

菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤

汪静丽 陈鹤鸣

(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要 提出了一种新型的基于菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤,通过改变光纤中引入缺陷的个数、尺寸以及所处位置,研究其对光纤单一偏振单模特性的影响。全文仿真建模采用全矢量有限元法,结果表明:当光纤中引入两缺陷时,随着缺陷尺寸的增加,单一偏振单模运行区域向高频方向移动,区域宽度稍有增加;当引入四缺陷时,靠近芯区的缺陷对单一偏振单模特性影响占主导;基于此,在芯区四周各引入尺寸相同的缺陷,对比四缺陷和两缺陷时的情况发现,四缺陷时单一偏振单模运行区域(1.07~1.36 THz)向高频方向移动,且区域宽度(为0.29 THz)增加明显,是两缺陷时的1.32倍。此类光纤可应用于某些对偏振态有非常严格要求的系统中,故具有实际意义。

关键词 光纤光学;单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤;有限元法;菱形空气孔

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0906002

Single-Polarization Single-Mode Rhombic-Hole Terahertz Photonic Crystal Fibers

Wang Jingli Chen Heming

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract A novel single-polarization single-mode (SPSM) rhombic-hole terahertz (THz) photonic crystal fiber (PCF) is proposed. The influence on the characteristics of SPSM is studied by changing the number, size and location of the defects in fiber. A full-vector finite element method is used for modeling, and the simulation results are as follows. In the case of two defects in PCF, with the increase of defect size, SPSM operation range moves towards high-frequency, and its width is increased slightly. In the case of four defects in PCF, the characteristics of SPSM is affected by the defects near the core region easily. Based on this conclusion, four same defects are introduced around the core region in fiber. Compared with the case of two defects, SPSM operation range (1.07 THz to 1.36 THz) moves towards high-frequency and its width (0.29 THz) increases significantly for four defects case, which is 1.32 times than the case of two defects. So the fibers have wide applications in some systems that have strict requirements about the polarization states, and have practical significance.

Key words fiber optics; single-polarization single-mode terahertz photonic crystal fiber; finite element method; rhombic-hole

OCIS codes 060.2430; 060.2420; 060.5295

1 引言

光子晶体光纤(PCF)因其设计的灵活性以及性能的优越性(如无尽单模特性、高非线性、良好的色散特性、大模场面积等^[1-3]),越来越受到研究者的

关注。而太赫兹(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

收稿日期: 2014-04-01; **收到修改稿日期**: 2014-05-06

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目基金(12KJB510018)、江苏省科技创新与成果转化专项引导基金(BY2010101)

作者简介: 汪静丽(1980—),女,博士,讲师,主要从事太赫兹波导设计、光子晶体光纤、光纤传感等方面的研究。

E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

间通信、国防安全等^[4-6])均有着广泛应用。本文着眼于这两大研究热点,提出了一种新型的基于菱形空气孔的单一偏振单模 (SPSM) THz PCF。SPSM 光纤的概念^[7-13]早在 20 世纪 80 年代就被提出,是一种只允许一个偏振模式在光纤中传输的光纤,它克服了高双折射光纤保偏性能受限于偏振串扰和偏振模色散影响的缺点,因而在某些对偏振态有非常严格要求的系统中,如控制光纤激光器的稳定输出、高性能光器件、光纤传感等领域均具有非常重要的应用^[14-17]。

SPSM 光纤比高双折射双偏振光纤的设计难度大,目前有两种实现技术:1)使光纤基模的两个偏振态间保持很大的损耗差^[10,12];2)使光纤基模的某一偏振态不能传输^[9,18]。本文采用第二种技术实现了 THz 频段下的 SPSM PCF,仿真结果表明:光纤中引入缺陷的个数、尺寸以及所处位置均会对其 SPSM 运行的区域和宽度产生影响;故而可根据实际需要灵活地调整 SPSM 区域所在的位置和宽度,满足实际的应用需要。

2 结构设计及特性分析

文献[19]指出高双折射的双偏振光纤是实现 SPSM 光纤的一种方式,所以在设计具有 SPSM 特性的 THz PCF 之前,首先考虑的是如何能够在 THz PCF 中获得较高的双折射。受文献[20]启发,对 THz 频段下的菱形空气孔 PCF 进行研究,该 PCF 截面如图 1 所示:其包层是由菱形空气孔在聚合物材料中按照三角形格子排列而成,纤芯由中心去除的一个空气孔构成。菱形空气孔的两条对角线长度分别为 a 和 b ,孔与孔的间隔为 Δ ,包层空气孔圈数为 10 层,光纤半径为 R 。拟考察该菱形空气孔 THz PCF 的双折射特性,若是其具有高的双折射,那么通过合理的设计,就可以比较容易地在此类光纤结构中获得 SPSM 特性。

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 (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。本文所采用的 COMSOL Multiphysics 软件,它是基于偏微分方程进行建模的,能够方便地定义和求解任意多物理场耦合问题。结合各向异性完美匹配层 (PML) 条件后,可求出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概念,虚部则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

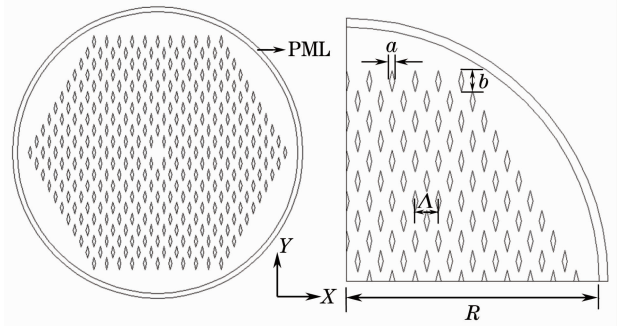


图 1 菱形空气孔 THz PCF 的光纤截面图

Fig. 1 Cross section of the rhombic-hole THz PCF ($B = |N_{\text{eff}x} - N_{\text{eff}y}|$, $N_{\text{eff}x}$ 和 $N_{\text{eff}y}$ 分别是 x, y 偏振模的有效折射率)。

对于图 1 所示 THz PCF 的具体参数如下: $a = 60 \mu\text{m}$, $b = 240 \mu\text{m}$, $\Delta = 260 \mu\text{m}$, $R = 2860 \mu\text{m}$ 。由于适合 THz 波传输的聚合物材料[如聚丙烯 PP, 聚四氟乙烯 PTFE (Teflon) 或者高密度聚乙烯 HDPE]在所讨论的频段内折射率都在 1.5 左右^[21],为简化分析,假设其折射率 $n_1 = 1.5$,空气折射率 $n_0 = 1$ 。仿真计算的结果如图 2 所示,由此图可知:1)在所讨论的频率范围内, y 偏振基模的有效折射率 $N_{\text{eff}y}$ 均高于 x 偏振基模 $N_{\text{eff}x}$;2) x 和 y 偏振基模的有效折射率均随着频率的增加而增加;3)模式双折射 B 随着频率的增加而减少,在频率 $f = 0.9 \text{ THz}$ 时,模式双折射的值最高,即 $B = 0.01565$,此时所对应的 x 和 y 偏振基模的有效折射率分别为 $N_{\text{eff}x} = 1.441073$, $N_{\text{eff}y} = 1.456717$ 。由上述结果可知,在 THz 频段下菱形空气孔 PCF 具有较好的双折射特性,特别在低频处,可获得的模式双折射值更高。依据前文所述:具有高双折射的光纤更容易实现

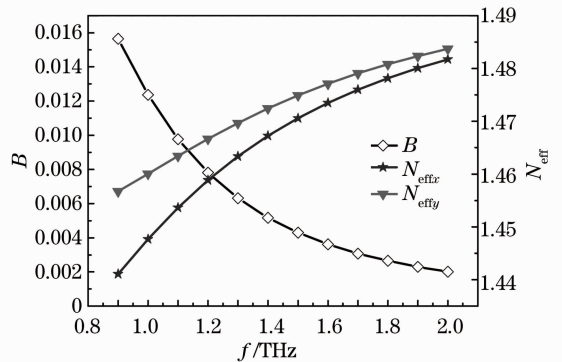


图 2 菱形空气孔 THz PCF 中, x 和 y 偏振基模的模式双折射和有效折射率随频率的变化
Fig. 2 Mode birefringence and effective indices of x - and y -polarized modes versus frequency in rhombic-hole THz PCF

SPSM,且在低频处比较容易实现 SPSM 特性。

要在菱形空气孔 THz PCF 中获得 SPSM 特性,需进一步改进其结构,为此在包层中引入两个大的菱形空气孔缺陷,其形态如图 3 所示,相应的对角线长度分别为 $a' = 120 \mu\text{m}$ 和 $b' = 480 \mu\text{m}$,其余参数与图 1 所示的 THz PCF 保持一致。为便于分析,需引入包层基空间填充模(FSM)的概念。FSM 是指未引入缺陷时无限大的 PCF 包层中的基模,其所对应的有效折射率是该周期性结构中所能达到的最高值^[1],用以分析三角形格子 PCF 的单模传输条件,包层 FSM 的有效折射率起着包层等效折射率的作用。只要光纤中传输模式的有效折射率小于包层 FSM 的有效折射率,这些约束模就会变成泄露模,从而无法在光纤芯区传输。

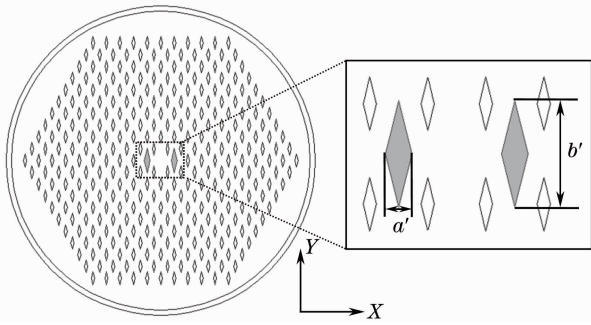


图 3 包层引入两个缺陷的菱形空气孔 THz PCF 截面图

Fig. 3 Cross section of the rhombic-hole THz

PCF with two defects in cladding

图 4 给出了图 3 所示光纤的 x, y 偏振基模的有效折射率(实线表示)和 x, y 偏振 FSM 的有效折射率(虚线表示)随频率的变化图。由于包层中空气孔是菱形的,FSM 不再简并,其有效折射率分裂为两根曲线。当满足 x 偏振基模的有效折射率 $N_{\text{eff}2,x}$ 高于 x 偏振 FSM 的有效折射率 $N_{\text{fsm}x}$,或者 y 偏振基模的有效折射率 $N_{\text{eff}2,y}$ 高于 y 偏振 FSM 的有效折射率 $N_{\text{fsm}y}$ 时,模式可在芯区传输,反之则截止。如图 4 所示:当 $f > 0.97 \text{ THz}$ 时, $N_{\text{eff}2,x} > N_{\text{fsm}x}$, x 偏振基模约束于芯区传输;此时,由于 $N_{\text{eff}2,y} < N_{\text{fsm}y}$, y 偏振基模为泄露模,无法在芯区传输,直至 $f > 1.19 \text{ THz}$ 时,由于满足 $N_{\text{eff}2,y} > N_{\text{fsm}y}$ 的条件, y 偏振基模才能在芯区传输。由此判断当单偏振区域为 $0.97 \sim 1.19 \text{ THz}$,此时光纤中仅能传输 x 偏振基模,且在仿真过程中,在该频段内没有高阶模存在,在低频区比较容易实现 SPSM 特性。

以下重点讨论引入缺陷的尺寸对光纤 SPSM 特性的影响。假定所有参数设置与图 3 相同,唯一的区别在于将引入的两个大菱形空气孔缺陷尺寸扩

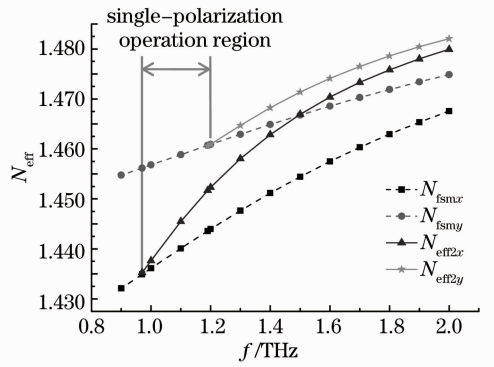


图 4 两缺陷的菱形空气孔 SPSM THz PCF 中, $x(y)$ 偏振基模的有效折射率和 $x(y)$ 偏振 FSM 的有效折射率随频率的变化

Fig. 4 Effective indices of x - (y) polarized mode and x - (y) FSM versus frequency in rhombic-hole THz

PCF with two defects in cladding

大 1.3 倍,即取 $a' = 168 \mu\text{m}$, $b' = 624 \mu\text{m}$,仿真结果如图 5 所示。图 5 同时给出了两缺陷以及扩大两缺陷后的 THz PCF 中 x, y 偏振基模的有效折射率(实线)和 x, y 偏振 FSM 的有效折射率(虚线)随频率的变化,其中 $N_{\text{eff}k2,x}$ 和 $N_{\text{eff}k2,y}$ 分别代表扩大缺陷后光纤的 x 和 y 偏振基模的有效折射率。由图 5 可以看出在所讨论的 THz 频率范围内,随着缺陷尺寸的扩大,两个正交基模的有效折射率都比未扩大前降低了,这是由于空气的折射率比聚合物材料的折射率要低,随着缺陷的扩大,使得空气孔面积占波导截面积的比例变大所致。且随着缺陷尺寸的扩大,SPSM 区域向高频方向移动($1.08 \sim 1.32 \text{ THz}$),同样仅仅能够传输 x 偏振基模,且 SPSM 区域的大小略有

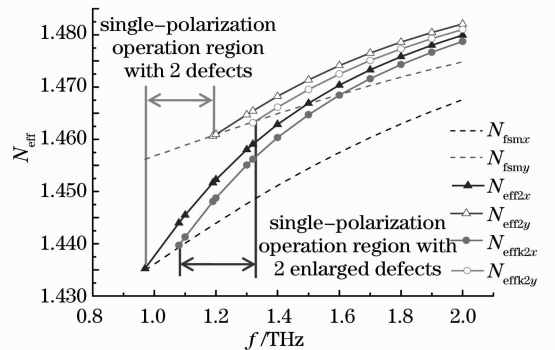


图 5 两个缺陷以及扩大缺陷后的菱形空气孔 SPSM THz PCF 中, $x(y)$ 偏振基模的有效折射率和 $x(y)$ 偏振 FSM 的有效折射率随频率的变化

Fig. 5 Effective indices of x - (y) polarized mode and x - (y) FSM versus frequency in rhombic-hole THz PCF with two defects and two larger defects in cladding

增加,由原来的 0.22 THz 扩大为 0.24 THz。由此推断,引入缺陷尺寸的扩大,对光纤 SPSM 区域运行的位置影响比较明显,但是对其运行区域的大小影响甚微。

接着考虑在光纤中引入多个缺陷,观察缺陷个数及其所处位置对 SPSM 特性的影响。实验中所设计的 THz PCF 结构如图 6 所示,为了便于比较,图 6(a),(b)两种光纤的结构参数均与图 3 一致,引入的缺陷——菱形大空气孔尺寸 $a' = 120 \mu\text{m}$, $b' = 480 \mu\text{m}$ 也保持不变,而缺陷个数和位置发生变化。对图 6(a)所示光纤结构进行建模仿真,结果表明: SPSM 区域所处位置及其大小跟图 4 几乎没有差别,可见多引入的两个缺陷对光纤 SPSM 特性影响甚微,而靠近芯区的缺陷对 SPSM 特性的影响占主导。基于上述结论,提出了图 6(b)所示的光纤结构,在芯区的四周都引入了相同尺寸的缺陷,仿真结果如图 7 所示。图 7 同时给出了两缺陷以及四缺陷的菱形空气孔 THz PCF 中, x 、 y 偏振基模的有效折射率(实线)和 x 、 y 偏振 FSM 的有效折射率(虚线)随频率的变化,其中 $N_{\text{eff}4,x}$ 和 $N_{\text{eff}4,y}$ 分别代表四缺陷光纤的 x 和 y 偏振基模的有效折射率。与图 5 所示相类似,在所讨论的 THz 频率范围内,四缺陷光纤中的两个正交基模的有效折射率都比两缺陷时低,这也是由于随着缺陷个数增加,空气孔面积所占波导截面积的比例增加所致;且 SPSM 区域向高频方向移动,为 1.07~1.36 THz,同样仅仅能够传输 x 偏振基模,且 SPSM 区域的大小由原来的 0.22 THz 扩大为现在

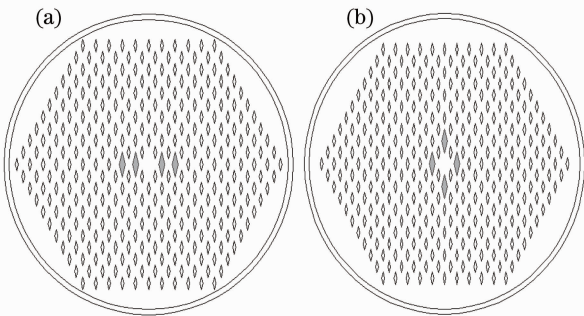


图 6 包层引入四个缺陷的菱形空气孔 THz PCF 截面图。(a)芯区的左右各引入两个缺陷;(b)芯区四周各引入一个缺陷

Fig. 6 Cross sections of the rhombic-hole THz PCF with four defects in cladding. (a) Four defects are symmetrically distributed on both sides of the core; (b) four defects are evenly distributed around the core

的 0.29 THz,增加明显。由此可见,随着芯区周围引入缺陷个数的增加,对光纤 SPSM 运行区域所处位置及其大小都有较大影响。

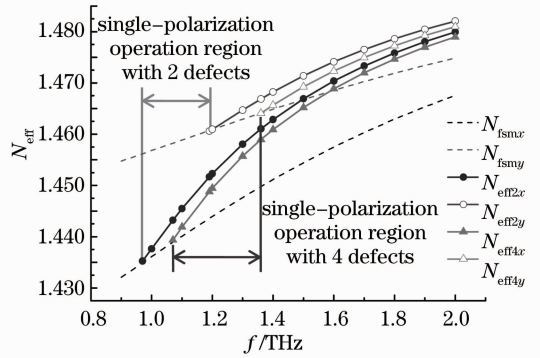


图 7 两个缺陷以及四个缺陷的菱形空气孔 SPSM THz PCF 中, x (y) 偏振基模的有效折射率和 x (y) 偏振 FSM 的有效折射率随频率的变化

Fig. 7 Effective indices of x - (y -) polarized mode and x - (y -) FSM versus frequency in rhombic-hole THz PCF with two defects and four defects in cladding

3 结 论

提出了一种新型的菱形空气孔 SPSM THz PCF,研究表明:1)随着光纤中引入缺陷尺寸的增加,SPSM 运行区域向高频方向移动,区域宽度稍有增加;2)越靠近光纤芯区的缺陷对 SPSM 特性影响越大;3)随着芯区周围引入缺陷个数的增加,SPSM 运行区域向高频方向移动,区域宽度增加明显。该结论可为此类波导的设计与应用提供科学原理和可靠的技术数据,能够进一步推动 THz 技术的发展。此外,有关这类聚合物波导的实际加工,目前可采用的方法有钻孔法、毛细管堆积法、挤出法等。

参 考 文 献

- 1 T A Birks, J C Knight, P S J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 1997, 22(13): 961-963.
- 2 W H Reeves, J C Knight, P S J Russell, et al.. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2002, 10(14): 609-613.
- 3 Zhang Lu. Low-loss lens-coupling technique on photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106006.
张 璐. 光子晶体光纤的低损耗透镜耦合技术[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106006.
- 4 H S Peter. THz technology [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 910-928.
- 5 Li Huayue, Liu Jianjun, Han Zhanghua, et al.. Terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223003.
李化月, 刘建军, 韩张华, 等. 基于类电磁诱导透明效应的太赫兹折射率传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223003.

- 6 Albert Redo Sanchez, Xi Cheng Zhang. Terahertz science and technology trends [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2008, 14(2): 260–269.
- 7 T Okoshi, K Oyamada. Single polarization single mode optical fiber with refractive index pits on both sides of cores [J]. *Electron Lett*, 1980, 16(18): 712–713.
- 8 T Okoshi. Single-polarization single mode optical fibers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, 17(6): 879–884.
- 9 J Simpson, R Stolen, F Sears, *et al.*. A single-polarization fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 1983, LT-1(2): 370–373.
- 10 K Okamoto. Single-polarisation operation in highly birefringent optical fibres [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(15): 2638–2642.
- 11 H Suganuma, T Myogadani, H Yokota. Characterization of side-tunnel single polarization optical fiber [C]. *European Conference on Optical Communications*, 1985. 139–142.
- 12 K S Chiang. Stress-induced birefringence fibers designed for single-polarization single-mode operation [J]. *J Lightwave Technol*, 1989, 7(2): 436–441.
- 13 K Tajima, M Ohashi, Y Sasaki. A new single-polarization optical fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 1989, 7(10): 1499–1503.
- 14 Y W Lee, J Jung, B Lee. Multiwavelength-switchable SOA-fiber ring laser based on polarization-maintaining fiber loop mirror and polarization beam splitter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(1): 54–56.
- 15 J Zhang, S Guo, W Jung, *et al.*. Determination of birefringence and absolute optic axis orientation using polarization-sensitive optical coherence tomography with PM fibers [J]. *Opt Express*, 2003, 11(24): 3262–3270.
- 16 Y J Song, L Zhan, S Hu, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-Erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(9): 2015–2017.
- 17 D Pierluigi, J U Heiko, M Juergen, *et al.*. Single-mode, single-polarization VCSELs via elliptical surface etching: experiments and theory [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2003, 9(5): 1394–1405.
- 18 M J Messerly, J R Onstott, R C Mikkelson. A broadband single-polarization optical fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(7): 817–820.
- 19 K Hirokazu, K Satoki, K Shigeki, *et al.*. Absolutely single polarization photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(1): 182–184.
- 20 B Hu, M Lu, W Li, *et al.*. High birefringent rhombic-hole photonic crystal fibers [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(31): 6098–6101.
- 21 Y S Jin, G J Kim, S G Jeon. Terahertz dielectric properties of polymers [J]. *J Korean Phys Soc*, 2006, 49(2): 513–517.

栏目编辑：王晓球