

文章编号: 0258-7025(2007)05-0684-04

单偏振单模微结构聚合物光纤的设计

王韩毅^{1,2}, 任立勇¹, 张亚妮³, 姚保利¹, 赵 卫¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 宝鸡文理学院物理系, 陕西 宝鸡 721007

摘要 设计了一种聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基的单偏振单模(SPSM)微结构聚合物光纤(MPOF)。采用全矢量平面波展开法并结合完美匹配边界条件,对其偏振特性进行了理论模拟。详细讨论了微结构光纤参数的变化对单偏振单模带宽和工作波长的影响,发现在 $0.57\sim 0.71\ \mu\text{m}$ 的可见光波长范围,由于基模两个正交偏振模的截止波长不同,这种微结构聚合物光纤只能传输基模中的一个偏振模。光束传播法计算表明,在波长 $0.65\ \mu\text{m}$ 处具有 7 圈空气孔的单偏振单模微结构聚合物光纤的传导偏振模约束损耗仅为 $1.24\ \text{dB/m}$,这种低损耗的单偏振单模微结构聚合物光纤可有效消除传统保偏光纤固有的偏振串扰和偏振模色散。

关键词 光纤光学;微结构聚合物光纤;单偏振单模光纤;约束损耗

中图分类号 TN 929.1 文献标识码 A

Design of Single-Polarization Single-Mode Micro-Structured Polymer Optical Fiber

WANG Han-yi^{1,2}, REN Li-yong¹, ZHANG Ya-ni³, YAO Bao-li¹, ZHAO Wei¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Department of Physics, Baoji College of Arts & Science, Baoji, Shaanxi 721007, China

Abstract The single-polarization single-mode (SPSM) micro-structured polymer optical fiber (MPOF) was designed based on polymethyl methacrylate (PMMA). A full vector plane wave expansion method together with perfectly matched boundary conditions is adopted to study the SPSM properties. The dependence of SPSM bandwidth and operation wavelength on fiber parameters was investigated numerically. It indicates that only one polarization state of the fundamental mode can be transmitted within the visible light region from $0.57\ \mu\text{m}$ to $0.71\ \mu\text{m}$ according to the different cutoff wavelength for two orthogonal polarization modes. Moreover, the confinement loss of guiding mode is investigated using the beam propagation method. For MPOF with only 7 rings of holes, the confinement loss less than $1.24\ \text{dB/m}$ is obtained at the $0.65\ \mu\text{m}$. This low loss SPSM-MPOF can greatly eliminate the polarization crosstalk and polarization mode dispersion.

Key words fiber optics; micro-structured polymer optical fiber; single-polarization single-mode fiber; confinement loss

1 引 言

近年来,光子晶体光纤(PCF)也即微结构光纤,

由于其独特的光学性质^[1~3](如无尽单模、异常色散、高双折射、高非线性等)引起了人们的广泛关注。通过改变部分空气孔的形状、大小或者位置,可以在

收稿日期:2006-09-27;收到修改稿日期:2007-01-24

基金项目:国家自然科学基金(60337020)和中国科学院西安光学精密机械研究所所长基金(0654221ZZ0)资助项目。

作者简介:王韩毅(1980—),男,陕西韩城人,硕士研究生,主要从事特种光纤及其应用方面的研究。

E-mail:hanyiw@sina.com

导师简介:任立勇(1971—),男,陕西咸阳人,副研究员,主要从事光纤通信与光纤传感方面的研究。

E-mail:renliy@opt.ac.cn

纤芯形成对称或非对称的微结构从而引入几何双折射, 这种办法比较容易实现高双折射保偏光纤^[4~6], 其双折射比传统保偏光纤高一个数量级(可达 10^{-3})。高性能的保偏光纤在高速光通信系统和光纤传感器方面有重要的应用价值。通常, 偏振串扰和偏振模色散会影响保偏光纤的保偏性能, 而单偏振单模(SPSM)光纤由于只传输基模中的一个偏振态, 所以保偏性能不受影响。近来的研究表明高双折射的光子晶体光纤比传统保偏光纤更容易实现单偏振单模运转^[7,8], 而微结构聚合物光纤(MPOF)更因为其制作过程简单、灵活、成本低等优点, 愈来愈受到人们的关注^[9,10]。

本文采用全矢量平面波展开法并结合完美匹配边界条件从理论上分析了工作波长在可见光范围内的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基的单偏振单模微结构聚合物光纤的设计, 研究了微结构聚合物光纤微结构参数变化对单偏振单模工作波长范围的影响。

2 单偏振单模微结构聚合物光纤的设计

通常, 单偏振单模光纤^[11,12]的设计可以通过两种方法实现。其一是设计单模光纤只允许基模中的一个偏振态传导; 其二是使单模光纤基模的两个正交偏振态具有非常大的损耗差异。这里采用第一种方法实现单偏振单模聚合物光子晶体光纤的设计。由于分析微结构光纤的偏振特性时, 标量近似模型不再适用, 故采用全矢量平面波展开法并结合完美匹配边界条件对微结构聚合物光纤的模截止特性进行研究。全矢量平面波展开法的本质是将矢量波动方程通过傅里叶变换转变为本征值问题, 通过数值求解, 可以得到模场和相应的传输常数, 进而分析模场特性和偏振特性。

聚甲基丙烯酸甲酯基聚合物光纤随波长变化存在三个低损耗区, 即 $0.52 \mu\text{m}$, $0.57 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \mu\text{m}$, 为此, 以工作波长在 $0.65 \mu\text{m}$ 处为例讨论单偏振单模微结构聚合物光纤的设计和优化, 采用将纤芯附近两个空气孔放大来形成几何双折射的办法^[8,13], 光纤结构如图 1 所示。

由图 1 可知, 该光纤由 7 圈空气孔组成, 包层空气孔采用三角格子六角点阵排列, 取小孔直径为 $d_1 = 0.44 \mu\text{m}$, 大孔直径为 $d_2 = 1.14 \mu\text{m}$, 空气孔间距为 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.37$, $d_2/\Lambda = 0.95$ 。在纤芯附近引入两个较大的空气孔, 则使得纤芯水平方

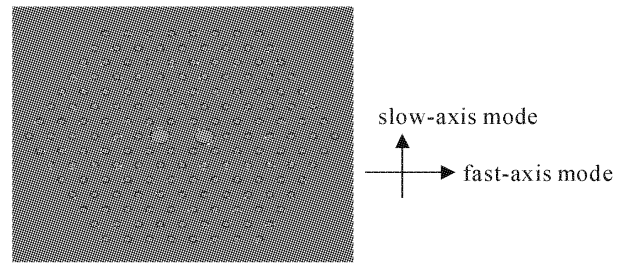


图 1 高双折射微结构聚合物光纤横截面图
Fig. 1 Cross-section of high birefringence MPOF

向折射率较小, 水平方向传输快轴模, 竖直方向传输慢轴模。这种设计破坏了光纤的六重对称性, 使光纤具有二重对称性而简并的两个正交偏振态退简并, 进而使得两个正交偏振模具有不同的截止波长。当两个正交偏振模的有效折射率都大于包层中基空间填充模(FSM)的有效折射率 n_{FSM} 时, 快轴模与慢轴模都可传导并在光纤中稳定传输; 当两个正交偏振模的有效折射率都小于 n_{FSM} 时, 对应的快轴模与慢轴模都是辐射模, 从而均被截止; 仅当快轴模的有效折射率 n_f 小于 n_{FSM} 而慢轴模的有效折射率 n_s 大于 n_{FSM} 时, 光纤中只有慢轴模存在而快轴模被截止, 从而实现了单偏振单模运转。

采用全矢量平面波展开法, 得到了图 1 所示光纤的快轴模、慢轴模及包层基空间填充模的色散曲线和慢轴模的模场分布, 分别如图 2(a)和(b)所示。从图 2(a)可以看出, 快轴模与慢轴模的截止波长分别为 $0.57 \mu\text{m}$ 和 $0.71 \mu\text{m}$, 在这两个波长之间仅能传导慢轴模, 快轴模变成辐射模而被截止, 单偏振单模的带宽(即两个截止波长之差)为 140 nm 。图 2(b)表明光束被很好地约束到纤芯中, 并且沿慢轴方向伸展。

为了得到工作波长在可见光范围的单偏振单模微结构聚合物光纤, 同时获得一个比较大的单偏振单模带宽。参考文献[14]在数值模拟过程中, 固定 $d_2/\Lambda = 0.95$, 改变光纤的结构参数 Λ 和 d_1/Λ 可以有效调节单偏振单模带宽、工作波长范围和双折射大小。首先固定 $\Lambda = 1 \mu\text{m}$ 不变, 改变 d_1/Λ 分别为 0.36 , 0.38 , 0.40 进行模拟计算, 色散曲线如图 3 所示。

可以看出, 快轴模与慢轴模的截止波长分别为 $0.46 \mu\text{m}$ 和 $0.56 \mu\text{m}$, $0.56 \mu\text{m}$ 和 $0.68 \mu\text{m}$, $0.65 \mu\text{m}$ 和 $0.78 \mu\text{m}$ 。随着 d_1/Λ 的增加, 慢轴模和快轴模的截止波长均向长波长方向移动, 并且单偏振单模带宽缓慢增加。因此调节 d_1/Λ 可以得到不同的工作波

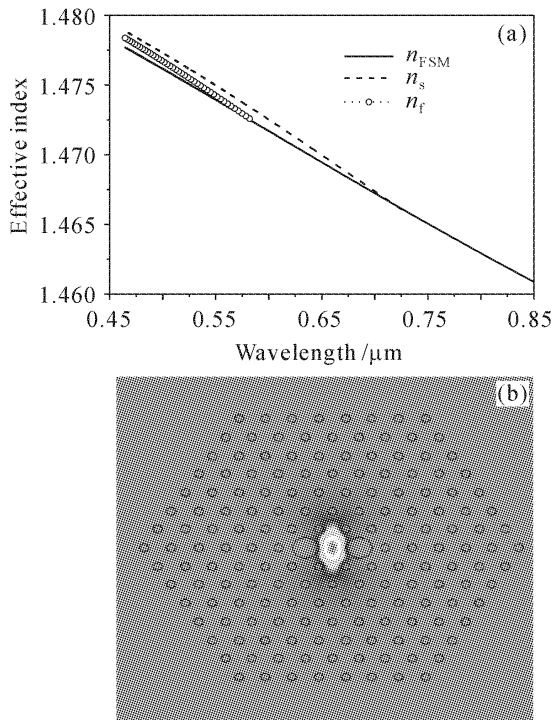


图 2

(a) 模的色散随波长的变化曲线;

(b) 入射光波长为 0.65 μm 时,慢轴模的光场分布图

Fig. 2

(a) modal dispersion curves as a function of wavelength; (b) intensity pattern of the slow-axis mode at the wavelength of 0.65 μm

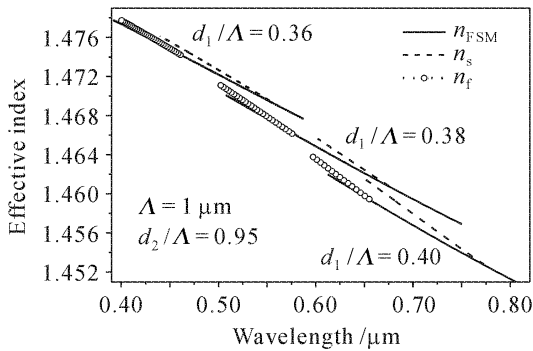


图 3 不同 d_1/Λ 情况下的色散曲线

Fig. 3 Modal dispersion curves as a function of wavelength for different d_1/Λ

长范围。其次,固定 $d_1/\Lambda = 0.36$,令 Λ 分别为 $1.0 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$ 的色散曲线如图 4 所示。由图 4 可知,快轴模与慢轴模的截止波长分别为 $0.46 \mu\text{m}$ 和 $0.56 \mu\text{m}$, $0.68 \mu\text{m}$ 和 $0.84 \mu\text{m}$, $0.92 \mu\text{m}$ 和 $1.13 \mu\text{m}$ 。随着 Λ 的增大,两个正交偏振模的截止波长均发生红移,且单偏振单模带宽也略有增大。因此改变空气孔的间距 Λ ,也可以改变单偏振单模工作范围。最后,针对聚甲基丙烯酸甲酯在波长 $0.65 \mu\text{m}$ 处这一工作窗口,研究了实现单偏振单模运转的条件,如图 5 所示。可以看出,随着空气孔周

期 Λ 的变化,必须同时调整 d_1/Λ 才能实现 $0.65 \mu\text{m}$ 附近的单偏振单模传输。当空气孔 Λ 取 $1.0 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$ 时,要使单偏振工作波长在 $0.65 \mu\text{m}$ 附近,对应的 d_1/Λ 分别应选为 0.38 , 0.37 , 0.34 ,相应的两个正交偏振模的截止波长分别为 $0.56 \mu\text{m}$ 和 $0.68 \mu\text{m}$, $0.57 \mu\text{m}$ 和 $0.71 \mu\text{m}$, $0.59 \mu\text{m}$ 和 $0.74 \mu\text{m}$ 。可见,当孔间距 Λ 较小时,需选取较大的 d_1/Λ 比值,才能使工作波长基本保持不变,同时,随 Λ 的增大,单偏振单模带宽基本不变。

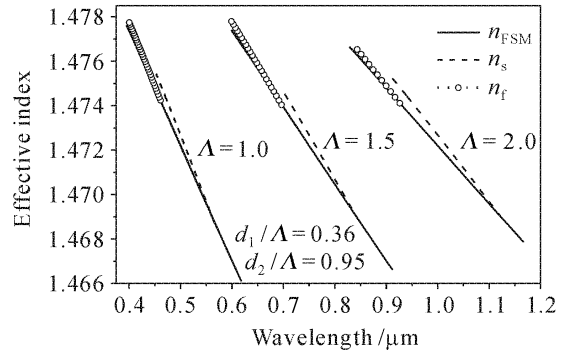


图 4 不同 Λ 情况下的色散曲线

Fig. 4 Modal dispersion curves as a function of wavelength with different Λ

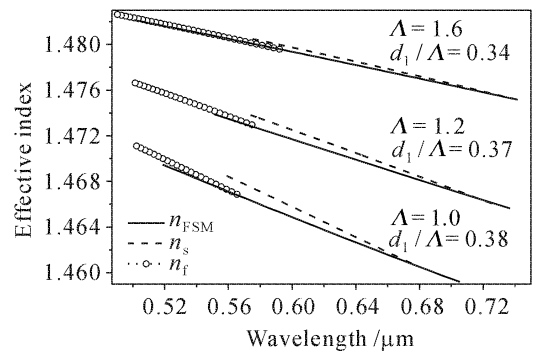


图 5 不同 Λ 和 d_1/Λ 时的色散曲线

Fig. 5 Modal dispersion curves as a function of wavelength for different Λ and d_1/Λ

由上述三方面的模拟计算可知,对于工作波长在 $0.65 \mu\text{m}$ 的图 1 所示的聚甲基丙烯酸甲酯基微结构光纤,为了得到较宽的单偏振单模带宽,应选择较小的空气孔间距 Λ 和恰当的 d_1/Λ 。

3 约束损耗

由于光子晶体光纤的包层中含有有限多个空气孔,因此纤芯中的导波模在传输过程中实际上是有泄漏的,这就是约束损耗。相对于约束损耗而言,光子晶体光纤的材料吸收、瑞利散射、弯曲损耗可以忽略不计。光束传播法在计算约束损耗方面具有概念

清晰、精确度高、计算速度快的优点。对于单偏振单模光纤,在其单偏振工作波长范围内快轴模被截止而只传导慢轴模。这里采用光束传播法并结合完美匹配边界条件先计算了慢轴模的传输常数 β ,然后根据^[15] confinement loss = $8.686\text{Im}[\beta]$ 计算出在可见光工作波长($0.65\ \mu\text{m}$)处聚甲基丙烯酸甲酯微结构聚合物光纤慢轴模的约束损耗随空气孔圈数的变化关系,如表 1 所示。可见,随着空气孔圈数的增加,约束损耗迅速减小。当空气孔圈数增加到 7 圈时它的约束损耗可降低到 1.24 dB/m。

表 1 波长为 $0.65\ \mu\text{m}$ 时慢轴模的约束损耗随空气孔圈数的变化

Table 1 Variation of confinement loss with the rings of air holes at wavelength of $0.65\ \mu\text{m}$

The rings of air holes	Confinement loss / (dB/m)
3	546.41
5	11.57
7	1.24
9	0.25

4 结 论

通过改变纤芯附近空气孔的大小,设计了高双折射聚甲基丙烯酸甲酯基微结构光纤。用全矢量平面波展开法和光束传播法相结合分析了这种光纤的光传输特性。理论计算表明,当选取光纤的微结构参数为 $\Lambda = 1.2\ \mu\text{m}$, $d_1 = 0.44\ \mu\text{m}$, $d_2 = 1.14\ \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda = 0.37$, $d_2/\Lambda = 0.95$ 时,在 $0.57\sim 0.71\ \mu\text{m}$ 的可见光范围内,只有慢轴模可以在光纤中传输,并且在波长 $0.65\ \mu\text{m}$ 处约束损耗可低于 1.24 dB/m,从而实现了单偏振单模运转,从根本上消除了偏振串扰和偏振模色散,为实际生产工作波长在可见光范围的单偏振单模聚甲基丙烯酸甲酯微结构光纤提供了理论依据。

参 考 文 献

1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**

(13);961~963
 2 E. S. Faramarz, R. Mahnaz, K. Vajieh. Parameter analysis of a photonic crystal fiber with raised-core index profile based on effective index method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8):442~445
 3 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
 王清月,胡明列,柴路.光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J].*中国激光*, 2006, **33**(1):57~66
 4 Wang Zhi, Li Xinbei, Wang Jingjing. Properties of uniform fiber Bragg grating in high birefringent photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1325~1328
 王智,李欣蓓,王晶晶.高双折射光子晶体光纤中均匀布拉格光栅的特性[J].*光学学报*, 2006, **26**(9):1325~1328
 5 Lou Shuqin, Ren Guobin, Wang Zhi et al.. Polarization properties of high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1503~1507
 娄淑琴,任国斌,王智等.高双折射光子晶体光纤的偏振特性研究[J].*中国激光*, 2004, **31**(12):1503~1507
 6 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth et al.. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1325~1327
 7 M. J. Steel, R. M. Osgood Jr.. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):495~503
 8 H. Kubota, S. Kawanishi, S. Koyanagi et al.. Absolutely single-polarization photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):182~184
 9 Yani Zhang, Kang Li, Lili Wang et al.. Casting preforms for microstructured polymer optical fibre fabrication [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12):5541~5547
 10 N. A. Issa, M. A. van Eijkelenborg, M. Fellew et al.. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12):1336~1338
 11 K. S. Chiang. Stress-induced birefringence fibers designed for single-polarization single-mode operation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(2):436~441
 12 K. Saitoh, M. Koshiba. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10):1384~1386
 13 Jian Ju, Wei Jin, M. S. Demokan. Design of single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1.30 and 1.55 μm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2):825~830
 14 G. Kakarantzas, A. Ortigosa-Blanch, T. A. Birks et al.. Structural rocking filters in highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3):158~160
 15 K. Saitoh, M. Koshiba. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2):236~238