

矩形晶格微结构光纤偏振拍长稳定性的优化

林建强^{1,2} 石志东¹ 何伟¹ 季敏宁¹

(¹ 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

² 广西工学院信息与计算科学系, 广西 柳州 545006

摘要 针对纤芯两侧具有一对大圆孔的矩形晶格微结构光纤, 分别在两个正交方向上进行压缩或伸展, 利用多种非对称结构的双折射相互平衡与补偿, 抑制双折射随波长的非线性变化。应用全矢量有限差分波束传播法数值模拟分析了横向伸缩形变对模式双折射和偏振拍长色散特性的影响。通过优化设计, 找出了合适的伸缩因子, 有效降低了偏振拍长的波长敏感性。在 1.0~2.0 μm 波长范围内, 偏振拍长值在 90.7~95.3 mm 之间变化, 相对变化率约为 5%。这种矩形晶格微结构光纤适于制作宽带 1/4 波片。

关键词 光纤光学; 偏振拍长; 全矢量有限差分波束传播法; 微结构光纤; 模式双折射

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.110608

Optimization of Polarization Beat Length Stability of Rectangular Lattice Microstructure Optical Fiber

Lin Jianqiang^{1,2} Shi Zhidong¹ He Wei¹ Ji Minning¹

¹ Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

² Department of Information and Computation of Science, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China

Abstract A rectangular lattice micro-structure optical fiber with a pair of large circular holes near the core is squeezed or expanded in orthogonal directions. Nonlinear variation of birefringence with wavelength is suppressed by the compensation and equilibrium among the birefringence of multiple asymmetric structures. The influence of lateral deformation on modal birefringence and polarization beat length dispersion is analyzed by full-vector finite-difference beam propagation method. A suitable expansion factor is found by optimizing the design. The wavelength sensitivity of polarization beat length is effectively reduced. The polarization beat length changes in the range of 90.7~95.3 mm and the relative variation is about 5% in the wavelength range of 1.0~2.0 μm . This fiber is very suitable for making wideband fiber-optic quarter wave plate.

Key words fiber optics; polarization beat length; full-vector finite-difference beam propagation method; microstructure optical fiber; modal birefringence

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2370

1 引言

微结构光纤(MF)又称多孔光纤(HF)或光子晶体光纤(PCF),其截面几何结构参数,如包层空气孔大小、空气孔间距和空气孔形状等参数都可以灵活地调节,能够实现常规光纤无法实现的许多特性,如无截止单模传输、高双折射、高非线性效应、色散平坦和可调等^[1~10]。微结构光纤在色散补偿、超连续谱产生、脉冲

收稿日期: 2011-05-23; 收到修改稿日期: 2011-08-05; 网络出版日期: 2011-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(60777031, 11074164, 61107075)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)和广西教育厅科研立项项目(201010LX221, 201106LX403)资助课题。

作者简介: 林建强(1964—),男,博士研究生,主要从事微结构光纤优化设计方面的研究。E-mail: linwork@163.com

导师简介: 石志东(1964—),男,博士,研究员,主要从事特种光纤偏振特性方面的研究。E-mail: zdshi@shu.edu.cn

(通信联系人)

压缩、受激拉曼散射增强、光孤子通信和光纤陀螺等许多方面具有广阔的应用前景,因而成为光纤光学领域最活跃的研究热点。

波片是光通信和光传感系统中常用的光学器件,用于变换光的偏振态,在线偏振光和圆偏振光之间的相互转换中起着重要作用。传统的块状光学波片采用云母、石英等各向异性材料制作,不能与传输光纤直接相连,应用于光纤传感系统中会增加体积并引入较大的插入损耗。利用微结构双折射光纤制作光纤波片,可以克服传统块状光学波片的弊端,对于光纤通信和光纤传感的“全光纤化”具有重要意义。但是利用微结构双折射光纤制作光纤波片,目前仍有不少困难需要克服。通常情况下波片总是针对某个波长而言的,光纤通信和传感的“宽带化”意味着光纤波片必须在较宽的波长范围工作,而一般说来,未经优化的微结构双折射光纤的偏振拍长对波长的变化较为敏感,在常见工作波长范围内相对变化率超过 100%,这种偏振拍长的波长敏感性极大地限制了光纤波片的工作带宽,因此需要对微结构光纤的包层结构进行优化设计,使其偏振拍长具有平坦的色散曲线^[11,12],从而获得较大的工作带宽。文献[11]针对光纤包层为椭圆孔呈六边形排列、在纤芯位置有两个尺寸略大圆孔的微结构光纤进行优化,在 1310 nm 波长窗口得到了带宽大于 180 nm 的平坦拍长色散曲线。文献[12]针对包层为六边形椭圆微孔晶格阵列的微结构光纤,利用等比例横向伸缩来调节其双折射,在 1550 nm 波长窗口获得了中心拍长值约为 39.5 mm 的平坦拍长色散曲线,以 $2\pi/300$ 作为带宽容限,其工作波长的相对带宽可达 20%。

本文针对一种空气孔呈矩形晶格阵列、纤芯两侧有一对大孔的双折射微结构光纤,采用等比例横向伸缩的方法来进行偏振拍长稳定性的优化,研究结果表明这种矩形晶格微结构光纤具有更好的偏振拍长稳定性和更宽的相对带宽。通常的微结构光纤空气孔分布呈六边形晶格阵列,其预制棒的石英管(空气孔)采用三角形排列方法,这对于石英管为圆管的情形来说是较为紧密的排列方法,为了在拉制过程中使石英管相互结合得更加紧密,还可以把石英管的外壁磨制成六边形。而对于矩形晶格多孔光纤,其优点是石英管排列成矩形,可以把石英管的外壁磨制成矩形,在工艺上比磨制成六边形要容易些;另外,微结构光纤的空气孔一般为圆形,这与高温下熔石英在表面张力作用下保持圆柱状的情况是一致的。但是研究表明,椭圆气孔可以获得更高的双折射,随着工艺水平的提高,目前已经成功地拉制出了空气孔呈椭圆形的微结构光纤^[13],所以本文设计的矩形晶格微结构光纤在工艺上具有一定的可行性。

2 设计方案与数值方法

微结构光纤的偏振拍长 $L_B = \lambda / |B|$,其中 λ 为自由空间光波长, B 为模式双折射。偏振拍长的稳定性是指偏振拍长在一定波长范围内基本不随波长变化。由 $L_B = \lambda / |B|$ 可知,若要波长变化时 L_B 基本不变,就必须设法使 λ 与 B 同步线性变化。但是微结构光纤的双折射 B 一般随波长 λ 呈非线性指数变化,需在微结构光纤截面中引入各种非对称结构,利用各种非对称结构的双折射相互平衡和补偿,以抑制双折射随波长的非线性变化,扩大模式双折射 B 与波长 λ 同步线性变化的范围。

采用等比例横向伸缩的方法对矩形晶格微结构光纤进行结构参数的优化,如图 1 所示,通过伸缩比例的变化来调节非对称结构双折射的相互平衡和补偿。

纤芯附近的微气孔分布及尺寸如图 2 所示, L_x 和 L_y 分别为 x 和 y 方向上的晶格间距, D_x 和 D_y 分别为纤芯两侧大椭圆在 x 和 y 方向上的轴长, d_x 和 d_y 分别为本底椭圆在 x 和 y 方向上的轴长。等比例横向伸缩形变可以使这种包层结构产生三种类型的非对称性:非圆微孔($d_x \neq d_y, D_x \neq D_y$),纤芯两侧一对大孔($d_x \neq D_x, d_y \neq D_y$),晶格常数的纵横压缩($L_y \neq L_x$)。

将三种非对称性采用统一的伸缩因子 k 来加以约束限制,以降低工艺制作的难度。对于图 1(a) 所示的原型光纤,设本底圆形微孔直径为 d ,一对大圆孔直径为 D ,矩形晶格间距为 L 。令 $k^2 = d_x/d_y = D_x/D_y = L_x/L_y, k = 1.0$ 对应没有横向形变的原型光纤,这时 $d_x = d_y = d, D_x = D_y = D, L_x = L_y = L$ 。为简化计算,采用面积守恒的原则确定伸缩后的光纤结构尺寸: $d_x = kd, d_y = d/k, D_x = kD, D_y = D/k, L_x = kL, L_y =$

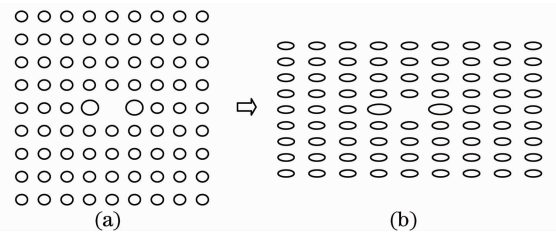


图 1 矩形晶格微结构光纤横向形变示意图

Fig. 1 Schematic lateral deformation of micro-structure optical fiber with rectangular lattice

L/k 。当 $k > 1.0$ 时,代表沿 y 方向的纵向压缩和 x 方向的横向伸展;当 $k < 1.0$ 时,代表沿 y 方向的纵向伸展和 x 方向的横向压缩。

微结构光纤的截面几何结构复杂多变,很难用解析方法求解,只能通过数值方法进行模拟求解。常用的数值方法有平面波展开法、时域有限差分法、有限元法、多极法和波束传播法等。这里采用全矢量有限差分波束传播法,通过数值模拟研究横向伸缩形变对矩形晶格微结构光纤的双折射与偏振拍长色散特性的影响。全矢量波束传播法的物理图像清晰直观,计算速度较快,能够对复杂几何形状的波导进行模拟。

波束传播法利用慢变包络近似沿传播方向(z 方向)将电磁场分量分解成快变项和慢变项,并代入亥姆霍兹方程,在横截面和轴向进行离散化处理,将微分方程化为差分形式,即可推导出微结构光纤内各点的场值:

$$j \frac{\partial E_x}{\partial z} = A_{xx} E_x + A_{xy} E_y, \quad (1)$$

$$j \frac{\partial E_y}{\partial z} = A_{yy} E_y + A_{yx} E_x, \quad (2)$$

$$j \frac{\partial H_x}{\partial z} = B_{xx} H_x + B_{xy} H_y, \quad (3)$$

$$j \frac{\partial H_y}{\partial z} = B_{yy} H_y + B_{yx} H_x, \quad (4)$$

式中 $A_{xx}, A_{xy}, A_{yx}, A_{yy}, B_{xx}, B_{xy}, B_{yx}, B_{yy}$ 为差分算子,边界上的场采用完全透明边界条件,通过邻近计算区域内的场量得到。

3 数值模拟结果与分析

原型微结构光纤的几何尺寸已经过初始优化, $d=2.24 \mu\text{m}$, $D=3.18 \mu\text{m}$, $L=4.48 \mu\text{m}$,当伸缩因子 k 在 $0.80 \sim 1.50$ 、波长 λ 在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的范围内变化时,该原型微结构光纤可以稳定地进行单模传输。将模拟计算的参数范围限定为 $k=0.85 \sim 1.30$,首先依次递进改变 k 值,计算双折射在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,根据该变化曲线缩小伸缩因子 k 的变化范围,再依次递进改变 k 值计算偏振拍长在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,从中找出最佳伸缩因子,从而获得偏振拍长最平坦的色散曲线。在数值模拟中,空气孔的折射率设定为 1.00 ,石英材料的折射率色散曲线由 Sellmeier 方程给出。

3.1 横向伸缩形变对矩形晶格微结构光纤双折射的影响

首先,对于图 1(a)所示的原型光纤,由 0.85 开始依次递进改变 k 值,直至 $k=1.30$,每次变化的增量取为 0.05 ,计算双折射在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,模拟结果如图 3(a)所示。

模拟结果表明,当 $k \leq 1.15$ 时,双折射在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内都为正值,双折射大小随着波长的增大而向正方向增大。当 $k \geq 1.20$ 时,双折射大小随着波长的增大而向负方向增大。双折射变化曲线随着 k 的增大而逐渐下移。

其次,根据图 3(a)所示变化曲线,模拟计算的参数范围可以进一步限定为 $k=1.160 \sim 1.190$,即由 1.160 开始依次递进改变 k 值,直至 $k=1.190$,每次变化的增量取为 0.005 ,计算双折射在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,模拟结果如图 3(b)所示。

模拟结果表明, $k=1.160$ 时,双折射在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内都为正值,双折射大小随着波长的增大而向正方向增大。 $k=1.165$ 时,双折射在 $1.0 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而向正方向增大,在 $1.9 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而减小。 $k=1.170$ 时,双折射在 $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而向正方向增大,在 $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而减小。 $k=1.175$ 时,双

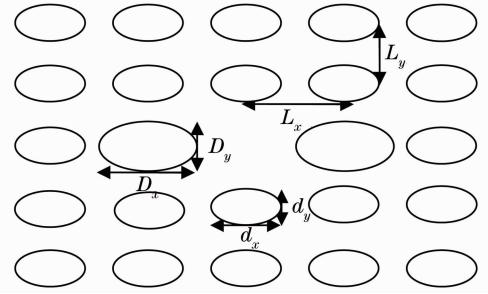


图 2 纤芯附近的微气孔形状及尺寸
Fig. 2 Shape, size and distribution of holes near the fiber core

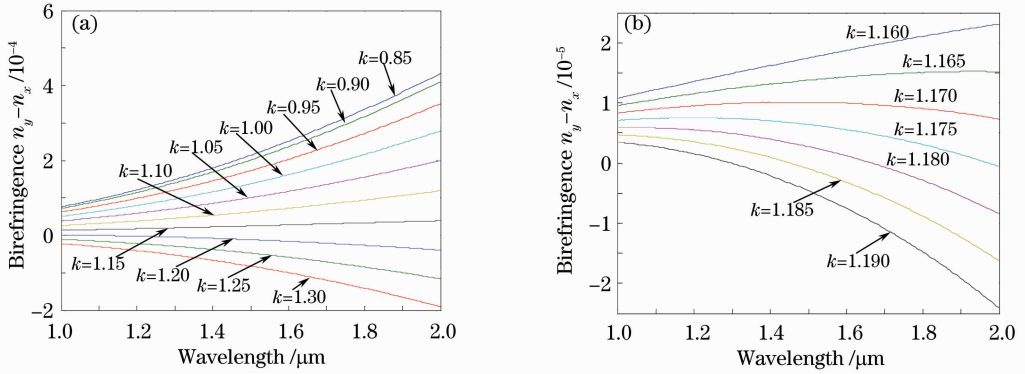


图3 双折射随波长的变化曲线。(a) k 由 0.85 增大至 1.30; (b) k 由 1.160 增大至 1.190

Fig. 3 Variation of birefringence with wavelength. (a) k increases from 0.85 to 1.30; (b) k increases from 1.160 to 1.190

折射在 $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而向正方向增大,在 $1.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内随着波长的增大而减小。当 $k \geq 1.180$ 时,双折射大小随着波长的增大而向负方向增大。双折射变化曲线随着 k 的增大而逐渐下移。

3.2 横向伸缩形变对矩形晶格微结构光纤偏振拍长的影响

根据图 3(b) 双折射随波长的变化曲线,伸缩因子 k 的变化范围限定为 $1.1610 \sim 1.1640$ 。首先,由 1.1610 开始依次递进改变 k 值,直至 $k = 1.1640$,每次变化的增量取为 0.0005 ,计算偏振拍长在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,模拟结果如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可见,在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内较平坦的偏振拍长色散曲线位于 $k = 1.1610$ 和 $k = 1.1615$ 之间。

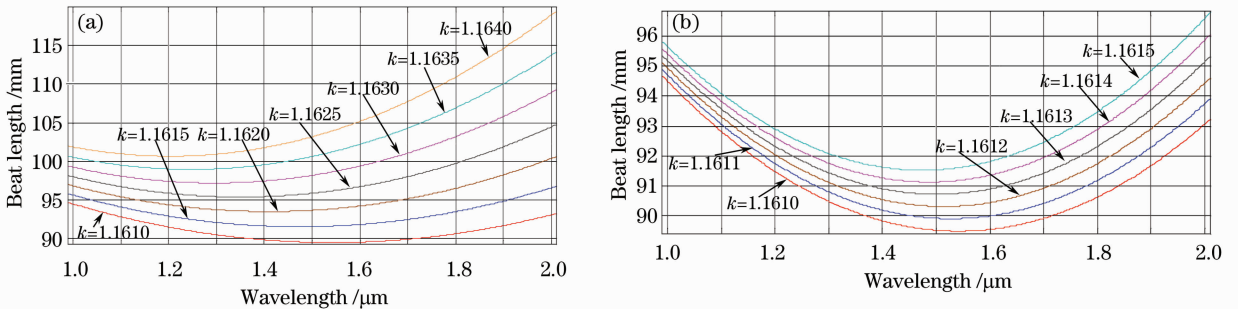


图4 偏振拍长随波长的变化曲线。(a) k 由 1.1610 增大至 1.1640; (b) k 由 1.1610 增大至 1.1615

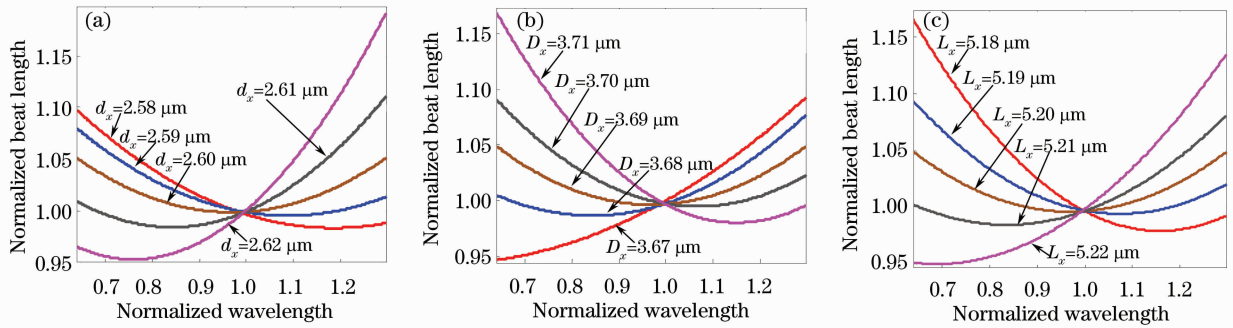
Fig. 4 Variation of polarization beat length with wavelength. (a) k increases from 1.1610 to 1.1640;

(b) k increases from 1.1610 to 1.1615

其次,由 1.1610 开始依次递进改变 k 值,直至 $k = 1.1615$,每次变化的增量取为 0.0001 ,计算偏振拍长在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的变化曲线,模拟结果如图 4(b) 所示。

模拟计算表明,只调节伸缩因子 k 一个参数,当 k 处于 $1.1610 \sim 1.1615$ 范围内时,在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内该微结构光纤都具有较稳定的偏振拍长曲线。以 $k = 1.1613$ 为例,根据原型微结构光纤的几何尺寸 $d = 2.24 \mu\text{m}$, $D = 3.18 \mu\text{m}$, $L = 4.48 \mu\text{m}$,可以得出其结构参数为 $d_x = kd = 2.60 \mu\text{m}$, $d_y = d/k = 1.93 \mu\text{m}$, $D_x = kD = 3.69 \mu\text{m}$, $D_y = D/k = 2.74 \mu\text{m}$, $L_x = kL = 5.20 \mu\text{m}$, $L_y = L/k = 3.86 \mu\text{m}$,在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内,拍长值在 $90.7 \sim 95.3 \text{ mm}$ 范围内变化,相对变化率约为 5% 。在 $1.1 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 波长范围内,拍长值在 $90.7 \sim 93.5 \text{ mm}$ 范围内变化,相对变化率约为 3% 。

在优化过程中,伸缩因子 k 的变化增量由 0.05 逐渐缩小到 0.0001 ,现有的微结构光纤制作工艺很难满足要求,因此必须考虑制作过程中引入的误差对拍长值及其波长稳定性的影响。在图 4(b) 中 $k = 1.1613$ 曲线对应结构参数的基础上,分别计算 d_x , D_x 和 L_x 的误差为 ± 0.01 和 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 时偏振拍长曲线的变化,如图 5 所示。以 $2\pi/300$ 作为带宽容限,表 1 列出了不同误差条件下 1550 nm 处的拍长值及对应的光纤 $1/4$ 波片工作带宽。

图5 归一化拍长随(a) d_x , (b) D_x 和(c) L_x 的变化Fig. 5 Normalized beat length with deviation of (a) d_x , (b) D_x and (c) L_x 表1 不同 d_x , D_x 和 L_x 误差条件下 1550 nm 处的拍长值及对应的 1/4 波片工作带宽Table 1 Beat length at 1550 nm and corresponding operating bandwidth with deviation of d_x , D_x and L_x

Deviation of d_x			Deviation of D_x			Deviation of L_x		
Error / μm	L_B /mm	Bandwidth /nm	Error / μm	L_B /mm	Bandwidth /nm	Error / μm	L_B /mm	Bandwidth /nm
-0.02	80.8	550	-0.02	74.8	275	-0.02	93.9	600
-0.01	84.5	700	-0.01	93.6	740	-0.01	88.2	700
0	91.0	700	0	91.0	700	0	91.0	700
+0.01	100.8	350	+0.01	88.6	720	+0.01	94.0	700
+0.02	112.3	200	+0.02	99.7	600	+0.02	99.1	220

从表1可以看出, d_x , D_x 和 L_x 的误差会使 1550 nm 处的拍长值产生一定幅度的偏差。在误差相同的条件下, d_x 的误差对拍长值的影响更大。应当指出的是, 拍长值的大小对于光纤波片的性能影响不大, 对于光纤波片的工作带宽来说更重要的是拍长色散的平坦性。 d_x , D_x 和 L_x 的误差控制在 0.01 μm 以下才能保证拍长在所要求的波长窗口内基本不变。当误差大于 0.02 μm 时, 拍长的波长稳定性将大幅下降。

4 结 论

通过横向伸缩形变可以有效地调节矩形晶格微结构光纤偏振拍长的色散曲线, 根据双折射随不同伸缩因子变化的色散曲线, 找出双折射与波长尽可能同步线性变化的曲线, 缩小伸缩因子变化范围, 从而在较小的伸缩因子变化范围内快速地获得偏振拍长较平坦的色散曲线, 这是一种便捷可靠的优化偏振拍长色散平坦的方法。横向形变可以一次引入多种非对称结构, 所有微气孔的椭率都相同, 相对于多种不同椭率共存的微结构光纤来说, 工艺难度进一步降低。所设计的光纤拍长值在 90.7~95.3 mm 范围内变化, 其 1/4 拍长为 23~24 mm, 截断这样的长度制作零级宽带光纤波片, 工艺上比较简单, 相对误差也比较小, 若用来制作 1550 nm 波长窗口零级 1/4 波片, 以 $2\pi/300$ 作为带宽容限, 其工作带宽可达 700 nm。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Wang Yanhong, Zhou Hanchang. High mode birefringence of photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 31~35
王艳红, 周汉昌. 光子晶体光纤的高模式双折射[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5): 31~35
- 3 Haifeng Xuan, Jian Ju, Wei Jin. Highly birefringent optical microfibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3828~3838
- 4 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562
龚桃荣, 延凤平, 王琳等. 高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562
- 5 Cheng Tonglei, Chai Lu, Li Yanfeng *et al.*. Novel cluster-solid-core photonic crystal fiber with high nonlinearity and large

- effective mode-field area[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 658~662
- 程同蕾, 柴路, 栗岩锋等. 具有高非线性和大有效模场面积的多固体芯集束型光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 658~662
- 6 Liang Fang, Jianlin Zhao, Xuetao Gan. Ultra broadband-flattened dispersion photonic crystal fiber for supercontinuum generation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1028~1031
- 7 Guo Changying, Li Aiping. Studies on mechanism of supercontinuum generation in anomalous dispersion region of photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 49~53
- 郭常盈, 李爱萍. 光子晶体光纤反常色散区超连续谱产生机理研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(7): 49~53
- 8 Guo Lixia, Wu Yanrong, Xue Wenrui *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 935~939
- 郭丽霞, 武延荣, 薛文瑞等. 复合六边形空气孔格点光子晶体光纤的色散特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 935~939
- 9 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
- 10 Li Mingjia, Shi Zhidong, Lin Jianqiang *et al.*. Optimized design for rectangular lattice holey birefringent fiber with wideband stable beat length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1950~1954
- 李铭佳, 石志东, 林建强等. 矩形晶格双折射多孔光纤宽带稳定拍长的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1950~1954
- 11 Li Mingjia, Shi Zhidong, Yin Jun *et al.*. Design for holey fiber with birefringent beat length independent of wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 665~670
- 李铭佳, 石志东, 殷俊等. 双折射拍长对波长不敏感的多孔光纤结构设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 665~670
- 12 Shi Zhidong, He Wei, Lin Jianqiang *et al.*. Influence of lateral deformation on polarization beat-length dispersion of holey birefringence fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 120601
- 石志东, 何伟, 林建强等. 横向形变对双折射多孔光纤偏振拍长色散特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 120601
- 13 Felipe Beltrán-Mejía, Giancarlo Chesini, Enrique Silvestre *et al.*. Ultrahigh-birefringent squeezed lattice photonic crystal fiber with rotated elliptical air holes[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 544~546