

八边形高双折射二零色散点光子晶体光纤特性分析*

王伟[†] 杨博 宋鸿儒 范岳

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2011年9月29日收到; 2011年11月22日收到修改稿)

针对光纤通信和传感系统中高双折射、二零色散点的应用需求, 设计了一种新型结构的光子晶体光纤. 该结构包层为圆形空气孔按照八边形形状排列而成, 并在内包层对称位置中加入两个椭圆空气孔以获得高双折射特性. 通过有限元数值分析方法对光纤特性进行分析, 仿真结果表明, 该结构光子晶体光纤在波长 $0.8\text{--}2\ \mu\text{m}$ 范围内双折射可达 10^{-3} 量级, 满足高双折射的应用需求, 并且满足两个二零色散点的应用需求. 同时光纤的非线性系数达 $10^{-2}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ 量级, 可应用于对非线性要求较高的场合.

关键词: 光子晶体光纤, 双折射, 色散, 非线性系数

PACS: 46.40.Cd, 42.25.Lc, 42.79.Gn, 42.70.Mp

1 引言

光子晶体光纤是近些年来出现的一种新型光纤结构. 和传统光纤相比, 其所具有的独特特性, 如无截止单模传输、高双折射、高非线性及可调的色散特性等^[1-4]使得光子晶体光纤在光纤通信和传感系统等诸多领域具有广泛的应用前景.

近年来, 随着光纤通信和传感系统中对光纤性能的要求越来越严格, 研制具有高偏振、低损耗特性的光纤成为现今的研究热点. 而光子晶体光纤所特有的高双折射和灵活可调的色散特性使其一出现便迅速引起科研工作者的注意. 近年来的研究发现, 通过在光纤包层或者纤芯中引入非对称结构可显著增强光纤的双折射特性^[5], 并针对此进行了大量的研究. 同时, 随着数值分析方法的日益完善, 针对光子晶体光纤的高精度仿真也取得了巨大的成就, 并设计了满足不同特性需求的光子晶体光纤结构. 如李建华等^[6]通过在光纤包层中不同位置填充液晶材料获得双折射达 10^{-3} 量级的光子晶体光

纤结构, 并且发现通过调节液晶的特性实现了对双折射特性的可调谐. 闫海峰等^[7]设计了一种全内反射型八边形光子晶体光纤, 并对其传输特性和非线性特性进行了研究, 得到在入射波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 低损耗窗口处具有较平坦非线性特性. 而姜凌红等^[8]应用多极法研究了正六边形光子晶体光纤结构参数对二零色散光子晶体光纤的色散特性和非线性系数的影响, 最终得到在 $800\ \text{nm}$ 附近具有平坦色散和高非线性的正六边形二零色散光子晶体光纤结构.

随着对光子晶体光纤的研究越来越成熟, 研究高性能的光子晶体光纤结构、拓宽光子晶体光纤的应用领域、提高光纤传感和通信系统的性能成为当前的研究重点. 而现有的光纤结构中, 尤以双折射和色散特性对光纤通信系统的影响最为严重. 因此, 各院校和科研机构做了大量的研究以提高光子晶体光纤的特性, 使其能够早日在实践中得到应用.

本文针对光子晶体光纤中高双折射的应用需求, 设计了一种八边形混合结构光子晶体光纤, 通

* 国家自然科学基金(批准号: 60704018)及中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: HEUCF110433 和 HEUCFZ1110)资助的课题.

[†] E-mail: chinaww2006@126.com

过调整内包层对称位置两个椭圆孔的椭圆度,可获得满足不同性能要求的光子晶体光纤结构. 数值仿真结果表明,该结构的光子晶体光纤的双折射可达 10^{-3} 量级,并在 $0.8 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 之间可以获得两个零色散点. 同时,该结构的光子晶体光纤的非线性系数可达 $10^{-2} \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 量级,满足一定应用场合的需求.

2 理论基础

本文所设计的高双折射光子晶体光纤结构如图 1 所示. 该结构的光子晶体光纤包层为圆形空气孔按照八边形环状排列而成,其中最内层在如图 1 所示对称位置加入两个椭圆孔增强光纤端面结构的非对称性获得高双折射特性. 图中, Λ 为圆孔间距, a 和 b 分别为内层椭圆的短半轴和长半轴, d 为圆形空气孔的直径.

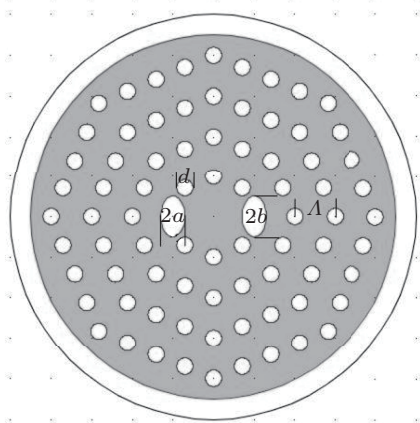


图 1 高双折射混合结构光子晶体光纤结构图

本文主要通过有限元^[9]数值分析软件 COM-SOL Multiphysics 4.0 对光纤 HE_{11} 模特性进行分析. 分别研究了光子晶体光纤的双折射、色散和非线性特性与内包层椭圆孔的椭圆率和传输波长的关系,其中椭圆的椭圆率 $\alpha = a/b$.

通过仿真可得到光纤的有效折射 n_{eff} 的复数形式,其中有效折射率的实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 可用来进行光纤波导色散的计算. 波导色散可由下式得到^[10]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}, \quad (1)$$

(1) 式中 c 为真空中的光速, λ 为波长, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为有效折射率的实部.

为计算光子晶体光纤的双折射,选取沿 x, y 两个方向偏振模式的折射率进行求解. 光子晶体光纤的双折射可由下式计算^[11]:

$$B = |n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}|, \quad (2)$$

(2) 式中, B 为光子晶体光纤的双折射, $n_{\text{eff}x}$ 和 $n_{\text{eff}y}$ 分别为沿 x, y 两个方向的偏振模的有效折射率.

光子晶体光纤的非线性系数为^[12]

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

(3) 式中, γ 为非线性系数, n_2 为硅的非线性折射率系数, A_{eff} 为有效模面积,可通过下式求得:

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint_S |E_t|^2 dx dy)^2}{\iint_S |E_t|^4 dx dy}, \quad (4)$$

(4) 式中, A_{eff} 为有效模面积, E_t 为求解得到的光纤截面电场分布, S 为光纤的截面面积.

3 数值模拟与结果分析

本文主要通过使用有限元数值分析软件 COM-SOL Multiphysics 4.0 对光子晶体光纤 HE_{11} 模 x 偏振模式特性进行分析. 在仿真过程中,为了计算方便,选取孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $d = 0.8 \mu\text{m}$ 及 $b = 1 \mu\text{m}$. 仿真结果如下.

3.1 功率分布

图 2(a)—(d) 为传输波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 时,未改变圆孔形状和加入椭圆率分别为 $\alpha = 0.4$, $\alpha = 0.6$ 和 $\alpha = 0.8$ 的椭圆空气孔时光纤 x 偏振模式功率分布. 从图 2 中可以发现,光能量主要集中于纤芯传输,当内包层为同一直径的圆形空气孔时,光纤的功率分布较为分散,这将在一定程度上造成光纤的损耗较大. 而加入椭圆空气孔后,使得光纤的功率分布变得扁平,这样使得模场分布更加集中. 同时,随着椭圆率的增加,光纤的功率分布变得更加扁平,这在一定程度上降低了由于功率扩散带来的光纤损耗.

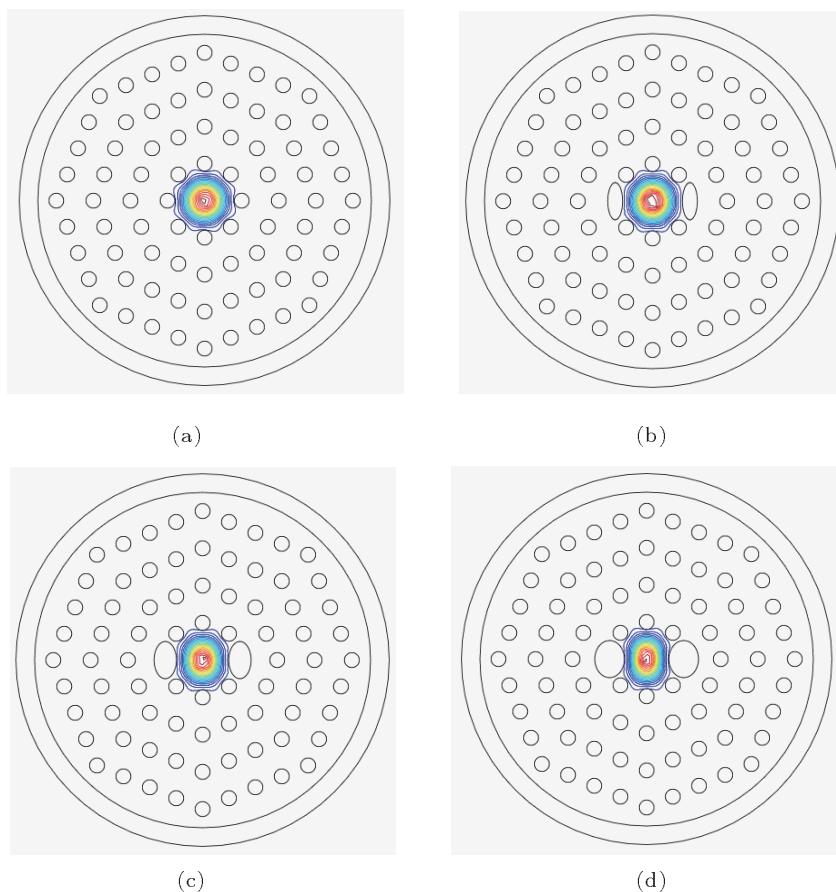


图2 传输波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 功率分布与椭圆率 α 的关系 (a) 未加椭圆; (b) 椭圆率 $\alpha = 0.4$; (c) 椭圆率 $\alpha = 0.6$; (d) 椭圆率 $\alpha = 0.8$

3.2 有效折射率

图3所示为椭圆率分别为 $\alpha = 0.4$, $\alpha = 0.6$ 和 $\alpha = 0.8$ 光子晶体光纤的有效折射率与传输波长的关系. 从图中可以看出, 光纤的有效折射率随着传输波长的增加而减小. 而针对不同椭圆率的仿真结果表明, 当椭圆度增大时, 光纤的有效折射率稍微降低, 这主要是由于当椭圆率增大时, 光纤结构

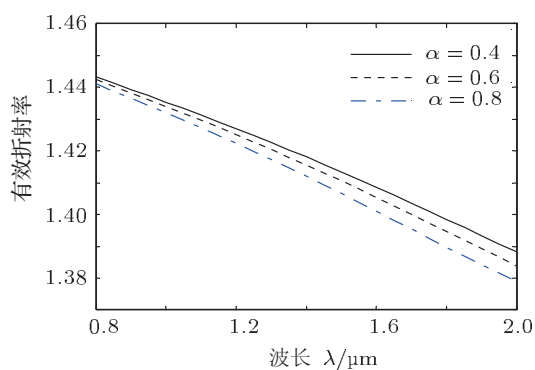


图3 有效折射率与传输波长的关系

中空气的比重随着增加所致.

3.3 色散

本文在得到有效折射率数据基础上, 通过曲线拟合法对光子晶体光纤 HE_{11} 模 x 偏振模式的波导色散进行拟合仿真, 结果如图4所示. 从图4中可

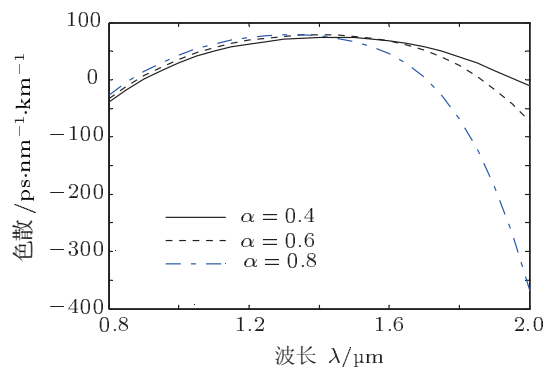


图4 色散与传输波长的关系

以看出, 该结构的光子晶体光纤在 $0.8 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 波段之间满足两个零色散点的应用需求. 在长波长方向, $\alpha = 0.4$, $\alpha = 0.6$ 和 $\alpha = 0.8$ 时的零色散点分别位于 $\lambda = 1.96, 1.865$ 和 $1.71 \mu\text{m}$ 处, 而短波长方向的零色散点分别位于 $\lambda = 0.9, 0.883$ 和 $0.863 \mu\text{m}$ 处. 由此表明, 该光子晶体光纤零色散点位置随着椭圆率的增加向短波长方向移动.

3.4 双折射

图 5 所示为光子晶体光纤的双折射特性与椭圆率和传输波长的关系. 从图 5 中可以看出, 传输波长为定值时, 内包层中椭圆的椭圆率对双折射特性有着重要的影响, 椭圆率越大, 光纤的双折射越高, 这从图 5 中 $\alpha = 0.4$, $\alpha = 0.6$ 和 $\alpha = 0.8$ 时的双折射曲线图中可以看出. 从图 5 中还可以发现, 这种光子晶体光纤结构的双折射值达 10^{-3} 量级, 满足高双折射的需求, 且双折射曲线随着传输波长的增加而增加, 其中当 $\alpha = 0.8$, 波长 $\lambda > 1.9 \mu\text{m}$ 双折射反而降低, 这是由于波长增加光能逐渐扩散所致. 由于光纤的偏振特性与光纤的双折射特性密切相关, 因此, 该光子晶体光纤的高双折射特性可应用于对偏振特性要求较高的场合.

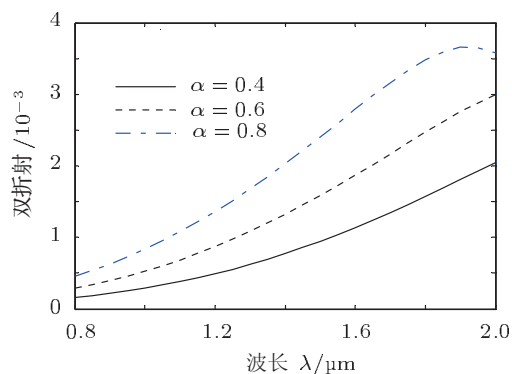


图 5 双折射与传输波长的关系

3.5 非线性系数

光子晶体光纤的高非线性特性具有广泛的应用价值, 可应用于非线性光学的诸多方面, 如超连续谱的产生、非线性光源等. 高非线性对于光子

晶体光纤的应用具有重要的影响. 本文对所设计光子晶体光纤结构的非线性系数与椭圆率和传输波长的关系进行仿真分析, 结果如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 光纤的非线性系数随着传输波长的增加而降低, 且非线性系数可达 $10^{-2} \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ (或 $10 \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) 量级, 满足特定场合的高非线性需求. 同时, 从图 6 中可以看出, 当 $\lambda < 1.6 \mu\text{m}$, 光纤的非线性系数随着椭圆率的增加而增加. 而当 $\lambda \geq 1.6 \mu\text{m}$ 时, 光纤的非线性特性较为复杂, 这是由于当传输波长增加时, 纤芯对光的局限性变差, 从而导致光能量向光纤包层中扩散所致. 因此, 在实际应用中应当合理选择光的结构参数及传输波长, 尽可能降低由于光扩散带来的损耗.

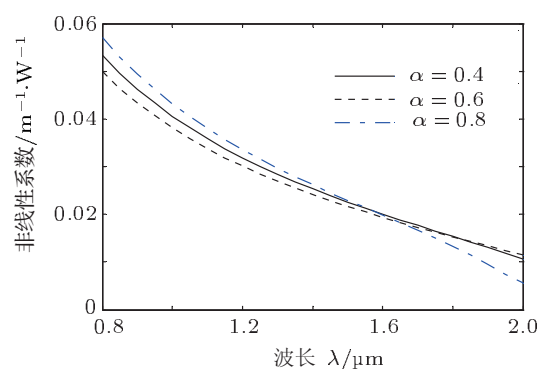


图 6 非线性系数与传输波长的关系

4 结论

本文针对光纤通信和传感系统中高双折射、多零色散点和高非线性的应用需求, 设计了一种新型结构光子晶体光纤. 数值分析表明, 通过改变光纤内层该种结构光纤的双折射在 $0.8-2 \mu\text{m}$ 波长范围内达到 10^{-3} 量级, 满足高双折射要求, 并在该波长范围内还得到具有两个零色散点的光子晶体光纤结构. 同时, 分析还发现, 该光纤的非线性系数也可达 $10^{-2} \text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ (或 $10 \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) 量级. 由此表明, 该种结构光子晶体光纤的综合性能优于现有的传统光纤, 在光纤通信和传感等领域具有一定的应用价值.

- [1] Zhang L, Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang M Y, Zheng Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1101 (in Chinese) [张磊, 李曙光, 姚艳艳, 付博, 张美艳, 郑义 2010 物理学报 **59** 1101]
- [2] Cheng T L, Chai L, Li Y F, Hu M L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024216 (in Chinese) [程同蕾, 柴路, 栗岩锋, 胡明列, 王清月 2011 物理学报 **60** 024216]
- [3] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [4] Cui Y L, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2571 (in Chinese) [崔艳玲, 侯蓝田 2010 物理学报 **59** 2571]
- [5] Suzuki K, Kubota H, Kawanishi S, Tanaka M, Fujita M 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [6] Li J H, Wang R, Wang J Y, Liu Y 2011 *Opt. Engineering* **50** 025001-1
- [7] Yan H F, Yu Z Y, Tian H D, Liu Y M, Han L H 2010 **59** 3273 (in Chinese) [闫海峰, 俞重远, 田宏达, 刘玉敏, 韩利红 2010 物理学报 **59** 3273]
- [8] Jiang L H, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1095 (in Chinese) [姜凌红, 侯蓝田 2010 物理学报 **59** 1095]
- [9] Minkyu P, Hesam E A, Sejin L, Kyunghwan O 2011 *Opt. Commun.* **284** 4914
- [10] Boris K, Gilles R, Daniel M 2003 *Appl. Opt.* **42** 634
- [11] Zhang M Y, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Fu B, Yin G B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3278 (in Chinese) [张美艳, 李曙光, 姚艳艳, 张磊, 付博, 尹国冰 2010 物理学报 **59** 3278]
- [12] Limpert J, Schreiber T, Nolte S 2003 *Opt. Express* **11** 818

Characteristic analyses of high birefringence and two zero dispersion points photonic crystal fiber with octagonal lattices*

Wang Wei[†] Yang Bo Song Hong-Ru Fan Yue

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Received 29 September 2011; revised manuscript received 22 November 2011)

Abstract

Aiming to the requirements of high birefringence and multiple zero dispersion points of optic-fiber sensing and communication systems, a new type of photonic crystal fiber (PCF) is proposed. The cladding is arrayed by octagonal air holes, and two big elliptical air holes are added in inner cladding to increase the birefringence. Numerical results show that this type of PCF exhibits high birefringence with a level of 10^{-3} when wavelength ranges from 0.8–2 μm , which fulfils the requirement of high birefringence, and two zero dispersion points are obtained after optimization. In addition, high nonlinear coefficient with a level of $10^{-2} \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ is obtained, which could be used in the case where the nonlinearity is highly required.

Keywords: photonic crystal fiber, birefringence, dispersion, nonlinear coefficient

PACS: 46.40.Cd, 42.25.Lc, 42.79.Gn, 42.70.Mp

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60704018) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. HEUCF110433, HEUCFZ11110).

[†] E-mail: chinaww2006@126.com