

2 μm 波段高双折射微结构磁流体光纤特性研究

郭玉玉¹, 延凤平¹, 刘硕², 张鲁娜¹

¹北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;

²河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401

摘要 设计了一种新型微结构光纤, 光纤包层中具有相互垂直的两对椭圆空气孔, 即两个较大的椭圆空气孔和两个较小的填充磁流体的椭圆孔, 四个孔包围形成一个类长方形的纤芯。采用有限元法仿真分析了它在 2 μm 波段的双折射特性和损耗特性, 并通过优化得到最佳光纤结构参数。仿真结果表明, 该光纤结构的模式双折射可以达到 10^{-3} , 限制损耗低于 $10^{-11} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 同时实现了高双折射和低限制损耗的设计目标。通过改变外界磁场可以改变磁流体材料的折射率, 进而改变光纤的有效折射率, 实现对光纤中所传输的偏振光相位的连续调谐。

关键词 光纤光学; 微结构光纤; 模式双折射; 限制损耗; 磁流体

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0406003

Characteristics Investigation of High Birefringent Micro-Structured Optical Fiber Filled with Magnetic Fluid at 2 μm Band

Guo Yuyu¹, Yan Fengping¹, Liu Shuo², Zhang Luna¹

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Communication Network of the Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract A new type of micro-structured optical fiber (MOF) is designed. The fiber cladding has two pairs of elliptical air holes that are perpendicular to each other. The larger holes are filled with air and the smaller holes are filled with magnetic fluid. The four holes form a rectangular core. The finite element method is utilized to simulate and analyze the birefringence and confinement loss of the fiber at 2 μm wavelength band, and the best fiber structure is obtained by the structure parameters optimization. The simulation results show that the optical fiber model birefringence can reach to 10^{-3} , while the loss is less than $10^{-11} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, thus, double standards of high birefringence and low confinement loss are achieved simultaneously. The refractive index of the magnetic fluid material can be changed by change of the external magnetic field, and then the effective refractive index of the fiber is changed. Consequently, the transmission of polarized light in the fiber can be tuned continuously.

Key words fiber optics; micro-structured optical fiber; mode birefringence; confinement loss; magnetic fluid

OCIS codes 060.4005; 260.1440; 160.4236

1 引 言

微结构光纤(MOF)由于具有灵活的设计结构、无截止单模传输特性^[1]、灵活的色散特性^[2]、高双折射特性、高非线性等特点, 被广泛应用于特种光纤器

件和光纤传感领域。根据导光原理的不同, 微结构光纤可以分为两大类: 第 1 类是全内反射型(TIR)微结构光纤^[3], 这类光纤的导光原理与传统光纤相同, 利用全内反射机制导光, 其纤芯的有效折射率高于包层, 又被称为折射率引导型微结构光纤; 第 2 类

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61327006, 61620106014)

作者简介: 郭玉玉(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事微结构光纤和光栅设计方面的研究。

E-mail: 15120072@bjtu.edu.cn

导师简介: 延凤平(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信方面的研究。

E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn(通信联系人)

是光子禁带型(PBG)微结构光纤^[4],这类光纤利用光子晶体的禁带效应导光,纤芯通常为空气或低折射率材料。

传统双折射光纤的双折射可以利用几何双折射和应力双折射两种方法引入,其模式双折射 B 通常只能达到 10^{-4} ,而对于微结构光纤,可以通过改变空气孔的形状、大小、孔间距及孔分布的方法,使双折射达到 10^{-2} 。同时,高双折射微结构光纤(HB-MOF)还有很多其他优点,比如单模工作范围大,设计自由度大,可通过设计实现双折射可调谐^[5]。通常通过破坏光纤纤芯或包层的几何对称性可使光纤产生较大的双折射,但采用包层不对称性提高双折射的同时也增加了限制损耗 L ,这主要依赖于光纤有效模式扩散到包层的程度,因此利用纤芯不对称提高模式双折射时还需降低限制损耗^[6]。光纤双折射的大小在很大程度上取决于纤芯和包层的折射率差^[7],较小的芯包折射率差很难得到较高的模式双折射,因此有的科研工作者通过在固体纤芯中插入微小的空气孔来使其具有非对称性。An 等^[8]在纤芯插入 4 个矩阵排列的小尺寸椭圆空气孔,使光纤在 1550 nm 波长处的双折射达到 10^{-2} ,损耗小于 $0.002 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$;刘旭安等^[9]提出在纤芯引入亚波长尺寸($0.16 \mu\text{m}$)的微型双孔结构阵列,可获得较高的双折射(10^{-3} 量级)和极低的限制损耗($10^{-4} \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$),但是这种小孔的存在增加了光纤制造的难度。

磁流体(MF)是一种新型功能性材料,具有热透镜效应、磁光效应、折射率(RI, n)可控性等的光学特性^[10-11],在传感器、光调制器、光开关等多方面有广泛应用。应用主要是针对磁流体的折射率可控性展开,当外磁场作用在磁流体上时,磁流体的折射率会随磁场强度的变化而变化,具有调谐性。影响磁流体折射率的因素有很多,除外磁场之外,还与磁流体本身的性质(如磁性粒子的类型和大小等)、磁流体温度等因素有关^[12],因此在研究外磁场对磁流体折射率的影响时要保持外界温度恒定。

近年来, $2 \mu\text{m}$ 波段的光纤激光器由于在测高、测距、大气遥感等方面具有重要的应用前景而受到广泛关注^[13], $2 \mu\text{m}$ 波段的掺铥光纤激光器也得到了快速发展。由于掺铥光纤有较宽的增益,可实现 $1.7\sim 2.1 \mu\text{m}$ 波段范围内的激光输出,该波段内的激光处于人眼安全波段,可广泛应用于激光雷达、激光医疗、特殊材料加工以及光学参量振荡器的抽运源等领域^[14]。2016 年,杨昌盛等^[15]分析了 $2 \mu\text{m}$ 波

段掺铥连续单频光纤激光器的实验研究进展,提出其还有很大的研究空间。为了保证掺铥光纤激光器输出激光波长的高稳定性、窄线宽和可调谐,通常采用各种结构的光栅充当激光器的腔镜,因此设计性能优良的 $2 \mu\text{m}$ 波长的光纤光栅对保证掺铥光纤激光器良好的输出特性意义重大。为了实现光栅的可调谐特性,首先设计一种新型的具有可调谐特性的微结构光纤,接着采用掩模板法在此种光纤上写制光栅,通过改变外界磁场实现光栅的调谐。针对传统光栅写入散射大的问题,任晓敏等^[16]提出一种新的微结构光纤光栅写入方法。

针对以上问题,本文设计了一种光纤结构,在包层有相互垂直的两对椭圆空气孔,减少了包层空气孔数量,同时增大空气孔尺寸,一定程度上减小了光纤制造难度,可以采用改进的堆积法制备^[17]。不对称的光纤结构同时实现了光纤的高双折射和低限制损耗,同时采用毛细管法^[18]在光纤水平空气孔中填充磁流体,通过改变外界磁场改变磁流体材料的折射率,进而改变光纤的有效折射率,达到对光纤中传输偏振光相位的连续调谐的目的。此后,若在此光纤上刻写光栅,就可以实现其在一定波段内的调谐特性。

2 基于磁流体填充的微结构光纤的设计

2.1 光纤结构

设计的新型微结构光纤横截面图如图 1 所示,光纤包层中两个较大的椭圆空气孔和两个较小的填充磁流体的椭圆孔包围形成一个类长方形的光纤纤芯。包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$,空气孔长半轴、短半轴分别用 a 、 b 表示,填充磁流体孔的长半轴、短半轴分别用 a' 、 b' 表示,设定 $b' = 2.2 \mu\text{m}$ 。

光纤基本材料为石英,其化学组成为二氧化硅(SiO_2), SiO_2 在某些波长上对电磁波存在谐振吸收现象,因此石英对光场的响应与波长 λ 有关,这表明不同波长下石英具有不同的折射率。石英折射率跟波长的关系可以由 Sellmeyer 公式^[19]给出

$$n_{\text{SiO}_2} = \sqrt{1 + \sum_{j=1}^N \frac{\lambda^2 B_j}{\lambda^2 - \lambda_j^2}}, \quad (1)$$

式中 B_j 和 λ_j 为石英材料的 Sellmeyer 常数,在所关心的光波段范围内,取 $N = 3$ 便可使式中 n_{SiO_2} 获得足够的精度。对于纯 SiO_2 , $B_1 = 0.69681$, $B_2 = 0.40817$, $B_3 = 0.89493$, $\lambda_1 = 0.06853$, $\lambda_2 = 0.11612$, $\lambda_3 = 9.9140$ 。

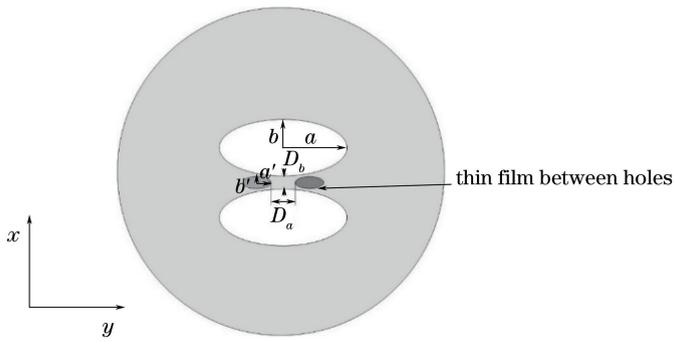


图 1 微结构光纤横截面图

Fig. 1 Microstructure fiber cross sectional view

磁流体的类型和静态参数与制作工艺密切相关,这里选用 Ferro-Tec 公司的 EMG605MF 磁流体,其静态参数如下:密度为 1.18,黏度低于 5 mPa·s,起始磁化率为 0.55,固体体积分数为 3.6。未施加外磁场时的 RI 为 1.405,当磁场从 0 增加到 500 Oe(磁场单位,奥斯特,1 Oe=1000/4π A/m)时,其 RI 由 1.405 减小为 1.365。

2.2 双折射特性

由于微结构光纤的不对称性,基模的两个偏振模不再简并,从而形成模式双折射,通常模式双折射 B 可以表述为两个正交传播方向上有效折射率的差,即

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\kappa_0} = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad (2)$$

式中 β_i 和 $n_{\text{eff}}^i (i=x, y)$ 分别为 i 偏振模的传播常数和有效折射率的实部, κ_0 为自由空间传播波数。 B 的值越大表明双折射越高。

外界无磁场时磁流体的折射率为 1.405,设定空

气孔长半轴 a 为 16 μm,短半轴 b 为 9 μm,填充磁流体孔的长半轴 a' 为 3 μm,固定光纤纤芯 D_b 为 4 μm, D_a 为 4, 6, 8 μm,在不同波长上分析模式双折射的变化,得到模式双折射随波长的变化如图 2 (a)所示,由图可见,随着波长增加,光纤双折射逐渐增大,在某一固定波长下,随着 D_a 增大,双折射 B 逐渐减小且减小的速度加快。固定光纤纤芯 D_a 为 4 μm,分别设定 D_b 为 4, 5, 6 μm,得到模式双折射随波长的变化如图 2(b)所示,由图可见,随着波长增大,光纤双折射也逐渐增大,在某一固定波长下,随着 D_b 变大,双折射 B 逐渐减小且减小的速度比图 2(a)更快。为了得到更大的双折射,要尽量减小 D_a 和 D_b 。但是考虑到纤芯尺寸越大越容易与其他单模光纤耦合,因此在实际使用中应当权衡这两个条件。为了得到较高的双折射,同时考虑到磁流体折射率变化范围,选取 $D_a \times D_b$ 为 4 μm × 4 μm,此时在 1950 nm 处得到的双折射为 2.13×10^{-3} 。

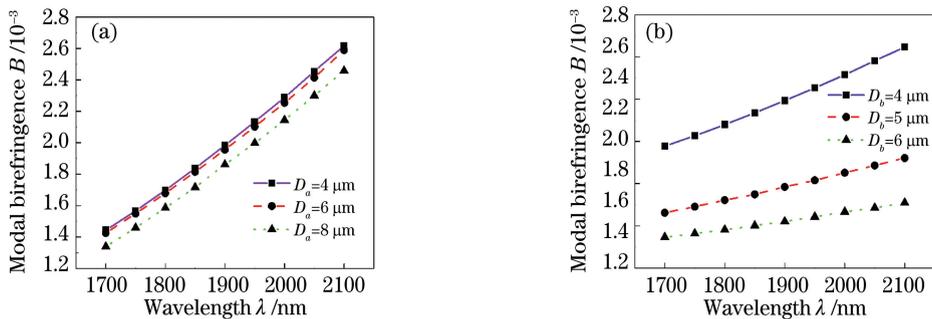


图 2 (a) $D_b = 4 \mu\text{m}, D_a = 4, 6, 8 \mu\text{m}$ 时模式双折射随波长的变化; (b) $D_a = 4 \mu\text{m}, D_b = 4, 5, 6 \mu\text{m}$ 时模式双折射随波长的变化

Fig. 2 (a) Modal birefringence versus wavelength when $D_b = 4 \mu\text{m}, D_a = 4, 6, 8 \mu\text{m}$;

(b) modal birefringence versus wavelength when $D_a = 4 \mu\text{m}, D_b = 4, 5, 6 \mu\text{m}$

当 $D_a \times D_b$ 为 4 μm × 4 μm 时,纤芯的非对称性降到了最低,此时固定 a, b, a' 中的两项,研究第 3 项对有效模式双折射的影响。此时模式双折射随波长的变化如图 3 所示,有效模式双折射随空气孔长

半轴 a 的增大而增大,随空气孔短半轴 b 的增大而减小,这是因为当空气孔增大时包层等效折射率降低,从而使纤芯有效模式折射率降低;增大空气孔长半轴 a 时,受 x 轴磁流体孔的影响, x 轴的纤芯

有效模式折射率相比 y 轴减小得更慢,所以双折射增大;而增大空气孔短半轴 b 时,空气孔与磁流体孔之间的薄膜增大, x 方向减小了对纤芯有效模式的限制,所以双折射减小。当保持空气孔尺寸不变,增大磁流体孔长半轴 a' 时,有效双折射逐渐增大,但增大幅度较小,这是因为磁流体有效折

射率大于空气有效折射率。当增大磁流体孔时,包层 x 轴方向等效折射率增大,从而纤芯 x 方向有效折射率增大,最终有效模式双折射增大,但由于磁流体孔尺寸较小,所选的磁流体有效折射率比较接近纤芯材料折射率,所以对有效模式双折射的影响不大。

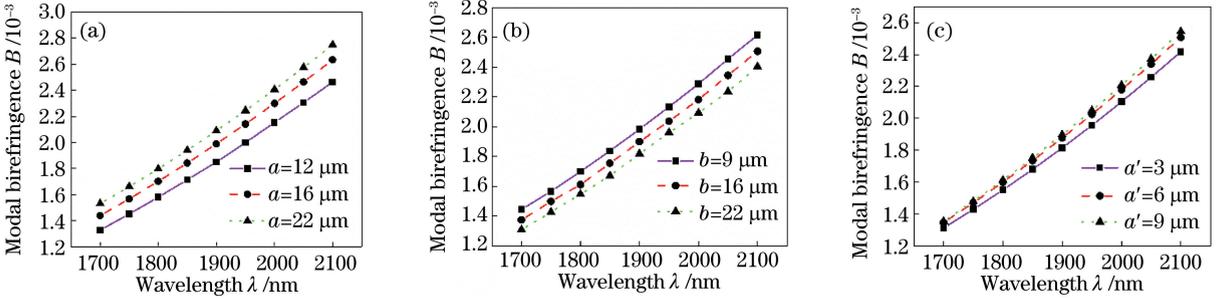


图 3 $D_a \times D_b = 4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 时模式双折射随波长的变化。(a)改变空气孔长轴 a ;
(b)改变空气孔短轴 b ;(c)改变填充磁流体孔尺寸 a'

Fig. 3 Modal birefringence versus wavelength when $D_a \times D_b = 4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$. (a) Change long axis a of air core; (b) change short axis b of air core; (c) change size of long axis a' of MF core

2.3 限制损耗

在光纤设计过程中,除了要实现高双折射,还要关注光纤的限制损耗,如果损耗过大、传光距离太短,则不能用于实际应用。光纤的限制损耗为

$$L = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \text{Im } n_{\text{eff}} \times 10^9 \quad (3)$$

式中波长 λ 以 nm 为单位, L 的单位为 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$, n_{eff} 为基模有效折射率, $\text{Im } n_{\text{eff}}$ 为有效折射率的虚部^[20]。

在光纤设计过程中,包层不对称性造成的高双折射往往也会产生较大的限制损耗,选定纤芯尺寸 $D_a \times D_b$ 为 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 时纤芯形状为类正方形,其不对称性降低到最小,此时分析其限制损耗,得到 x, y 方向限制损耗随波长的变化如图 4 所示, x, y 方向限制损耗在研究波段内是不断剧烈波动的,但其最大值也只有 $1.62 \times 10^{-11} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$, 远远低于普通光纤,满足设计要求。

2.4 有效折射率调谐特性分析

选定波长为 1950 nm , 空气孔长半轴 a 为 $16 \mu\text{m}$, 短半轴 b 为 $9 \mu\text{m}$, 填充磁流体孔的长半轴 a' 为 $3 \mu\text{m}$, 改变磁流体的有效折射率 n_{MF} 得到光纤有效折射率与磁流体有效折射率的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,在某一固定波长上,光纤纤芯有效折射率随磁流体折射率的增大而增大,在此定义 $\Delta n_{\text{eff}}^x, \Delta n_{\text{eff}}^y$ 分别为 x, y 方向有效折射率最大值和最小值的差值。

$$\Delta n_{\text{eff}}^x = \max n_{\text{eff}}^x - \min n_{\text{eff}}^x, \quad (4)$$

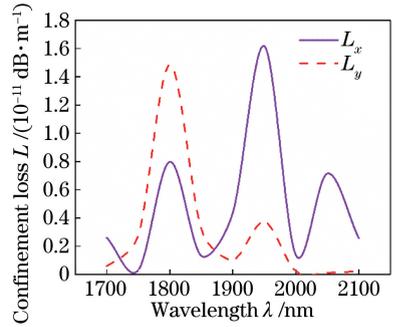


图 4 x, y 方向限制损耗随波长的变化
Fig. 4 Confinement loss versus wavelength at x, y directions

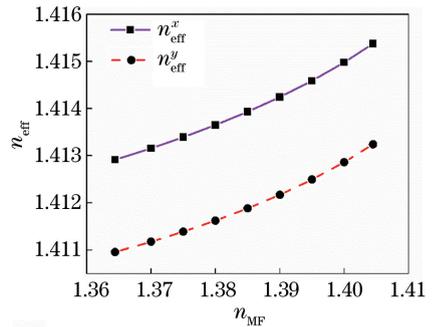


图 5 光纤有效折射率与磁流体有效折射率的关系
Fig. 5 Relationship between effective refractive index of optical fiber and magnetic fluid

$$\Delta n_{\text{eff}}^y = \max n_{\text{eff}}^y - \min n_{\text{eff}}^y. \quad (5)$$

分析 $\Delta n_{\text{eff}}^x, \Delta n_{\text{eff}}^y$ 与 D_a 的关系可得有效折射率差随波长的变化如图 6 所示。由图 6 可知, x, y 方向的有效折射率差随波长的增大而增大,并且在某

一固定波长上随 D_a 的增大而减小,这说明当 D_a 逐渐增大时,磁流体对基模有效折射率的调谐作用降低,磁流体孔越靠近纤芯,对基模有效折射率的调谐作用越大。分析 Δn_{eff}^x 、 Δn_{eff}^y 与 D_b 的关系可得有效折射率差随波长的变化如图 7 所示。由图可知, x 、 y 方向的有效折射率差随波长增大而增大,并且在

某一固定波长上随 D_b 的增大而减小,这说明当 D_b 逐渐增大时,磁流体对基模有效折射率的调谐作用也降低,但作用不是很明显,这是因为当纤芯两边的空气孔逐渐远离纤芯时,空气孔对纤芯有效折射率的作用减弱,相对来说磁流体孔对纤芯有效折射率的作用增强。

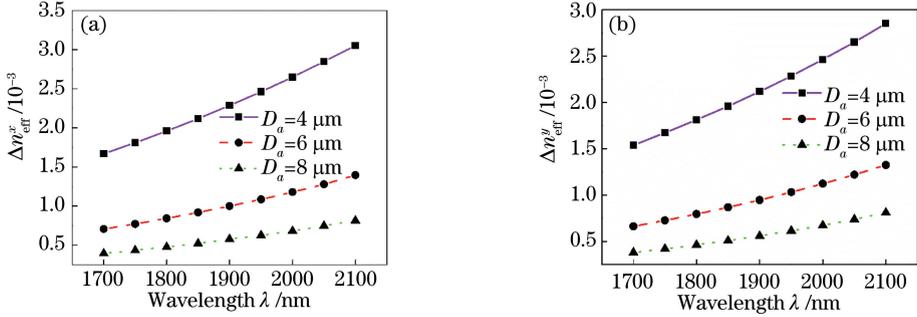


图 6 $D_a = 4, 6, 8 \mu\text{m}$ 时,有效折射率差随波长的变化。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 6 Effective refractive index difference versus wavelength when $D_a = 4, 6, 8 \mu\text{m}$.

(a) x direction; (b) y direction

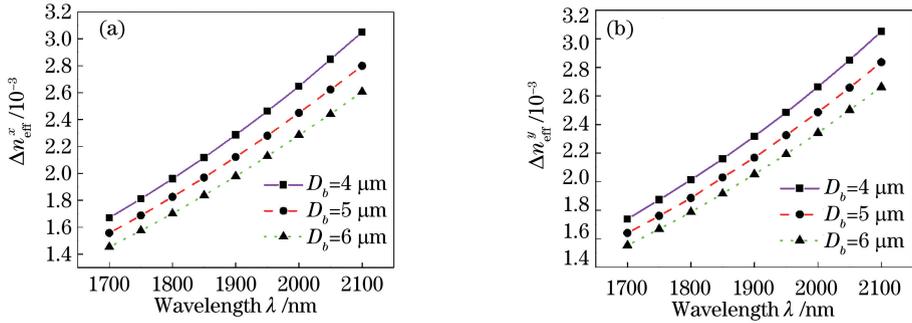


图 7 $D_b = 4, 5, 6 \mu\text{m}$ 时,有效折射率差随波长的变化。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 7 Effective refractive index versus wavelength when $D_b = 4, 5, 6 \mu\text{m}$.

(a) x direction; (b) y direction

2.5 对比分析

文献[6]中设计了一种光纤结构,在 1550 nm 处得到的双折射为 2.91×10^{-2} ,限制损耗低于 $1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,实现了高双折射低限制损耗双目标。本文在其基础上,扩大了包层半径和对应的空气孔尺寸,使其不仅更易制造,而且易于与其他单模光纤耦合,同时将研究波段移到 2 μm 处,最终仿真结果显示:在 1950 nm 处双折射为 2.13×10^{-3} ,限制损耗为 $1.62 \times 10^{-11} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。此外,本文在光纤小空气孔中填充了磁流体材料,研究了外界磁场对光纤纤芯有效折射率的调谐作用,可实现对光纤中传输偏振光相位的连续调谐。

3 结 论

提出一种新型的微结构光纤,并且在微结构光

纤包层空气孔内选择性填充磁流体,采用有限元软件分析了此种结构的双折射特性、限制损耗特性以及磁流体的调谐作用。通过平衡双折射和磁流体调谐量优化光纤结构,最终当纤芯尺寸 $D_a \times D_b$ 为 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$,空气孔长半轴 a 为 $16 \mu\text{m}$,短半轴 b 为 $9 \mu\text{m}$,填充磁流体孔的长半轴 a' 为 $3 \mu\text{m}$,磁流体折射率为 1.405 时,在 1950 nm 处得到双折射为 2.13×10^{-3} ,此时限制损耗小于 $1.62 \times 10^{-11} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,满足光纤通信要求;在 $0 \sim 500 \text{ Oe}$ 范围内改变外界磁场,磁流体折射率从 1.405 变为 1.365,得到 x, y 方向折射率差分别为 2.29×10^{-3} 和 2.12×10^{-3} 。利用此种微结构光纤得到的双折射参数,使用 Matlab 仿真分析了在此光纤上写制的布拉格光纤光栅的特性,仿真结果表明其在磁场 $0 \sim 500 \text{ Oe}$ 范围内可实现 $1946 \sim 1942.6 \text{ nm}$ 波段的调谐,调谐量为 3.4 nm 。

参 考 文 献

- [1] Ma X Y. Principle and application of photonic crystal [M]. Beijing: Science Press, 2010.
马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] He L, Yang B J, Zhang X G, *et al.* Characteristics of photonic crystal fiber and its application in optical communication [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, 12(4): 225-230.
何理, 杨伯君, 张晓光, 等. 光子晶体光纤特性及光通信中的应用[J]. *量子光学学报*, 2006, 12(4): 225-230.
- [3] Zhou G Y, Hou Z Y, Li S G, *et al.* Fabrication of glass photonic crystal fibers with a die-cast process [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4433-4436.
- [4] Humbert G, Knight J C, Bouwmans G, *et al.* Hollow core photonic crystal fibers for beam delivery [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1477-1484.
- [5] Liu Z Y, Wu C, Tse M L V, *et al.* Ultrahigh birefringence index-guiding photonic crystal fiber and its application for pressure and temperature discrimination [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1385-1387.
- [6] Tan X L, Geng Y F, Zhou J. A novel ultrahigh birefringent hole-assistant microstructured optical fiber with low confinement loss [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(7): 1331-1334.
- [7] Rashleigh S C. Wavelength dependence of birefringence in highly birefringent fibers [J]. *Optics Letters*, 1982, 7(6): 294-296.
- [8] An L, Zheng Z, Li Z, *et al.* Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss using four airholes in the core [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(15): 3175-3180.
- [9] Liu X A, Wu G Z, Chen D R, *et al.* Novel highly birefringent photonic crystal fiber based on an elliptical hole fiber cladding and a fiber core of double micro hole units [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1728-1732.
刘旭安, 吴根柱, 陈达如, 等. 基于椭圆孔包层和微型双孔纤芯的新型高双折射光子晶体光纤 [J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1728-1732.
- [10] Bakuzis A F, Neto K S, Gravina P P, *et al.* Magneto-optical properties of a highly transparent cadmium ferrite-based magnetic fluid [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(13): 2355-2357.
- [11] Wu D, Zhao Y, Lü R Q, *et al.* Analysis of tunable refractive index characteristics of the magnetic fluid [J]. *Journal of Northeastern University*, 2014, 35(7): 931-934.
吴迪, 赵勇, 吕日清, 等. 磁流体的折射率可调谐特性分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(7): 931-934.
- [12] Lin J C. Study of magnetic field sensing based on composite fiber gratings coated with magnetic fluid [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
蔺际超. 基于磁流体包覆复合光纤光栅的磁场传感器研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [13] Liu P P, Bai Y, Ren Z Y, *et al.* Research and progress of 2 μm fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 45-49.
刘沛沛, 白杨, 任兆玉, 等. 2 μm 光纤激光器的研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 45-49.
- [14] Liu J, Wang P. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0102001.
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102001.
- [15] Yang C S, Chen D, Zhao Q L, *et al.* Research progress of 2.0 μm -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201006.
杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201006.
- [16] Ren X M, Li X, Wang Z B, *et al.* Large side-hole microstructured optical fiber grating with high inscription efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0805001.
任晓敏, 李晓, 王志斌, 等. 高写入效率的大圆孔微结构光纤光栅 [J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0805001.
- [17] Guo W, Zhou G Y, Ni Y J, *et al.* Fabrication of micro-structure fiber by improved stacking capillary method [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(9): 1035-1038.
郭巍, 周桂耀, 倪永婧, 等. 利用改进的堆积法制备微结构光纤 [J]. *光电子 • 激光*, 2006, 17(9): 1035-1038.
- [18] Liu Y. Optical fiber sensing technology based on magnetic fluid filled microstructured optical fiber and mode coupling [D]. Nanjing: Nankai University, 2012.
刘妍. 基于磁流体填充微结构光纤和模式耦合的光纤传感技术 [D]. 南京: 南开大学, 2012.
- [19] Shen Y H, Qiu Y Q, Wu B, *et al.* Short cavity single frequency fiber laser for *in-situ* sensing applications over a wide temperature range [J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 363-370.
- [20] Arif M F H, Biddut M J H. A new structure of photonic crystal fiber with high sensitivity, high nonlinearity, high birefringence and low confinement loss for liquid analyte sensing applications [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2017, 12: 8-14.