

高双折射的混合格子太赫兹光子晶体光纤的设计与研究*

汪静丽^{1)2)†} 姚建铨¹⁾ 陈鹤鸣²⁾ 邴丕彬¹⁾ 李忠洋¹⁾ 钟凯¹⁾

1) (天津大学激光与光电子研究所,精密仪器与光电子工程学院,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

2) (南京邮电大学光电工程学院,光通信研究所,南京 210003)

(2010年10月17日收到;2010年12月14日收到修改稿)

提出了一种新型高双折射的混合格子太赫兹光子晶体光纤,通过对芯区亚波长尺寸的空气孔进行多种格子组合排列,增加结构的非对称性实现高的模式双折射. 全文仿真建模采用专业的有限元计算软件 COMSOL Multiphysics 4.0,结果表明:混合格子太赫兹光子晶体光纤在很宽的频率范围内都具有较高的双折射(达到 10^{-2})和低的限制损耗,且通过改变光纤的某些参数可以灵活地控制其双折射或限制损耗特性. 相比于同类光通信波段光纤,由于太赫兹波波长较大,能够降低芯区微结构加工的难度,具有可行性.

关键词: 双折射, 混合格子, 太赫兹光子晶体光纤, 限制损耗

PACS: 42. 81. Gs, 42. 81. Qb, 42. 70. Jk, 92. 85. Gn

1. 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 因为其设计的灵活性以及性能的优越性 (诸如无尽单模特性、高非线性、良好的色散特性、大模场面积等等^[1-7]), 已经引起了人们的广泛关注. 特别地, 经过特殊设计的 PCF 具有高的模式双折射, 可用来实现保偏光纤甚至是单模单偏振光纤^[8-10], 从而应用至长距离通信、传感及滤波等方面.

获得双折射的方法通常可分为两类: 一种方法类似于传统的保偏光纤, 是在光纤中引入应力区; 另一种方法是利用光纤的几何形状不对称实现高双折射. 本文主要讨论通过后者实现高双折射的问题. 由于传统的 PCF 通常是在包层中引入不对称结构以产生高的双折射, 从而引出了新问题: 限制损耗大. 为了兼顾高的双折射以及低的限制损耗, 部分科研工作者提出在芯区引入亚波长尺寸的空气孔 (空气孔尺寸远小于波长)^[11,12], 在增加芯区结构非对称性的同时却不破坏包层的对称性. 继承上述思想, 本文提出了混合格子 PCF, 尝试对芯区亚波长尺寸的空气孔进行多种格子组合排列, 进一步打破

光纤芯区的结构对称性从而获得更高的双折射. 全文的仿真计算均基于专业的有限元计算软件 COMSOL Multiphysics 4.0 进行建模求解, 为了验证该软件的准确性及其所提出想法的可行性, 首先与文献[12]中的计算结果进行了对比, 结果表明该软件有效可行, 并且随着芯区混合格子的引入, 确实能够提高 PCF 的模式双折射.

考虑到文献[12]是光通信波段的 PCF, 尺寸较小, 特别是在加工芯区纳米量级的空气孔排列时存在难度. 而太赫兹 (THz) 波波波长较长, 相应的光纤结构参数都为亚毫米量级, 有利于光纤制作, 故本文进一步把上述混合格子的 PCF 推至 THz 波段. THz 波是频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波, 其波段位于电磁波谱中毫米波和红外线之间, 是光子学与电子学、宏观理论向微观理论的过渡区域, 在众多领域 (医学成像、无损检测、空间通信、国防安全等^[13-21]) 均有着广泛应用. 采用 PCF 传输 THz 波的探索一直在进行中, 2002 年 Han 等人成功实现了 THz 脉冲在塑料 PCF 中的传输^[22,23]; 2004 年, Sarukura 小组研制出了具有保偏特性的 Teflon PCF, 在频率为 1 THz 时的传输损耗是 0.3 cm^{-1} ^[24]; 2007 年, 在 SPIE 的特邀论文中, Rahman 等讨论了 PCF

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号:2007CB310403) 和南京邮电大学青蓝计划 (批准号:NY207085) 资助的课题.

† E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

在 THz 频段的特性^[25]. 同年,曹祥杰等研究了 THz PCF 的单模截止频率和波导色散随着光纤结构的变化特性^[26];而 Cho 等人研究出了具有高双折射的 THz 保偏塑料 PCF,双折射大小达到 $\sim 2.1 \times 10^{-2}$ ^[27];2008 年,陈鹤鸣小组研究了 THz PCF 的损耗特性,在选取合适的参数时损耗最低值可达到 1.5 dB/km^[28];2009 年,Kejalakshmy 等人提出用带有金属涂覆缺陷芯的 PCF 传输 THz 波,该波导在传感方面具有巨大潜力^[29]. 这一系列的报道均显示了 PCF 在传输 THz 波方面具有独特优势,而本文所关注的高双折射的 THz PCF 对于 THz 波的空间传输、灵活 THz 通信系统的构成、THz 波传感等方面更是意义重大. 仿真结果表明,我们提出的 THz 波段的混合格子 PCF 在很宽的频率范围内都具有很高的双折射(达到 10^{-2}),且限制损耗小,将是未来高速 THz 通信中波导的重要候选者之一,具有实用价值.

2. 结构与仿真

本文对所设计的 PCF 特性的分析与讨论均是基于全矢量有限元法 (finite element method, FEM) 计算而来, FEM 是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法. 随着计算机的发展,已出现了多款较为成熟的电磁有限元软件,例如本文所采用的 COMSOL Multiphysics 4.0,它基于偏微分方程建模,能够方便地定义和求解任意多物理场耦合问题,具有强大的数值计算和视图能力. 结合各向异性完美匹配层 (PML) 条件,可计算光纤中各个模式复数形式的有效折射率 (n_{eff}),其实部代表通常意义上的折射率的概念,虚部描述了该模式的损耗情况. 模式双折射定义为某一模式的两个偏振态的 n_{eff} 实部的差 ($B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|$, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别是 x, y 偏振模的有效折射率);限制损耗 L 则可通过模式 n_{eff} 的虚部计算求出 ($L_c = 8.686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \text{Im}[n_{\text{eff}}]$ (dB/m), λ 为工作波长).

为了验证该软件的准确性,首先与文献[12]中高双折射光子晶体光纤 (HB-PCF) 的计算结果进行比较. HB-PCF 的截面图如图 1 所示,包层结构与传统的 PCF 类似,采用三角形格子排列,空气孔半径为 R ,格子常数为 Λ ;而光纤芯区则采用了三层相对较小半径 (r) 的圆形空气孔对的三角形格子排列,其格子常数为 Λ' ,每一空气孔对包含两个沿着 Y 方

向排列且间隔为 d 的空气孔,背景材料为熔融石英. 文献[12]中提到,采用如下参数: $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $R = 0.8 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 0.5 \mu\text{m}$, $r = 0.08 \mu\text{m}$, $d = 0.2 \mu\text{m}$, 工作波长 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 时,可求出 $x(y)$ 偏振基模的有效折射率为 1.3096 (1.3170).

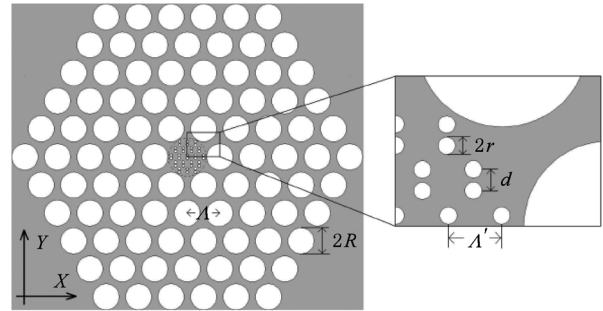


图 1 HB-PCF 截面图,芯区由亚波长圆形空气孔对按照三角形格子排列而成

采用 COMSOL Multiphysics 4.0 软件对图 1 所示结构进行建模计算,使用三角形网格划分整个截面区域,结合使用 PML 条件. 计算结果显示: $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 时, $x(y)$ 偏振基模的有效折射率为 1.309492 (1.316893). 由此可见:我们的计算结果与文献[12] 差别细微 (差别均在 10^{-4} 量级),从而充分证明了该款软件的准确性.

以图 1 所示的 HB-PCF 为例,考虑到提高结构的非对称性可获得高的模式双折射,本文尝试在芯区引入混合格子,即摒弃单一的三角形格子而采用三角形与长方形格子的组合排列,如图 2 所示,其中长方形格子的边长分别为 Λ' 和 b . 我们研究了三角形格子与不同边长之比 $q (q = b/\Lambda')$ 的长方形格子组合后的模式双折射的变化,如表 1 所示.

表 1 不同边长之比的长方形格子对模式双折射的影响

$q = b/\Lambda'$	0.75	0.80	0.85	0.90	1.0
B	0.0144	0.0120	0.0110	0.0101	0.0076

注: $\Lambda' = 0.5 \mu\text{m}$ 保持不变.

芯区采用单一三角形格子排列时其模式双折射为 $B = 0.0074$,表 1 中的数据表明:当引入混合格子后确实能够提高模式双折射,并且随着 q 的减小,模式双折射变大. 当 $q = 0.75$ 时,其模式双折射的大小是单一三角形格子排列时的 1.95 倍. 注意到:当 $q = 1$ 时,其双折射的大小相对于原来的单一三角形格子变化甚微,这主要因为此时长方形格子转为正方形格子,使芯区对称性提高所致.

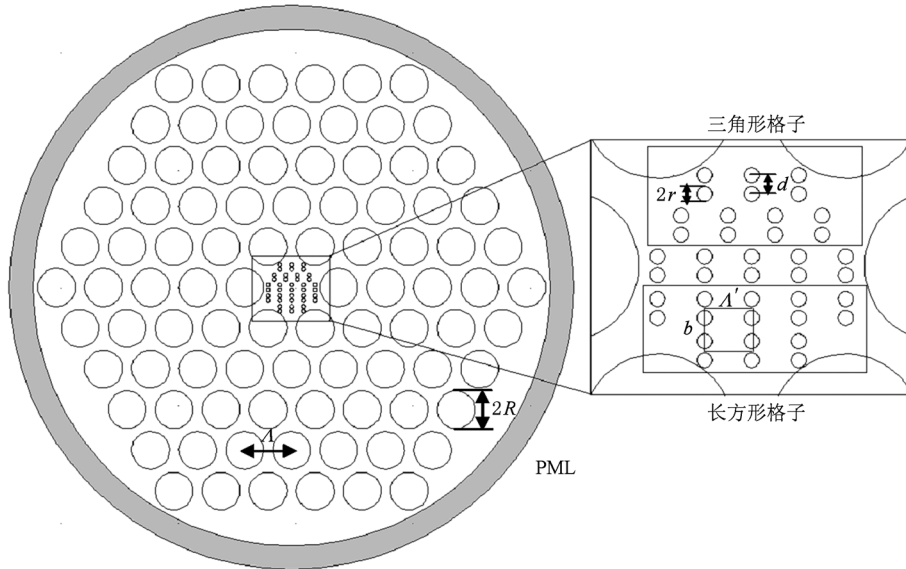


图2 在亚波长圆形空气孔对所构成的芯区内引入混合格子组合排列(上半部分为三角形格子排列,下半部分为长方形格子排列)的 PCF 截面图

上述讨论的均为光通信波段的 PCF,尺寸小,在芯区微结构加工时存在难度. 考虑到 THz 波波波长较长,相应的光纤结构参数都为亚毫米量级,有利于光纤加工生产,所以本文进一步把图 2 所示的光纤结构推至 THz 波段,对 THz PCF 的特性进行了仿真与分析. 由表 1 可知, q 值越小, B 越大,故设计 THz PCF 参数时采用 $q = 0.75$,其余参数如下: $A = 400 \mu\text{m}$, $R = 160 \mu\text{m}$, $A' = 100 \mu\text{m}$, $r = 16 \mu\text{m}$, $d = 40 \mu\text{m}$. 背景采用聚合物材料,介于适用于 THz 波传输的聚合物材料在所讨论的频段内折射率均在 1.5 左右^[30],为简化分析,假设背景材料折射率为 1.5,空

气折射率为 1. 另外,无特殊说明,以下仿真均是针对基模的情况. 仿真结果如图 3 所示:在所讨论的频率范围内(0.5—1.5 THz), n_{eff}^y 均大于 n_{eff}^x ,且两者都随 f 的增加而增加;模式双折射一开始随着 f 迅速增加,在 $f = 0.9 \text{ THz}$ 时达到峰值 $B_{\text{max}} = 0.0164$,然后随 f 的增加逐渐减小. 右侧插图给出了模式双折射到达峰值时 x 和 y 偏振模的电场分布图,由图 3(a) 和 (b) 对比明显可见: y 方向偏振模式比 x 方向偏振模式得到更好的束缚,沿着 y 方向分布的电场更加狭长,这是因为芯区空气孔对沿着 y 方向排列的原因.

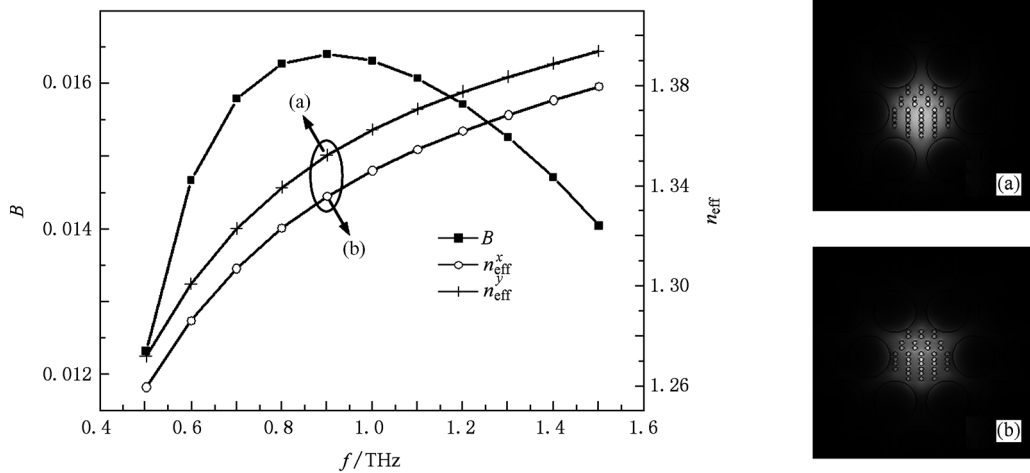


图3 THz PCF 的模式双折射及其 x 和 y 偏振模有效折射率随着频率的变化;右侧插入图片: $f = 0.9 \text{ THz}$ 时, y 偏振基模(a) 和 x 偏振基模(b) 的电场分布图

接着讨论光纤各个参数的变化对模式双折射的影响. 以图3所示的光纤作为基准, 仅变化 R, r, d 中某一参数, 保持其余参数不变时, 观察模式双折射的变化. 如图4所示: 1) 当仅增加包层中空气孔半径 R 时, 模式双折射变小, 这是由于包层对光的限制作用增强引起的; 2) 当仅减少芯区空气孔半径 r 时, 模式双折射减小, 且从图中明显可见, r 的微小变化对双折射影响较大; 3) 当仅减少芯区空气孔对间隔 d 时, 模式双折射增加. 由此可见, 合理的调整光纤参数的取值, 可实现对模式双折射的灵活控制, 这对于实际应用具有深远意义.

限制损耗是光纤性能的一个重要表征, 与图4所对应的 THz PCFs 限制损耗如图5所示. 需要注意一点: 本文对限制损耗计算时做了一些近似处理, 认为其到达 10^{-7} dB/km 数量级时, 可忽略其影响. 做上述近似处理是为了避免有效折射率的虚部过小后软件本身会引入一定的数值误差. 图5(a), (b)和(c)中均以图3所示的光纤作为基准, 由比较可见: 随着 r 的增大, 限制损耗增大; 随着 R 的增大, 限制损耗变小, 这是由于包层对光的限制作用增强的原因形成的; d 的微小变化对限制损耗的影响不大; x 偏振模的限制损耗均大于 y 偏振模的限制损耗, 这是因为芯区空气孔对沿 y 方向排列使得其对 y 偏振模束缚的更好的原因; 在低频处限制损耗较大, 随着频率增加急剧减少, 在所讨论的大部分频段内, THz PCF 的限制损耗特性良好.

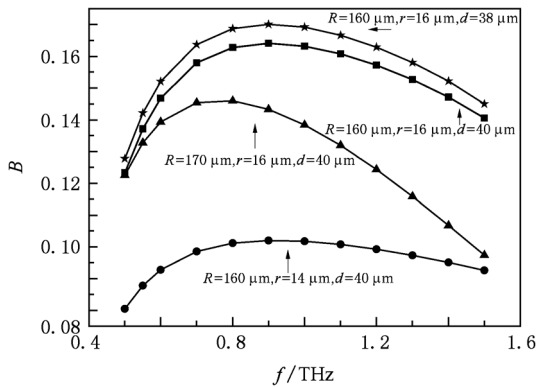


图4 保持 $\Lambda = 400 \mu\text{m}, \Lambda' = 100 \mu\text{m}$ 不变, 某一参数变化引起的模式双折射随频率的变化

3. 结 论

本文设计并研究了一种新型的混合格子 THz

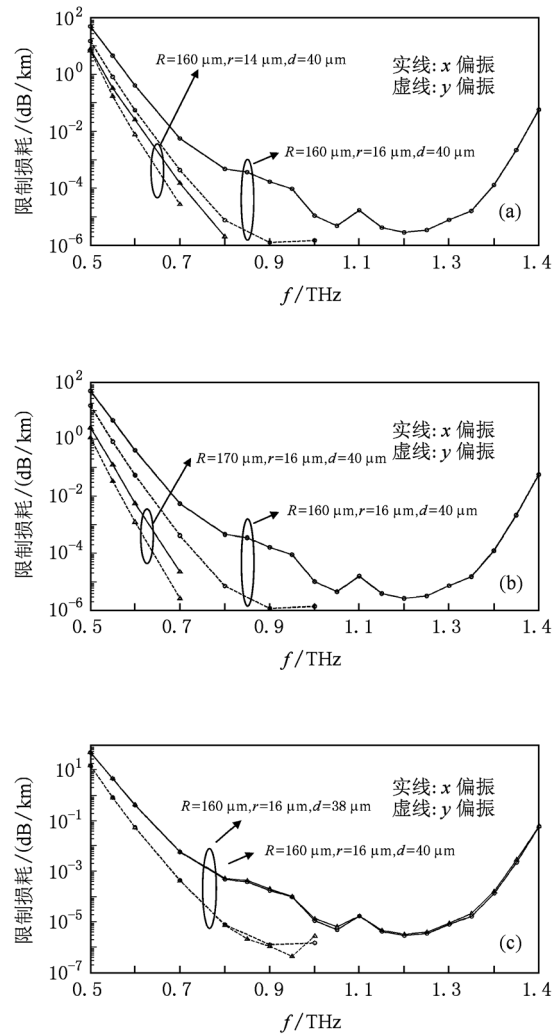


图5 保持 $\Lambda = 400 \mu\text{m}, \Lambda' = 100 \mu\text{m}$ 不变, 某一参数变化引起的 THz PCF 的限制损耗随频率的变化

PCF, 对其芯区亚波长尺寸的空气孔采用三角形和长方形格子的混合排列, 打破结构对称性实现高的模式双折射. 仿真建模采用专业的有限元软件 COMSOL Multiphysics 4.0, 在编程方面节省了大量时间且提高了仿真的准确性. 结果表明: 随着长方形格子边长比 q 的减小, 模式双折射提高. 合理选择光纤参数后, 本文所提出的 THz PCF 在很宽的频率范围内, 都具有较高的双折射 (达到 10^{-2}) 和低的限制损耗, 且通过改变某些光纤参数, 可以灵活地控制光纤的模式双折射或限制损耗特性, 这对实际应用具有深远的意义, 有望运用到高比特率的通信系统、光纤传感领域中的光纤陀螺、光纤环等器件. 而且相比于同类光通信波段光纤, THz PCF 在芯区微结构加工方面更具有可行性.

- [1] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [2] Reeves W H, Knight J C, Russell P S J, Roberts P J 2002 *Opt. Express* **10** 609
- [3] Sharping J E, Fiorentino M, Kumar P, Windeler R S 2002 *Opt. Lett.* **27** 1675
- [4] Liu W H, Song X Z, Wang Y S, Liu H J, Zhao W, Liu X M, Peng Q J, Xu X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华、宋啸中、王屹山、刘红军、赵卫、刘雪明、彭钦军、许祖彦 2008 物理学报 **57** 917]
- [5] Zhang C, Hu M L, Song Y J, Zhang X, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7727 (in Chinese) [张驰、胡明列、宋有建、张鑫、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 7727]
- [6] Jiang Y J, Shi W H, Li P L, Zhao Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5559 (in Chinese) [姜跃进、施伟华、李培丽、赵岩 2010 物理学报 **59** 5559]
- [7] Lu J H, Meng Z M, Liu H Y, Feng T H, Dai Q F, Wu L J, Guo Q, Hu W, Lan S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4333
- [8] Kazunori S, Hirokazu K, Satoki K 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [9] Kunimasa S, Masanori K 2003 *IEEE Photonics Technology letters* **15** 1384
- [10] Folkenberg J R, Nielsen M D, Jakobsen C 2005 *Opt. Lett.* **30** 1446
- [11] Chen D R, Shen L F 2007 *IEEE Photonics Technology Letters* **19** 185
- [12] Chen D R 2010 *Progress In Electromagnetics Research* **105** 193
- [13] Siegel P H 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 910
- [14] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241116
- [15] Yao J Q, Chi N, Yang P F, Cui H X, Wang J L, Li J S, Xu D G, Ding X 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 2213 (in Chinese) [姚建铨、迟楠、杨鹏飞、崔海霞、汪静丽、李九生、徐德刚、丁欣 2009 中国激光 **36** 2213]
- [16] Shen J L, Zhang C L 2005 *Nondestructive Testing* **27** 146 (in Chinese) [沈京玲、张存林 2005 无损检测 **27** 146]
- [17] Li Z Y, Yao J Q, L J, Bing P B, Xu D G, Wang P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6237 (in Chinese) [李忠洋、姚建铨、李俊、邴丕彬、徐德刚、王鹏 2010 物理学报 **59** 6237]
- [18] Zhang Y P, Zhang H Y, Geng Y F, Tan X L, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7030 (in Chinese) [张玉萍、张会云、耿优福、谭晓玲、姚建铨 2009 物理学报 **58** 7030]
- [19] Sun B, Liu J S, Li E B, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2846
- [20] Hu M, Zhang Y X, Yan Y, Zhong R B, Liu S G 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3877
- [21] Wu Q, Wang Y, Wu Y M, Zhuang L L, Li L W, Gui T L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 067801
- [22] Park H, Cho M, Kim J, Han H 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 3765
- [23] Han H, Park H, Cho M, Kim J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2634
- [24] Goto M, Quema A, Takahashi H, Ono S, Sarukura N 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 317
- [25] Rahman B M A, Kejalakshmy N, Huda Tanvir, Grattan K T V 2007 *Terahertz Physics, Devices, and Systems II* Boston, September 11, 2007 p67720D-1
- [26] Cao X J, Zhou K S, Zhao W, Li J F, Duan K L 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** (Sup1) 35 (in Chinese) [曹祥杰、邹快盛、赵卫、李剑锋 2007 光子学报 **36**(增刊) 35]
- [27] Cho M, Kim J, Park H, Han Y, Moon K, Jung E, Han H 2008 *Opt. Express* **16** 7
- [28] Hu J, Chen H M 2008 *Chinese Journal of Lasers* **35** 567 (in Chinese) [胡婕、陈鹤鸣 2008 中国激光 **35** 567]
- [29] Kejalakshmy N, Rahman B M A, Agrawal A, Tanvir H M, Grattan K T V 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 1631
- [30] Jin Y S, Kim G J, Jeon S G 2006 *J. Korean Phys. Soc.* **49** 513

Design and study of high birefringent terahertz photonic crystal fiber with hybrid crystal lattice *

Wang Jing-Li^{1)2)†} Yao Jian-Quan¹⁾ Chen He-Ming²⁾ Bing Pi-Bin¹⁾ Li Zhong-Yang¹⁾ Zhong Kai¹⁾

1) (*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*College of Optoelectronic Engineering, Institute of Optical Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

(Received 17 October 2010; revised manuscript received 14 December 2010)

Abstract

In this paper, we propose a novel high birefringent terahertz (THz) photonic crystal fiber (PCF) with subwavelength circular air hole pairs in the core which are arranged as a hybrid crystal lattice structure. And its high mode birefringence is realized by reducing structure symmetry in core. A professional software COMSOL Multiphysics 4.0 is used for modeling, and the simulation results show that this kind of THz PCF exhibits a high birefringence on a level of 10^{-2} and low confinement loss over a wide THz frequency range. Moreover, the birefringence or confinement loss can be controlled flexibly by adjusting some fiber parameters. Compared with a similar structure PCF for the optical communication, the THz PCF is easier to practically fabricate, owing to its large wavelength size.

Keywords: birefringence, hybrid crystal lattice, THz PCF, confinement loss

PACS: 42. 81Gs, 42. 81Qb, 42. 70. Jk, 92. 85. Gn

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310403) and the Scientific Research Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Grant No. NY207085).

† E-mail: jlwang@njupt.edu.cn