

菱形纤芯光子晶体光纤色散与双折射特性分析*

王伟[†] 杨博

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2010年12月1日收到; 2011年5月23日收到修改稿)

针对光子晶体光纤多零色散点、高双折射的应用要求,设计了一种新型结构的光子晶体光纤,其纤芯由位于菱形四个角上的圆形空气孔组成.通过有限元数值分析方法对该种结构光子晶体光纤的色散特性和双折射特性进行数值仿真,得到色散与波长、色散与纤芯圆孔尺寸、双折射与波长、双折射与纤芯圆孔尺寸的关系.研究表明:在满足光纤传输功率要求的条件下,光纤的双折射在 $d_1 < 0.8 \mu\text{m}$ 时的性能较好.同时,该种结构的光子晶体光纤在芯区直径满足 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 或 $d_1 = 0.6 \mu\text{m}$ 时会出现两个零色散点,这对进一步研制具有多零色散点的光子晶体光纤具有重要的意义.

关键词: 色散, 双折射, 光子晶体光纤, 有限元

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

1 引言

光子晶体光纤是一种具有独特结构的光子晶体材料,其光纤包层为空气和单一材料的周期结构,纤芯为空气或者实芯材料(如:掺杂其他材料),因此又称微结构光纤或多孔光纤.光子晶体光纤的这种独特结构决定了其具有传统光纤所不具有的特性,如:无截止单模特性、灵活可调的色散特性等.近年来,国外高校和科研机构针对不同的应用需求设计了多种结构的光子晶体光纤,如:双芯结构、三芯结构等,并使用光子晶体光纤制作了包括光纤耦合器和滤波器在内的多种光学器件^[1-4].国内在光子晶体光纤结构研究方面也取得了一定的进展,如:设计了六边形^[5]、八边形^[6]、渐变空气孔^[7]和混合结构^[8]等光子晶体光纤.经多年的研究发现,通过在光纤中填充液晶材料可显著改变光纤的特性,李建华等^[9]通过在光纤包层中加入液晶材料并对其双折射特性进行分析发现,通过调节液晶材料的折射率可实现对光纤双折射的可调谐.吴维庆等^[10]设计了混合纤芯光子晶体光纤,并对其超平坦色散特性进行了分析,研究发现该结构光子晶体光纤在通信窗口 $1.55 \mu\text{m}$ 附近可以获得带宽超过 800nm 的超平坦色散特性.然而,现今针对光子

晶体光纤零色散点的研究仍处于起步阶段,大部分光子晶体光纤结构的零色散点只有一个,这与多零色散点的应用需求相悖,因此,针对光子晶体光纤多零色散点的研究显得尤为重要.本文在此基础上设计了一种具有多零色散点的光子晶体光纤结构,并对其特性进行分析.

本文设计了一种具有菱形纤芯的光子晶体光纤结构,并通过基于有限元法^[11-13]的COM-SOL Multiphysics 4.0软件对该种光子晶体光纤混合模 EH_{11} 的色散和双折射特性进行分析.研究发现,该种结构光子晶体光纤的零色散点个数和双折射与纤芯圆孔的直径有着密切的关系,通过改变纤芯圆孔直径的大小,可以得到不同特性的光纤.如当波长为 $\lambda = 1.18, 1.92 \mu\text{m}$,纤芯圆孔直径 $d_1 = 0.4, 0.6 \mu\text{m}$ 时,可得到具有两个零色散点的光纤结构.

2 理论基础

菱形纤芯光子晶体光纤的端面结构如图1所示.在图1中,圆孔中填充的为空气,其他部位为 SiO_2 .为便于仿真分析,本文选取的光纤结构的最外层由两层孔径相同的空气孔排列而成,内层纤

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

[†] E-mail: wangwei407@hrbeu.edu.cn

芯由排列在菱形四个点上的圆孔构成, 菱形的夹角为 60° , 其中, d 为外层圆孔的直径, d_1 为内层菱形纤芯圆孔的直径, A 为孔间距.

由于光子晶体光纤具有不同于传统光纤的复杂结构, 使得针对其特性的分析变得复杂, 现有的数值分析方法主要是针对其近似解进行分析, 并随之出现了相应的电磁场仿真软件. 本文主要通过 COMSOL Multiphysics 4.0 软件对所设计的光纤特性进行分析. 该软件基于有限元法, 可对光纤结构进行设计建模. 同时, 结合完美匹配层边界条件 (PML), 能够求解任意多物理场耦合问题. 在仿真过程中, 文中首先对光纤结构进行建模, 然后结合 Sellmeier 公式, 设定入射波长范围、相应的材料参数和 PML 边界条件, 求解得到模场分布和相应的参数, 并使用 matlab 软件对得到的数据进行后处理, 从而得到相应的曲线.

本文据此对光子晶体光纤的色散和双折射特性进行分析, 研究其与纤芯尺寸和传输波长的关系.

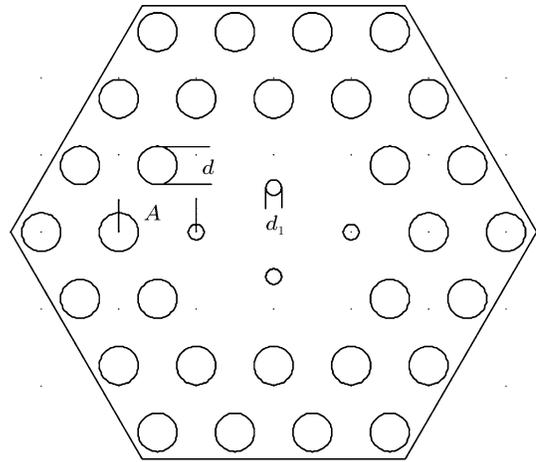


图1 菱形纤芯光子晶体光纤的端面图

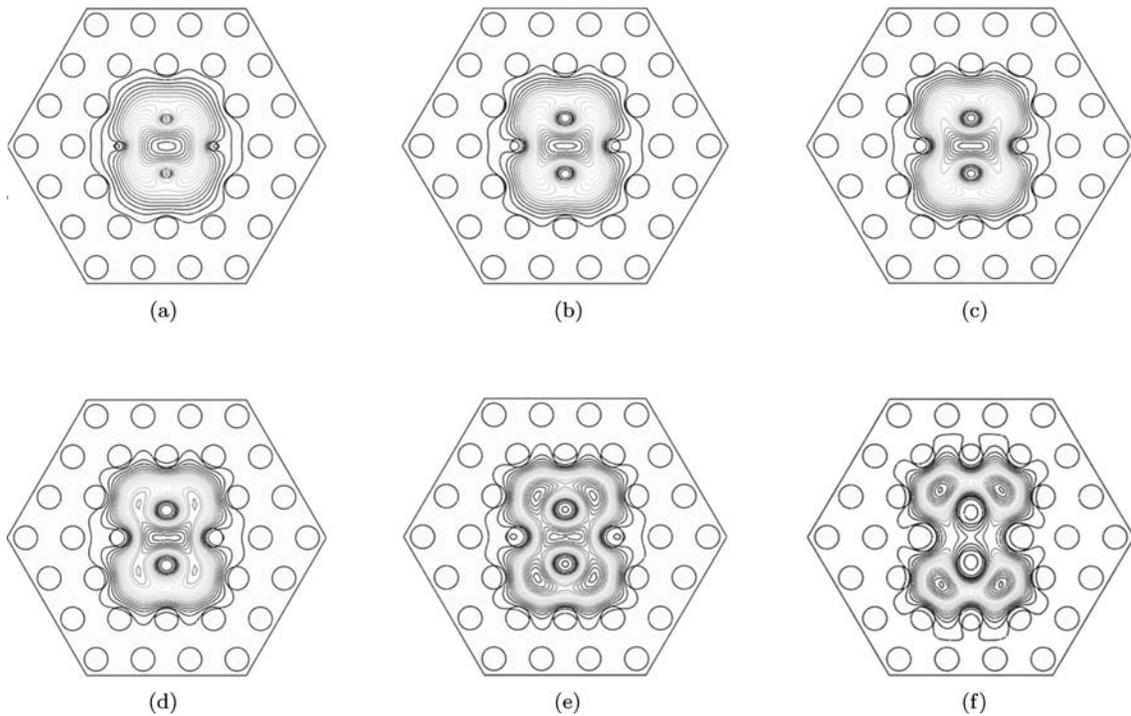


图2 不同纤芯直径时的功率流图 (a) $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$; (b) $d_1 = 0.6 \mu\text{m}$; (c) $d_1 = 0.75 \mu\text{m}$; (d) $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$; (e) $d_1 = 0.85 \mu\text{m}$; (f) $d_1 = 1.2 \mu\text{m}$

通过仿真可得到光纤的有效折射率 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 [14]:

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

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 [15]:

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

(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 两个方向偏振模的有效折射率.

3 数值模拟与结果分析

通过 COMSOL Multiphysics 4.0 对图 2 所示端面结构的光子晶体光纤 EH_{11} 模的特性进行仿真分析. 在计算时, 选取以下结构参数进行分析: $d = 1 \mu\text{m}$, $A = 2 \mu\text{m}$, 根据实际的仿真需求选取 d_1 的大小.

3.1 功率流

对波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, d_1 取不同值时光纤截面中的功率流进行分析, 仿真结果如图 2 所示. 其中, 图 2(a), (b), (c), (d) 为芯区圆孔直径分别为 $d_1 = 0.4, 0.6, 0.75, 0.8, 0.85$ 和 $1.2 \mu\text{m}$ 时的功率流图. 从图 2 中可以看出, 随着菱形芯区圆孔直径的增大, 功率逐渐向包层扩散, 当 $d_1 \geq 0.8 \mu\text{m}$ 时, 沿光纤传播方向的功率逐渐被分为四个部分, 产生这种现象的主要原因是随着菱形四个角上圆孔直径的增大, 光向芯区的外部及包层中严重泄露. 如图 2(f) 所示, 当 $d_1 = 1.2 \mu\text{m}$, 光将集中在芯区周围的四个小区域传输, 在中心基本没有光能传输. 因此, 在进行光纤设计时, 芯区圆孔直径应选择 $d_1 < 0.8 \mu\text{m}$.

3.2 有效折射率和波导色散分析

光子晶体光纤的有效折射率如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 有效折射率随着波长的增大而减小, 而当波长一定时, 有效折射率随着纤芯空气孔直径的增大而减小, 这是由于纤芯圆孔直径增大时光纤中空气的占空比增大而引起的.

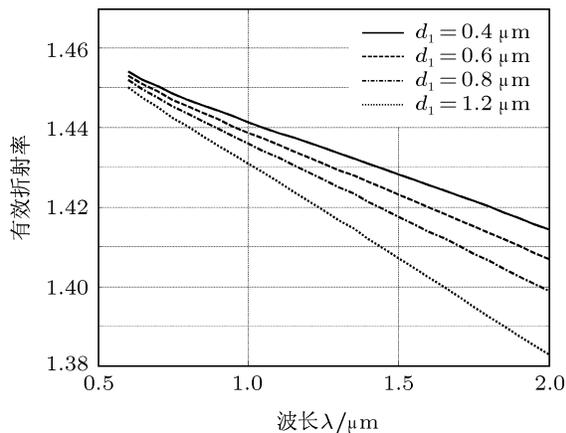


图 3 有效折射率与传输波长的关系

根据求得的光子晶体光纤有效折射率, 通过 (1) 式进行光子晶体光纤波导色散求解. 得到的色散

曲线如图 4 所示. 由图 4 发现, 当纤芯圆孔直径分别为 $d_1 = 0.4, 0.6 \mu\text{m}$ 时均出现两个零色散点. 其中 $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时的两个零色散点分别位于波长 $\lambda = 1.18$ 和 $1.92 \mu\text{m}$ 处. 而当 $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 出现三个零色散点, 分别位于传输波长 $\lambda = 1.1, 1.6, 1.9 \mu\text{m}$ 处. 但分析发现, 当 $d_1 \geq 0.8 \mu\text{m}$ 时, 光的功率明显被分散, 因此虽然有三个零色散点, 但实际上并不可取. 由此分析可得, 光子晶体光纤的零色散值和光纤纤芯圆孔的直径有着密切的关系. 当 $d_1 < 0.8 \mu\text{m}$ 时, 光纤的传输功率较好, 同时还可得到两个零色散点, 此时可根据需要选择合适的 d_1 , 进行光子晶体光纤的设计.

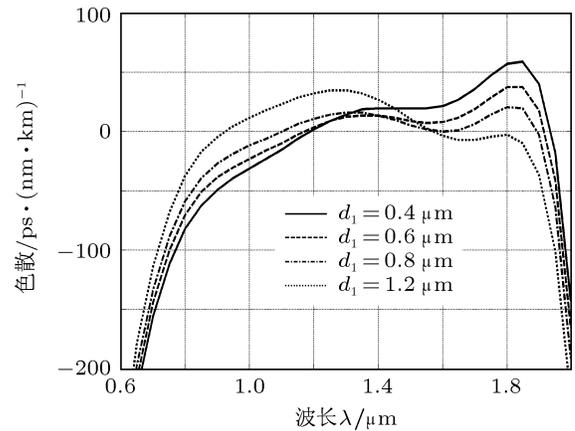


图 4 色散与传输波长的关系

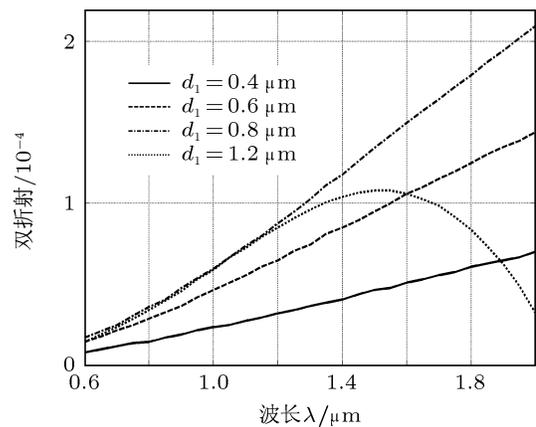
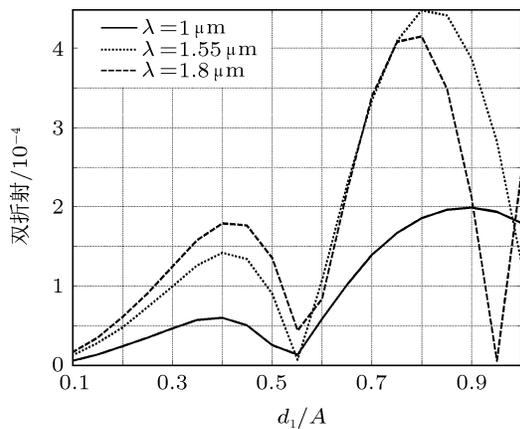


图 5 不同纤芯直径的双折射与传输波长的关系

3.3 双折射特性分析

图 5 和 6 分别为双折射与波长和结构尺寸的关系. 其中图 5 所示为光子晶体光纤纤芯圆孔直径分别为 $d_1 = 0.4, 0.6, 0.8$ 和 $1.2 \mu\text{m}$ 时的双折射与传输波长的关系. 从图 5 中可以看出, 当纤芯圆孔

图6 不同传输波长时的双折射与 d_1/A 的关系

的直径分别为 $d_1 = 0.4, 0.6$ 和 $0.8 \mu\text{m}$ 时, 光纤的双折射随着传输波长的增加而增大, 而当纤芯圆孔直径为 $d_1 = 1.2 \mu\text{m}$ 时, 双折射曲线出现弯折现象, 这与上文中分析的由于结构尺寸的变化导致光沿传播方向功率的分散有关. 为详细分析双折射与光子晶体结构尺寸的关系, 通过仿真得到光子晶体光纤双折射与结构尺寸 d_1/A 的关系如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 当传输波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, 光纤的双折射在 $d_1/A = 0.4, 0.55, 0.8, 0.95$ 时出现极值; 当 $d_1/A < 0.4$ 时, 双折射随着 d_1/A 的增大而

增大; 当 $0.4 \leq d_1/A \leq 0.55$ 时, 双折射随着 d_1/A 的增大而减小; 当 $0.55 \leq d_1/A \leq 1$ 时, 双折射曲线为“抛物线”形, 并在 $d_1/A = 0.8$ 时存在最大值.

经分析发现, 光纤的双折射和光纤的尺寸有着密切的关系. 其中, $d_1/A = 0.4$ 为临界点, 当 $d_1/A \geq 0.4$ 时, 由前文的分析可知, 光纤的传输功率过于分散, 而当 $d_1/A < 0.4$ 时, 光的传输主要集中于中心区域. 因此, 为提高光纤的性能, 应选择 $d_1/A < 0.4$ 的尺寸进行光纤的设计.

4 结论

通过有限元对设计的菱形纤芯光子晶体光纤混合模 EH_{11} 的有效折射率、波导色散特性、双折射特性进行分析, 得到菱形纤芯光子晶体光纤的有效折射率、波导色散、双折射与传输波长的关系, 同时还对光纤双折射特性与光纤结构尺寸 d_1/A 的关系进行分析. 研究发现, 在满足光纤传输功率要求的条件下, 光纤的双折射在 $d_1 < 0.8 \mu\text{m}$ 时的性能较好, 同时, 经过对该条件下光纤的色散特性进行分析发现, 该种结构的光子晶体光纤在芯区直径满足 $d_1 = 0.4$ 和 $0.6 \mu\text{m}$ 时会出现两个零色散点, 基于这个特点, 可以选择不同的参数进行色散补偿光纤的制作.

- [1] Lei W, Thomas T A, Anders B 2010 *Opt. Lett.* **35** 1608
- [2] Dong M, Chun Y G, Libo Y 2010 *Appl. Opt.* **49** 3748
- [3] Jinchae K, Un-Chul P, Byeong H L 2006 *Opt. Lett.* **31** 1196
- [4] 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]
- [5] Zhang Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4050 (in Chinese) [张亚妮 2010 物理学报 **59** 4050]
- [6] Hou Y, Zhou G Y, Hou L T, Jiang L H 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1068 (in Chinese) [侯宇, 周桂耀, 侯蓝田, 姜凌红 2010 中国激光 **37** 1068]
- [7] Li J, Gu Y H, Cai X B 2010 *Opt. Commun.* **2** 30 (in Chinese) [李洁, 顾艳华, 蔡祥宝 2010 光通信技术 **2** 30]
- [8] 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]
- [9] Li J H, Wang R, Wang J Y, Liu Y 2011 *Opt. Eng.* **50** 025001
- [10] Wu W Q, Chen X W, Zhou H, Zhou K F, Lin X S, Lan S 2006 *Acta Photonica Sin.* **35** 109 (in Chinese) [吴维庆, 陈雄文, 周辉, 周开锋, 林旭升, 兰胜 2006 光子学报 **35** 109]
- [11] Giovanni T, Marco P, Thomas T A, Ander B, Paolo B 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 2522
- [12] Liu X Y 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [刘小毅 2007 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [13] Zhang F D 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [张方迪 2007 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [14] Boris K, Gilles R, Daniel M 2003 *Appl. Opt.* **42** 634
- [15] 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]

Dispersion and birefringence analysis of photonic crystal fiber with rhombus air-core structure*

Wang Wei[†] Yang Bo

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

(Received 1 December 2010; revised manuscript received 23 May 2011)

Abstract

Aiming at the requirements for multi-zero dispersion points and high birefringence of photonic crystal fibers, a new kind of photonic crystal fiber with rhombus air-core structure is composed of four air holes locate at four points of rhombus is proposed. By using the numerical analysis method based on the finite element, we simulate the dispersion and the birefringence characteristics of photonic crystal fiber, and obtain the relationships between dispersion and wavelength, dispersion and size of structure, birefringence and wavelength, birefringence and size of structure. Simulation results show that better birefringence can be obtained when the requirement of power is met. In addition, two zero dispersion points can be obtained when diameter d_1 is 0.4 μm or 0.6 μm . The results are of significance for the further development of photonic crystal fiber with multi-zero dispersion points.

Keywords: dispersion, birefringence, photonic crystal fibers, finite element method.

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

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

[†] E-mail: wangwei407@hrbeu.edu.cn