

全固高非线性低色散斜率光子晶体光纤设计

徐惠真 周昌杰

(集美大学理学院, 福建 厦门 361021)

摘要 提出了利用掺氟同心圆环的光纤结构来提高光子晶体光纤(PCF)的非线性,所需控制的参量仅有两个。设计了三种具有高非线性、低色散斜率和低限制损耗的全固光子晶体光纤。这三种光纤分别具有正常色散、双零色散点和零色散点恰好在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的色散曲线特性。所设计的零色散点恰好在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的光子晶体光纤色散斜率值为 $5.12 \times 10^{-4} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$, 这比传统的高非线性光纤的色散斜率小了 2 个数量级。同时,该光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的非线性系数为 $31.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 限制损耗为 $9.62 \times 10^{-5} \text{ dB}/\text{km}$ 。

关键词 光纤光学;高非线性;低色散斜率;光子晶体光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1106001

Highly Nonlinear All-Solid Photonic Crystal Fibers with Low Dispersion Slope

Xu Huizhen Zhou Changjie

(School of Science, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract Fluorine-doped (F-doped) trench-assisted structure is proposed to improve the nonlinearity of photonic crystal fibers (PCFs). Through controlling only two parameters, three all-solid highly nonlinear PCFs with low dispersion slope and low confinement loss are designed. They exhibit all normal dispersion, two zero dispersion wavelengths (ZDWs) and one ZDW just at $1.55 \mu\text{m}$, respectively. The dispersion slope of one ZDW just at $1.55 \mu\text{m}$ is $5.12 \times 10^{-4} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$, which is two order of magnitude lower than that of conventional highly nonlinear fibers. A nonlinear coefficient of $31.5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ and loss low of $9.62 \times 10^{-5} \text{ dB}/\text{km}$ at $1.55 \mu\text{m}$ are achieved for this PCF.

Key words fiber optics; highly nonlinearity; low dispersion slope; photonic crystal fiber

OCIS codes 220.4000; 190.4370; 190.4400; 060.5295

1 引 言

在波分复用系统中,基于光纤中四波混频效应的全光波长变换技术,由于其具有对比特率和调制格式的响应快速和高透明度的优点,具有广阔的应用前景^[1]。为了得到高效的宽带波长变换,所使用的光纤不仅要长度短,还必须具有高非线性、低色散值和低色散斜率的特性^[2];为了产生超宽带超平坦的连续谱,所使用的光纤不仅应该具有高非线性,还应该具有超平坦的色散曲线^[3,4]。因此,设计具有高非线性和低色散值、低色散斜率的光子晶体光纤(PCF)对于非线性光纤的应用具有巨大的推动作用。

基于 SiO_2 材料的高非线性光纤,因其与传统的单模光纤具有很好的匹配性而得到广泛应用。然而,对于传统的 SiO_2 材料的高非线性光纤要同时达到高非线性和较低色散斜率是很困难的。Onishi^[5]指出很难在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长附近仅仅通过调节折射率差就将色散斜率控制到 $0.02 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$ 以下。光子晶体光纤结构的灵活性使其可以通过改变结构来增大包层和纤芯间的相对折射率差,减小模场面积,获得高非线性,因而引起了广泛关注^[6]。通过控制空气孔直径和周期可以明显地降低光子晶体光纤的色散斜率,但是必然要以增加有效模场面积和限制损耗为代价^[7]。虽然该类光子晶体光纤是基

收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2012-07-05

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J05006, 2012J05121)和集美大学科研预研基金(C611012)资助课题。

作者简介: 徐惠真(1981—),女,博士,讲师,主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: elimshee@gmail.com

于 SiO₂ 材料的,却由于其包层里的大空气孔在光子晶体光纤与传统单模光纤熔接时容易变形塌缩,导致光纤传导结构破坏,从而引入很大的损耗^[8]。

利用掺锗或者掺氟材料增大与纯石英材料之间的折射率差可以提高光纤的非线性,这已经在很多光纤的设计中得到应用^[9~11]。而且掺锗光纤表现出很多优越性,如与未掺杂的纯石英包层有很好的兼容性,和普通光纤能很好地熔接,由于掺杂所引入的损耗可以降低到 dB/km 的水平等。

本文提出了一种全固态高非线性光子晶体光纤结构。利用纤芯的掺氟同心环,在提高非线性的同时,大大降低了色散斜率。此外,该设计由于消除了包层大空气孔,因而不仅可以降低光纤拉制的工艺难度,而且可以降低与单模光纤熔接时的损耗^[12]。

2 光纤设计及分析

图 1(a)为全固光子晶体光纤的截面图,其中 d 为包层中掺氟石英柱的直径, Λ 为掺氟石英柱间距。包层以纯熔融石英(蓝色部分)为基底、六角晶格结构周期性排列的掺氟石英柱(白色部分)构成(彩图请见网络电子版)。纤芯由高折射率的掺锗石英(红色部分)周围外加一层低折射率的掺氟石英同心圆环构成。纤芯的折射率分布如图 1(b)所示。 D_1 为掺锗区域的直径, D_2 为外圆的直径。掺锗材料的折射率可由 Sellmeier 公式^[13] 获得。Sellmeier 公式为^[13]

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[A_i + X(E_i - A_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [B_i + X(F_i - B_i)]^2}, \quad (1)$$

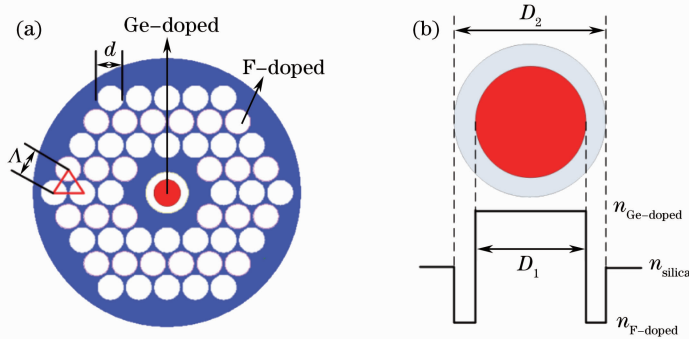


图 1 (a)全固光子晶体光纤截面图;(b)纤芯区域的折射率分布

Fig. 1 (a) Cross section of the all solid PCF; (b) refractive index profile of the concentric core

首先考察掺锗区域大小对光子晶体光纤色散特性及非线性系数的影响。图 2 和图 3 分别为色散特性和非线性系数随掺锗区域的变化情况。其中, $f_0 = 1$ 的曲线代表无掺氟圆环的情况。从图中可以清楚地看到,在短波区域掺锗区域的变化对色散曲

式中 n 为材料折射率, λ 为真空中波长, A, B, E, F 分别为纯石英和掺锗石英的 Sellmeier 系数,由参考文献[13]给出, X 为 GeO₂ 掺杂的浓度。而掺氟石英材料的折射率同样由 Sellmeier 公式^[14] 获得。掺锗和掺氟材料的非线性折射率 n_2 (单位为 $10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$) 分别为^[15]

$$n_{2(\text{GeO}_2\text{-SiO}_2)} = 2.76 + 0.0974X, \quad (2)$$

$$n_{2(\text{F-SiO}_2)} = 2.76 + 1.03Y, \quad (3)$$

式中 Y 为掺氟的浓度。非线性折射率 n_2 随掺杂浓度的增加而增大。光纤的非线性系数为^[16]

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n_2(x, y) |F(x, y)|^4 dx dy}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}, \quad (4)$$

色散被定义为^[17]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (5)$$

式中 c 为真空中的光速, Re 代表基模有效折射率 n_{eff} 的实部。限制损耗 L_c 可由基模有效折射率的虚部得到^[18], 即

$$L_c = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[n_{\text{eff}}] \times 10^6, \quad (6)$$

其单位为 dB/m。在以下仿真过程中,定义归一化外圆直径为 $D_2/\Lambda = f_1$, 掺锗区域的比例为 $f_0 = D_1/D_2$ 。纤芯的非线性系数会随着掺锗浓度的提高而增加,考虑到实际情况,在仿真中取掺锗摩尔分数为 30%, 掺氟的质量分数为 2%。

线的影响很小。然而对于长波区域,色散值随着掺锗区域的变大而增加,并且越来越接近于掺锗材料色散曲线(即 $f_0 = 1$ 的曲线)。在所考察的整个波长范围,掺锗区域越小,模场限制在更小的纤芯区域,因而非线性系数随着掺锗区域的减小而提高。相对

于短波区域,长波长区域中掺锗区域大小对非线性系数的影响比较小。这是因为此时模场已经不能仅仅限制在狭小的掺锗区域,而是会扩展到掺氟圆环甚至是包层区域中,基于掺氟石英和纯石英的非线

性都低于掺锗石英,模场的增大导致了非线性系数的减弱。从图 2 和图 3 还可以看到,掺氟同心圆环可以明显地降低色散值和和提高非线性系数。

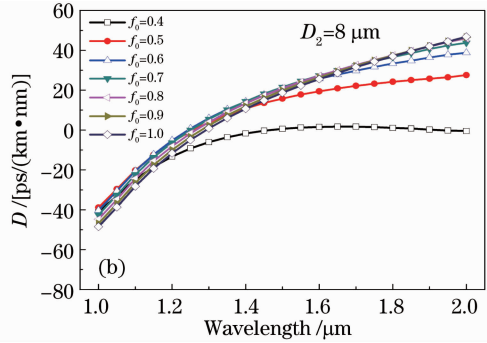
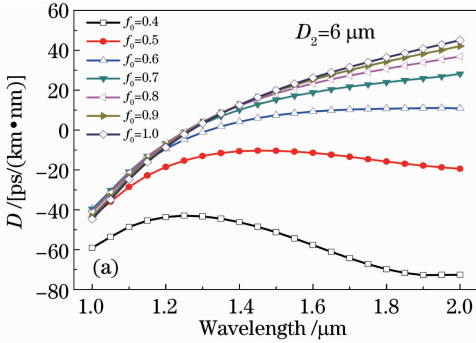


图 2 掺锗区域大小对色散曲线的影响,其中 $\Lambda=4 \mu\text{m}$, $d=3.6 \mu\text{m}$

Fig. 2 Influence of Ge-doped areas on dispersion, when $\Lambda=4 \mu\text{m}$, $d=3.6 \mu\text{m}$

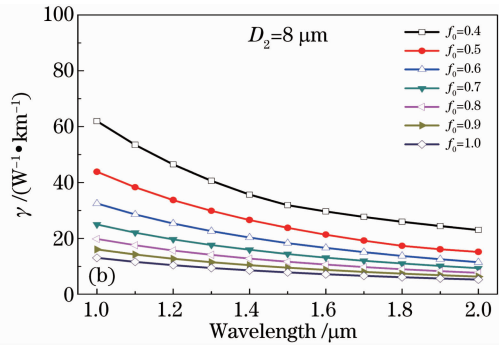
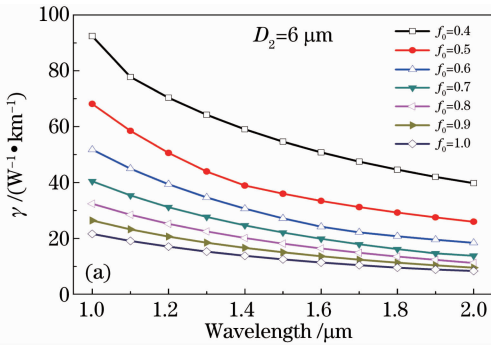


图 3 掺锗区域大小对非线性系数的影响,其中 $\Lambda=4 \mu\text{m}$, $d=3.6 \mu\text{m}$

Fig. 3 Influence of Ge-doped areas on nonlinear coefficient, when $\Lambda=4 \mu\text{m}$, $d=3.6 \mu\text{m}$

图 4(a)为波长固定时,掺锗区域大小对模场直径(MFD)的影响。从图中可以看出,对所有波长,都采取通过减小掺锗区域来获取更小的模场,从而提高非线性系数的方法是不现实的。这种非单调变化过程已经在参考文献[7]中报道过。对于固定波长,随着掺锗区域的减小,模场直径表现出先减小后增大的趋势,存在一个最佳值,并且最佳掺锗区域大小随着波长的增加而增大。为了在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长

处获得高非线性,就必须找到该波长处的最佳掺锗区域大小。图 4(b)为掺锗区域直径 D_1 和掺氟圆环直径 D_2 对有效模场直径的影响。每一个 D_1 和 D_2 的组合都存在一个最小模场直径。为了得到高非线性系数就必须合理地选取 D_1 和 D_2 的组合。

图 5(a)中,包层掺氟石英柱间距 Λ 对色散值的影响非常小,而图 5(b)中间距 Λ 的变化对非线性系数没有影响。图 6 显示,包层掺氟石英柱的直径对

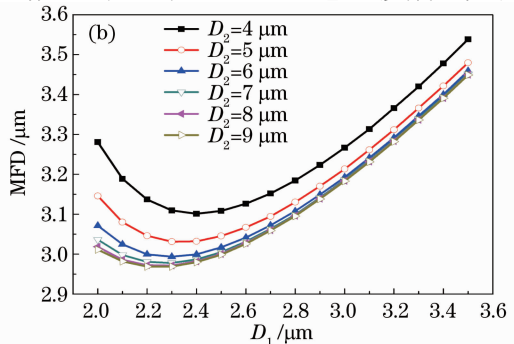
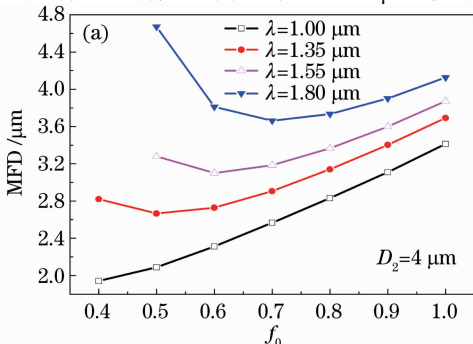


图 4 波长固定时(a)掺锗区域大小及(b) D_1 和 D_2 对有效模场直径的影响

Fig. 4 Influence of (a) Ge-doped areas and (b) D_1 , D_2 on mode field diameter for a fixed wavelength

色散和非线性系数几乎没有影响,图中即使石英柱的直径变化了 $1 \mu\text{m}$,所有的曲线仍然重合在一起。

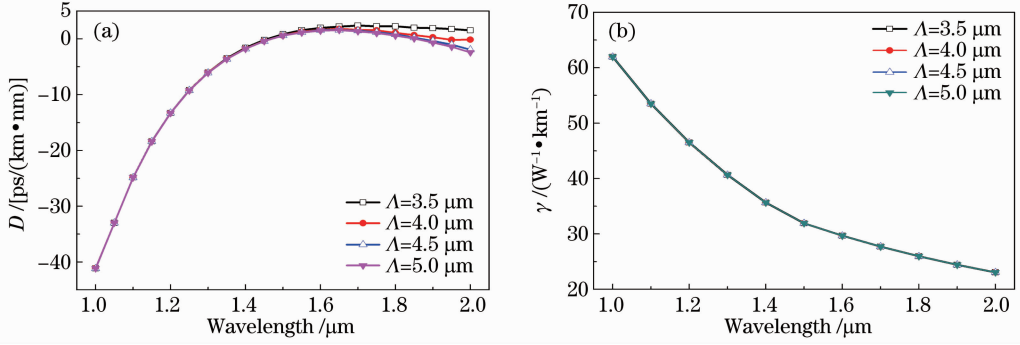


图 5 包层掺氟石英柱间距对(a)色散曲线和(b)非线性的影响,其中 $d=3.6 \mu\text{m}$, $D_1=3.2 \mu\text{m}$, $D_2=8 \mu\text{m}$

Fig. 5 Influence of rod to rod pitch Λ on (a) dispersion and (b) nonlinear coefficient, when $d=3.6 \mu\text{m}$, $D_1=3.2 \mu\text{m}$, $D_2=8 \mu\text{m}$

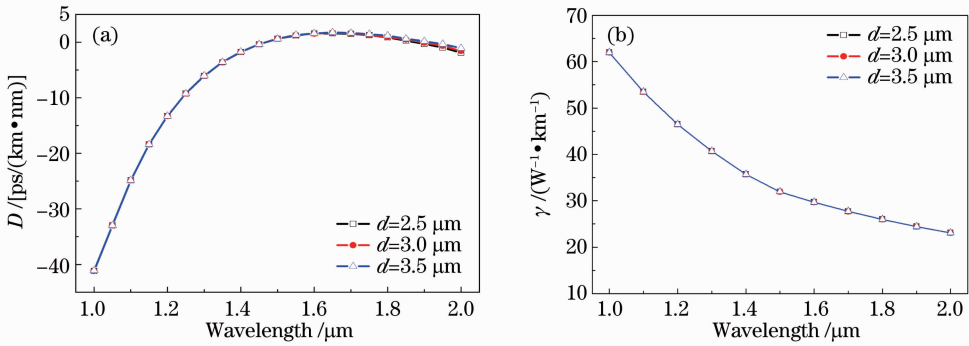


图 6 包层掺氟石英柱大小对(a)色散曲线和(b)非线性的影响,其中 $d=3.6 \mu\text{m}$, $D_1=3.2 \mu\text{m}$, $D_2=8 \mu\text{m}$

Fig. 6 Influence of diameter of rods d on (a) dispersion and (b) nonlinear coefficient, when $d=3.6 \mu\text{m}$, $D_1=3.2 \mu\text{m}$, $D_2=8 \mu\text{m}$

根据以上的仿真结果,仅仅通过控制 D_1 和 D_2 就可实现高非线性,而包层的掺氟石英柱可用来控制限制损耗。基于图 4(b)的结果并将色散特性考虑在内,设计了三种高非线性、低色散斜率的光子晶体光纤。图 7 为这三种光子晶体光纤的色散曲线及非线性系数曲线,相应的结构参数、 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的色散值、色散斜率、非线性系数及限制损耗列于表 1。PCF1 具有双零色散点,其中一个零色散点在 $1.52 \mu\text{m}$ 波长处,另一个则在 $1.92 \mu\text{m}$ 处;PCF2 的

零色散点刚好在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处;而 PCF3 则具有全正常色散曲线特性,这对产生平坦、连续的超连续谱非常有利^[19~21]。这三种光纤 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的色散斜率都在 $10^{-4} \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 量级,打破了传统高非线性光纤色散斜率难以低于 $0.02 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 的限制。2003 年,Hansen^[11]控制了掺锗纤芯周围由 3 个掺氟区域围绕的空气孔光子晶体光纤,所控制光纤的最小色散斜率为 $1 \times 10^{-3} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}^2)$;在 2009 年,Beguma 等^[22]设计了 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的色

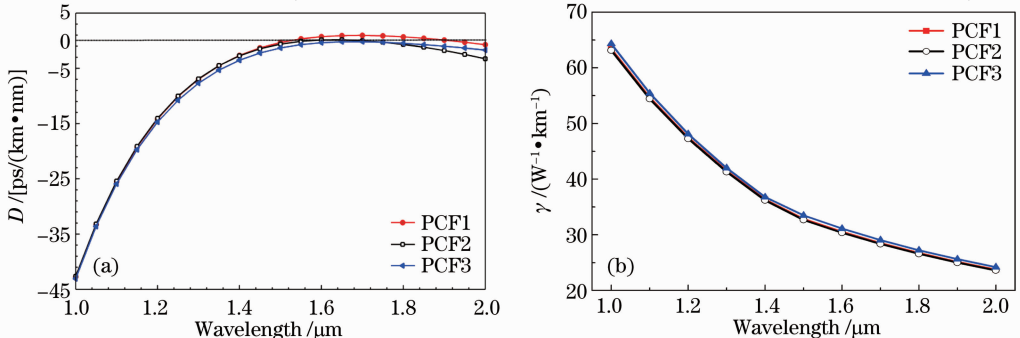


图 7 全固 PCF 的色散曲线(a)和非线性系数(b)

Fig. 7 (a) Dispersion profiles and (b) nonlinear coefficients of designed PCFs with 3 rings

散斜率为 $-0.009 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$ 的光子晶体光纤。有更低的色散斜率。而本文所设计的光纤都比之前报道的这两种光纤具

表 1 PCF1、PCF2、PCF3 的相关参数

Table 1 Parameters of the designed PCFs with 3 rings

	Geometric parameter	Dispersion value / [ps/(nm·km)]	Dispersion slope / [10^{-4} ps/(nm·km)]	Nonlinear coefficient / ($\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)	Confinement loss /(10^{-5} dB/km)
PCF1	$\Lambda=4 \mu\text{m}$, $D_1=3.15 \mu\text{m}$, $D_2=9 \mu\text{m}$, $d=2.2 \mu\text{m}$	0.33	6.54	31.7	1.79
PCF2	$\Lambda=3.5 \mu\text{m}$, $D_1=3.16 \mu\text{m}$, $D_2=8 \mu\text{m}$, $d=2.2 \mu\text{m}$	0	5.12	31.5	9.62
PCF3	$\Lambda=3.5 \mu\text{m}$, $D_1=3.12 \mu\text{m}$, $D_2=9.4 \mu\text{m}$, $d=2.2 \mu\text{m}$	-0.71	6.03	32.3	0.611

3 全固光子晶体光纤拉制过程的容忍度

2009年,武汉长飞公司报道了包层为掺锗和掺氟同心圆环石英柱的全固光子带隙型光子晶体光纤^[23]。本文所提出的光纤结构简单,仅仅在纤芯为掺锗和掺氟同心圆环,因此对该光纤的控制具有可行性。但由于光子晶体光纤中掺氟石英柱的尺寸很小,因此在拉制过程中由于技术水平限制难免会引入误差。参数的波动也会令拉制出来的光纤特性偏离理想光纤的预期^[24]。因此,对所设计光纤的抗误差估计是必须考虑的一个重要问题,以PCF2为例来进行分析。将所有结构参量都在优化值上下波动5%,以此来观察色散曲线的变化。应该指出的是,所有参量同时变化是非理想拉制过程的一个上限,实际过程中不可能所有的参量都同时往一个方向变化,而是一个统计平均的过程(比如呈高斯分布)^[24]。因此,所考虑的情况是对非理想过程的最坏估计。

图8的结果显示,色散曲线的平坦性并没有因为参量的漂移而发生明显变化,只是使色散值整体往同一个方向变化,曲线整体上还保持平坦。即使所有参量同时波动了 $\pm 5\%$,色散曲线仍然保持了很好的平坦性。对于波动 $+5\%$ 的情况,1.55 μm 波长处的色散值为 $5.17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,而 -5% 的情况下为 $-6.66 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,色散值仍然保持在一个

较低的水平。因此可以说,该光纤即使在非理想拉制的情况下,仍然具有很高的容忍度,仍能保持平坦色散的特性。

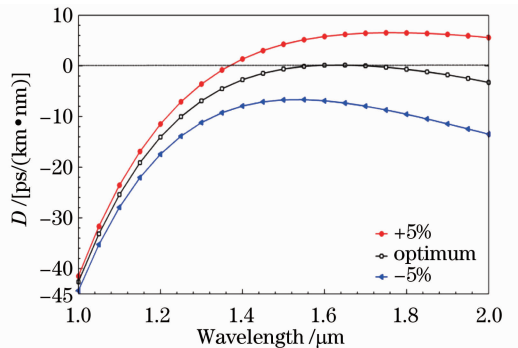


图8 所有结构参数同时波动 $\pm 5\%$ 时, PCF2的色散曲线图

Fig. 8 Dispersion curves of PCF2 with a variation of $\pm 5\%$ for all parameters, simultaneously

4 结 论

提出一种具有掺锗和掺氟同心圆环纤芯结构的全固光子晶体光纤,仅仅通过控制纤芯掺锗及掺氟区域的大小就可以在提高非线性的同时降低色散斜率。所设计的三种光子晶体光纤在1.55 μm 波长处都具有高非线性、低色散斜率和低限制损耗的特性,而且即使在非理想拉制的情况下色散曲线也能保持很好的平坦性,这对于光子晶体光纤在非线性光学等领域的应用具有一定的促进作用。

参 考 文 献

- 1 G. A. Nowak, Y. H. Kao, T. J. Xia *et al.*. Low power high-efficiency wavelength conversion based on modulational instability in high-nonlinearity fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23** (12): 936~938
- 2 K. Inoue, H. Toba. Wavelength conversion experiment using fiber four-wave mixing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 69~72
- 3 J. T. Gopinath, H. M. Shen, H. Sotobayashi *et al.*. Highly nonlinear bismuth-oxide fiber for supercontinuum generation and femtosecond pulse compression[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3591~3596
- 4 Dai Nengli, Li Yang, Peng Jinggang *et al.*. Development of dispersion flattened photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010602
戴能利, 李 洋, 彭景刚 等. 色散平坦光子晶体光纤的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 010602
- 5 M. Onishi. New nonlinear fibers with application to amplifiers [C]. Optical Fiber Communication (OFC), 2004. TuC3
- 6 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900139
- 7 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russel. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14): 609~613
- 8 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin *et al.*. Fusion splicing of small solid core photonic crystal fibers with conventional fibers based on controlled hole collapse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0106004
奚小明, 陈子伦, 孙桂林 等. 普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0106004
- 9 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Express*, 2004, **12** (10): 2027~2032
- 10 Weiwen Zou, Zuyuan He, Kazuo Hotate. Acoustic modal analysis and control in w-shaped triple-layer optical fibers with highly-germanium-doped core and F-doped inner cladding [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10006~10017
- 11 K. P. Hansen. Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11** (13): 1503~1509
- 12 Liang Dong, Libin Fu, H. A. McKay. All glass microstructured optical fibres [C]. 35th European Conference on Optical Communication (ECOC), 2009. 1~4
- 13 J. W. Fleming. Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(24): 4486~4493
- 14 J. W. Fleming, D. L. Wood. Refractive index dispersion and related properties in fluorine doped silica[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19): 3102~3104
- 15 T. Kato, Y. Suetsugu, M. Nishimura. Estimation of nonlinear refractive index in various silica-based glasses for optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(22): 2279~2281
- 16 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (4th edition)[M]. New York: Academic Press, 2006
- 17 C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi. Chalcogenide core photonic crystal fibers for zero chromatic dispersion in the C-Band [C]. Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2009. OTuC4
- 18 B. Kuhlmeiy, G. Renversez, D. Maystre. Chromatic dispersion and losses of microstructured optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(4): 634~639
- 19 A. M. Heidt. Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(3): 550~559
- 20 K. K. Chow, Y. Takushima, Chinlon Lin *et al.*. Flat supercontinuum generation in a dispersion-flattened nonlinear photonic crystal fiber with normal dispersion[C]. Optical Fiber Communication (OFC), 2006. OFH5
- 21 L. E. Hooper, P. J. Mosley, A. C. Muir *et al.*. Coherent supercontinuum generation in photonic crystal fiber with all-normal group velocity dispersion [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 10371~10376
- 22 F. Beguma, Y. Namihira, S. M. A. Razzak *et al.*. Design and analysis of novel highly nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(7): 1416~1421
- 23 Huifeng Wei, Weijun Tong, Jiangtao Guo *et al.*. Ultra-low loss all-solid photonic bandgap fibre[C]. 35th European Conference on Optical Communication (ECOC), 2009. 1~2
- 24 K. Reichenbach, C. Xu. The effects of randomly occurring nonuniformities on propagation in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 2799~2807

栏目编辑:王晓球