将其视为结构参数的函数的表述是一个合理的改进。

考虑到石英介质的材料色散,纤芯折射率 n_c 可由线性光学中的 Sellmeier 方程来计算。

包层有效折射率 n_{eff} 可由文献[8]中推导。

综上所述可得光纤中传播的基模 HE₁₁ 模所对应的传输常数 β_c ^[8],进而求得光纤基模色散公式:

$$D = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \quad (5)$$

式中, D 为光纤基模的色散系数; c 为真空中的光速。

3 平坦色散高非线性光子晶体光纤的研究

3.1 光纤包层节距 Λ 固定,包层空气孔直径 d 变化时的模拟

由图 1(a)可以看出,保持空气孔节距 Λ 不变的情况下,随着包层空气孔半径的增大,光子晶体光纤的基模的色散系数 D 不断增大,而且其零色散波长移向短波区,甚至可以移到可见光区,并且在 1.26~1.68 μm 的波分复用波段保持了很好的接近于零的色散平坦特性,而且出现了 $\lambda_{01} = 1.03 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_{02} = 1.87 \mu\text{m}$ 两个零色散波长,在整个通信波段内色散系数的绝对值小于 7 ps/km/nm。由图 1(b)可

以看出,对于确定的包层空气孔节距 Λ ,光子晶体光纤的有效模场面积随着包层空气孔半径的增大而减小,这就为获得较高的非线性系数提供了可能。由图 1(c)可以看出,对应的非线性系数随着包层空气孔的增大而增大,这就是说可以通过调节包层空气孔大小而有效地调节其非线性系数。

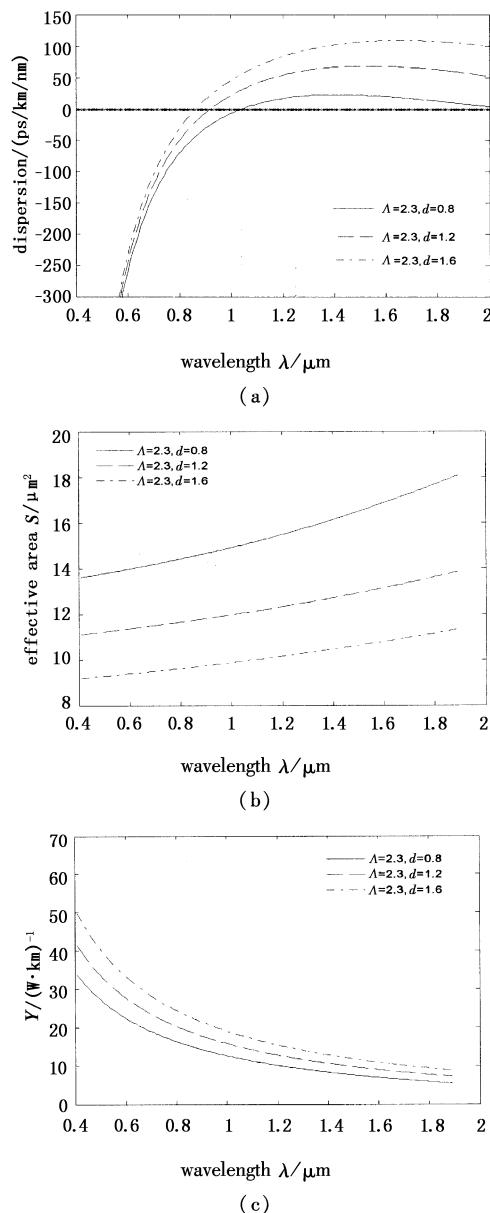


图 1 包层节距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, 空气孔直径 d 分别为 $0.8 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$ 时,(a)光纤的色散系数 D ;(b)有效模面积 S_{eff} 和(c)非线性系数 γ 随波长 λ 变化的模拟结果

Fig. 1 the simulated results about (a) the dispersion coefficient D ; (b) the effective mode area S_{eff} and (c) the nonlinear coefficient γ of PCFs with pitch $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, air holes diameters d from $0.8 \mu\text{m}$ to $1.6 \mu\text{m}$ as a function of wavelength λ

3.2 光纤包层孔直径 d 不变,孔节距 Λ 变化时的模拟

从图 2(a)可以看出,保持空气孔直径不变的情

况下,随着包层孔节距的增大,光纤的色散系数逐渐增大,而且在光通信波段也出现了两个零色散波长。从图2(b)可以看出,在包层空气孔直径不变的情况下,非线性系数随着孔节距增大而减小,并且随着波长的增大呈减小趋势。

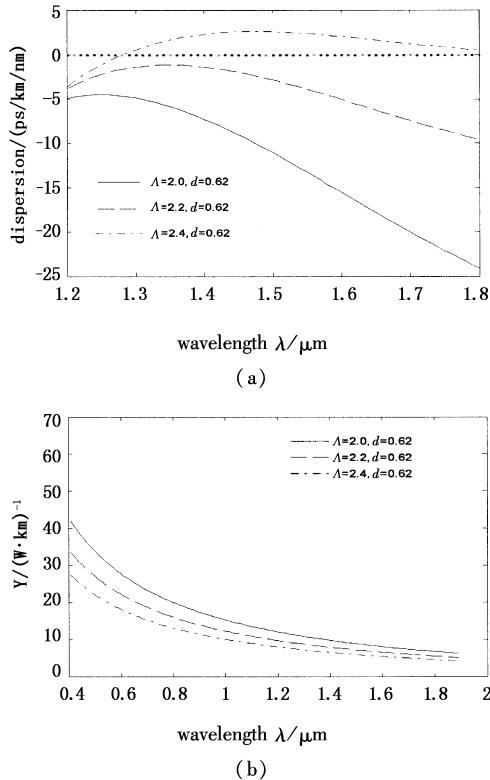


图2 包层孔直径 $d = 0.62\mu\text{m}$, 节距 Λ 分别为 $2.0\mu\text{m}, 2.2\mu\text{m}, 2.4\mu\text{m}$ 时,(a)光纤的色散系数 D 和(b)非线性系数 γ 随波长 λ 的变化的模拟结果

Fig. 2 the simulated results about (a) the dispersion coefficient D and (b) the nonlinear coefficient γ of PCFs with air holes diameters $d = 0.62\mu\text{m}$, pitch Λ from $2.0\mu\text{m}$ to $2.4\mu\text{m}$ as a function of wavelength λ

3.3 光纤包层空气孔直径 d 和孔节距 Λ 均变化时的模拟

由图3(a)可以看出这些光纤均存在两个零色散波长,且随着包层节距 Λ 的增大其零色散波长向长波方向移动,所以可以通过调节光纤结构设计从而可见到近红外具有双零色散波长的光纤。由图3(b)可以看出,每一根光纤的有效纤芯面积随波长的增大而增大,这说明光纤对长波段的光波限制减弱。由图3(c)可以看出,不同结构的光纤其非线性系数 γ 随波长的增大减小较快,这主要是由于两个原因,第一个是随着光波长的增大,光纤的有效纤芯面积增大;第二个是光纤的非线性系数 γ 与波长和有效纤芯面积均成反比。包层节距 Λ 的增大导致光纤有效纤芯面积增大,因此对于确定波长包层节距 Λ 的增大导致光纤的非线性系数减小。

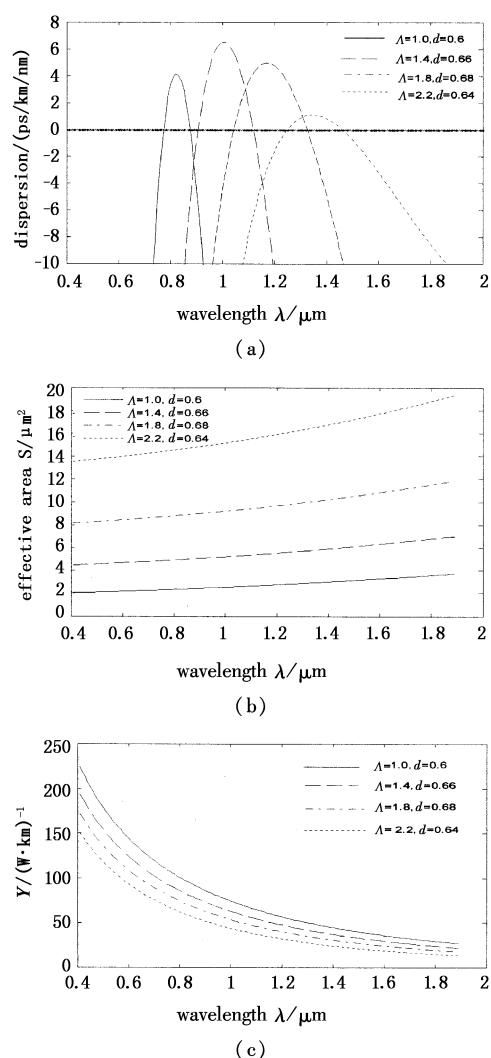


图3 包层节距 Λ 分别为 $1.0\mu\text{m}, 1.4\mu\text{m}, 1.8\mu\text{m}, 2.2\mu\text{m}$, 空气孔直径 d 分别为 $0.6\mu\text{m}, 0.66\mu\text{m}, 0.68\mu\text{m}, 0.64\mu\text{m}$ 时;(a)光纤的色散系数 D ; (b)有效模面积 S_{eff} 和(c)非线性系数 γ 随波长 λ 变化时的模拟结果

Fig. 3 the simulated results about (a) the edispersion coefficient D ; (b) the effective mode area S_{eff} and (c) the nonlinear coefficient γ of PCFs with pitch Λ from $1.0\mu\text{m}$ to $2.2\mu\text{m}$, air holes diameters from $0.6\mu\text{m}$ to $0.64\mu\text{m}$ as a function of wavelength λ

4 平坦色散高非线性光子晶体光纤的制备

依据上面的分析可知,可以通过调节光纤结构参数孔径 d 和孔间距 Λ 来设计出在不同波段具有低平坦甚至低超平坦色散特性的光子晶体光纤,但是为了增强其非线性,应尽量增大孔径 d 而减小孔间距 Λ ,也就是尽量增大空气填充率(d/Λ)和减小芯径,使其色散平坦区域移至近红外甚至可见光波段。

理论设计都是理想化的,在实际制备的时候则要考虑很多限制因素,比如当孔径 d 增大,孔间距 Λ 减小时,在拉制过程中由于受温度影响不均衡,可能会造成空气孔的大面积塌陷或变形, d/Λ 越大这种趋势越明显。还有就是芯径越小,预制棒的堆积就

越困难,拉制就更困难,很多时候由于受力不均匀而将芯挤没或者由于温度过高,使其周围的孔熔死,结果其大小比设计值增大很多。为了克服工艺上的一系列困难,我们也在实践中探索出了一些行之有效地方法。目前,在这种光纤的拉制过程中,我们可以采用包层孔充气挤压法:首先,在预制棒堆积时,我们使用粗细相同的毛细管将整个外套管排满,这样不仅可以减小排布的困难,而且制成的预制棒较均匀,有利于在拉制过程中均匀受力和膨胀;其次,将包层中的所有毛细管多留出一部分(比中心的约长8cm),这样在拉制过程中将其与充满气体的气罐相接(我们使用的是装满氩气的气罐),拉制过程中打开气阀,向里面充气;最后,由于包层毛细管中气压较大,而中心毛细管中的气压较小,在拉制时它就会受到周围其他毛细管的挤压而逐渐熔缩成实芯,我们可以通过控制温度和气压来控制芯径的大小。我们之前还使用过将中心抽真空的方法,两种方法的原理相似,都是利用包层与中心存在的压力差来形成纤芯。但在向包层中充气时,要尤其注意以下问题:第一,包层中毛细管的长度一定要留的合适,否则将无法保证气体全部充入包层中而不向外泄漏;第二,在向包层中注入气体的同时,一定要将中心密封好,决不能让气体泄漏入中心,否则在拉制过程中会使压力差减小,以致于纤芯得不到合理的压缩而使尺寸不能达到设计情况;第三,在充气过程中要时刻注意气压的变化,尽量使气压处于稳定状态,否则则会影响挤压的均匀性。

运用改进的全矢量有效折射率法,首先我们课题组自行设计了一种在900nm的近红外波段具有平坦色散高非线性特性的光子晶体光纤,随后采用上面介绍的包层孔充气挤压法对其进行了制备。

所设计的光纤的端面图如图4所示。

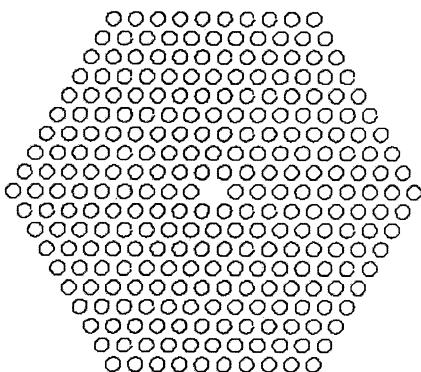


图4 所设计的光纤截面图,包层空气孔直径 $d = 0.62\mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda = 1.15\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.54$,芯径 $D = 2\Lambda - d = 1.68\mu\text{m}$

Fig. 4 the cross section of PCF designed with air holes diameters $d = 0.62\mu\text{m}$, pitch $\Lambda = 1.15\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.54$, core diameter $D = 2\Lambda - d = 1.68\mu\text{m}$

其色散系数、有效模场面积、非线性系数随波长的变化关系如图5所示。

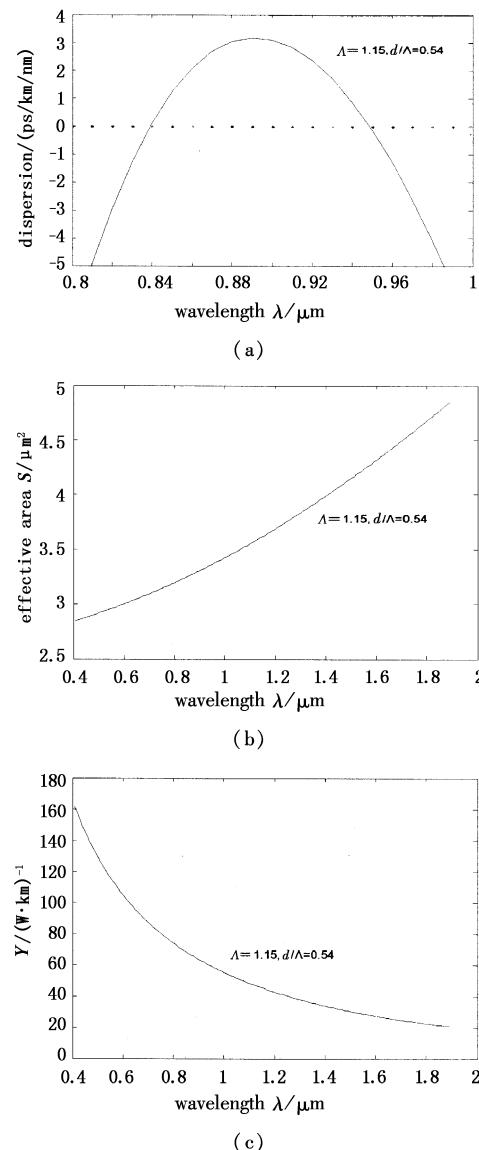


图5 包层节距 $\Lambda = 1.15\mu\text{m}$, 空气孔直径 $d = 0.62\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.54$, 纤芯直径 $D = 1.68\mu\text{m}$ 时; (a) 光纤的色散系数 D ; (b) 有效模面积 S_{eff} 和(c) 非线性系数 γ 随波长变化的曲线

Fig. 5 the simulated results about (a) the dispersion coefficient D ; (b) the effective mode area S_{eff} and (c) the nonlinear coefficient γ of PCFs with pitch $\Lambda = 1.15\mu\text{m}$, air holes diameter $d = 0.62\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.54$, core diameter $D = 1.68\mu\text{m}$ as a function of wavelength λ

由图5(a)可以看出,光纤在900nm附近的近红外波段色散较平坦,在 $0.81 \sim 0.985\mu\text{m}$ 之间的色散值仅为($-5 \sim 3$) $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$ 。由图5(b)可以看出,光纤的纤芯面积很小,在 $0.4 \sim 2\mu\text{m}$ 整个波段上最大值约为 $4.85\mu\text{m}^2$,而在 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$ 之间则不超过 $3.4\mu\text{m}^2$,如此小的纤芯面积有利于增大光场的能量密度,即使在输入能量不是很大时也可以达到很明

显的非线性效应。由图5(c)则可以看出,其非线性系数在 $0.8 \sim 1\mu\text{m}$ 的近红外波段达到了($58 \sim 78$) $(\text{W}/\text{km})^{-1}$,若能在工艺上实现,则可以使规则结构的纯硅光纤的非线性系数值达到一个新水平,从而进一步拓展其应用范围。

图6就是依据上面的设计情况,我们课题组拉制的光纤的端面图。

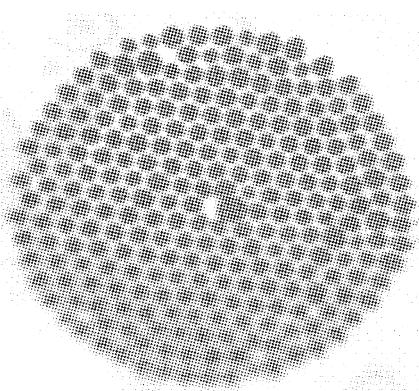


图6 所制备的光纤截面图

Fig. 6 the cross section of PCF fabricated

在拉制过程中,我们采用了包层孔充气挤压法来形成纤芯。由于设备和工艺上仍然存在一些难以避免的限制因素,不仅制得的光纤在结构上存在一些特殊性,如图6所示,有的孔膨胀得过大(如第一层的一个孔,主要是由于气体充的过多),而有的孔则被挤(如第八层的三个孔,主要则是由于气体充的很少)而且制得的光纤各结构参数也未达到预期效果:包层空气孔直径 d 为 $2.5\mu\text{m}$,孔间距 Λ 为 $2.75\mu\text{m}$,芯径 D 为 $3\mu\text{m}$ 。虽然如此,但在 850nm 附近的近红外波段虽然光纤的色散值仅为 $0.75\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$,而其非线性系数却达到 $30(\text{W}/\text{km})^{-1}$ (测量值)。此值虽然与设计值尚有一定的差距,但是在规则结构的纯硅光纤中已经比较高了。而且我们相信,通过不断地改进制备工艺和更加合理地优化光纤参数,其非线性系数值还可以进一步增大,接近甚至达到设计值。

5 结 论

综上所述,可以通过改变光纤的包层孔大小和孔节距来设计平坦色散高非线性的光子晶体光纤。我们不仅可以设计出在通信波段具有近零色散特性和具有两个零色散波长的光子晶体光纤,而且可以设计在近红外甚至可见光区变化的近零色散和具有两个色散点的光纤,这种光子晶体光纤的非线性系

数可以产生较大的变化范围。为了使这种光纤不只是停留在理论设计上,我们课题组一直致力于制备工艺的探索中。一方面用理论设计来指导我们的制备工作,另一方面将制备中出现的问题反映到理论设计中,优化各光纤参数。我们相信,随着制备工艺不断地改进,它的制作难度会不断地降低,完全有可能合理地设计和制备这种光纤,使其一步步地走向实用化。

参考文献:

- [1] J C Knight, P St J Russell. New ways to guide light [J]. Science, 2002, 296(5566): 276 - 277.
- [2] Knight J C, et al. All-silica-single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. Opt. Lett., 1996, 21(19): 1547 - 1549.
- [3] A Ferrando, E Silvestre, J J Miret, et al. Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber [J]. Opt. Lett., 1999, 24(5): 276 - 278.
- [4] W H Reeves, J C Knight, P St J Russell, et al. Demonstration of ultra flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2002, 10(14): 609 - 613.
- [5] J C Knight, J Arriaga, T A Birks, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 807 - 809.
- [6] K M Hilligsøe, T V Andersen, H N Paulsen, et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1045 - 1054.
- [7] Wu Chongqin. Optical waveguide theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [8] 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 一种光子晶体光纤基模色散特性的矢量法分析 [J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1873 - 1879.
- [9] 赵兴涛, 侯蓝田, 刘兆伦, 等. 改进的全矢量有效折射率方法分析光子晶体光纤的色散特性 [J]. 物理学报, 2007, 56(4): 321 - 326.

更正:本刊2008年第1期正文第11页作者简介中“刘耀初”应为“邓耀初”,特此更正,并对作者表示歉意。