

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.01.006

光纤光缆技术与应用

新型太赫兹光子晶体光纤的单模传输特性分析

刘延君, 胡守重, 侯尚林, 王道斌, 雷景丽, 武刚, 李晓晓, 袁鹏

(兰州理工大学理学院, 兰州 730050)

摘要:以低损耗材料聚乙烯为基底,设计了一种新型的太赫兹光子晶体光纤,并利用全矢量有限元法对其单模截止频率、色散和损耗进行了数值模拟。结果表明,改变包层空气孔周期、空气孔直径和纤芯空气孔直径,可以调节太赫兹单模传输的频率范围。当包层空气孔周期为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、包层空气孔直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、纤芯空气孔直径为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时,不仅可以获得 $0.1\sim 5\text{ THz}$ 的宽频带单模传输范围,而且在 $0.5\sim 5\text{ THz}$ 频率范围内波导色散可以控制在 $\pm 0.5\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,且模式的限制损耗随频率的增大逐渐减小,同时在 2.8 THz 处获得最小传输损耗 3.86 dB/m 。

关键词:太赫兹波;光子晶体光纤;单模传输;色散;损耗

中图分类号:TN929.11

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2016)01-0019-03

Analysis of Single-Mode Propagation Characteristics of a Novel THz Wave Photonic Crystal Fiber

LIU Yan-jun, HU Shou-zhong, HOU Shang-lin, WANG Dao-bin, LEI Jing-li, WU Gang, LI Xiao-xiao, YUAN Peng

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A novel THz wave Photonic Crystal Fiber (THz-PCF) is designed with a low-loss material polyethylene as the substrate. Its single mode cutoff frequency, dispersion and loss are numerically simulated using the full-vector finite element method. The results show that the frequency range of the THz single-mode propagation can be regulated by changing the cladding air hole period, air hole diameter and fiber core air hole diameter. When the cladding air hole period is $400\text{ }\mu\text{m}$, the cladding air hole diameter is $100\text{ }\mu\text{m}$ and fiber core air hole diameter is $40\text{ }\mu\text{m}$, the broadband single-mode propagation range can not only be increased to $0.1\sim 5\text{ THz}$, but also the waveguide dispersion can be controlled at $\pm 0.5\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ within the frequency range of $0.5\sim 5\text{ THz}$. Moreover, the modal confinement loss will gradually decrease with the increase of the frequency and the minimum propagation loss will be 3.86 dB/m at 2.8 THz .

Key words: THz wave; PCF; single-mode propagation; dispersion; loss

0 引言

THz(太赫兹)^[1]波是指频率在 $0.1\sim 10\text{ THz}$ 范围的电磁波,其波长范围为 $0.03\sim 3\text{ mm}$ 。由于 THz 波的频率位于电子学和光学的交界处,因此在成像、信息通信和医学诊断等多个领域有着独特的优势和潜在的应用前景^[2]。而 PCF(光子晶体光纤)具有单模工作波长范围大、可实现宽带低平坦色散以及其结构的多变性等优点^[3-4],已引起学者们的极大关注。

本文设计了一种新型的 THz PCF,即在纤芯中引入 3 个小空气孔,形成等边三角形。这种结构不仅保留了传统 PCF 良好的光约束性,还可以灵活地调节结构,使其在尽量大的频宽内实现单模传输,并在单模频率范围内获得较低的波导色散和传输损耗。其大宽带、低损耗和低色散的优势将使光纤传输性能得到极大地提升。

1 理论分析

本文设计的 THz PCF 的横截面如图 1 所示。包层由标准的正六边形三角晶格结构组成,在纤芯部分引入 3 个小空气孔,其位于纤芯的正中间并构成等边三角形。图中, Λ 为包层空气孔周期,包层空气孔直径为 d_1 ,纤芯空气孔直径为 d_2 ,灰色基底

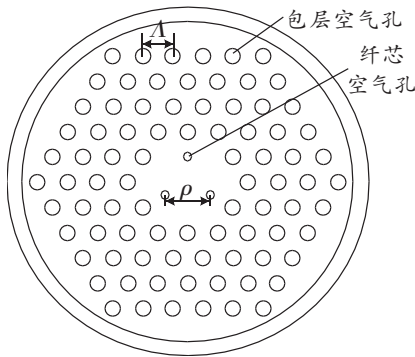


图 1 THz PCF 的横截面示意图

收稿日期:2015-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61167005,61367007);甘肃省自然科学基金资助项目(1112RJZA018, 1112RJZA017)

作者简介:刘延君(1967—),女,山东陵县人。副教授,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信和太赫兹通信。

填充的是聚乙烯。THz 波段的折射率 $n_1 = 1.534$ ，空气的折射率 $n_0 = 1$ 。

对于折射率引导型 PCF，利用等效折射率模型，其归一化频率可以表示为^[5-6]

$$V_{\text{eff}} = (2\pi\rho/\lambda)(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}, \quad (1)$$

式中， ρ 为等效纤芯半径^[7]，由于 ρ 的选取直接影响归一化频率值，因此我们参照文献^[7] 的有效折射率模型中纤芯半径的选取原则； λ 为工作波长； $n_{\text{core}} = 1.534$ 为纤芯折射率； n_{eff} 为缺省纤芯的包层折射率（与光纤的结构参数和传播光频率有关）。

在理想的 PCF 中，光纤的总传输损耗 α_{total} 反映了光波在光纤中的衰减程度，表述为

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{abc}} + \alpha_{\text{con}}, \quad (2)$$

式中， α_{abc} 为聚乙烯材料的吸收损耗， α_{con} 为模式的限制损耗。 α_{con} 可以由复数形式的传播常数获得，其表达式为^[8-9]

$$\alpha_{\text{con}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ (dB/m)}, \quad (3)$$

式中， λ 的单位为 μm ， $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为传播模式有效折射率的虚部。

光纤的总色散等于波导色散和材料色散之和，但是对于传输 THz 波的介质聚乙烯，由于其由单一材料组成，并且色散值非常小，因此计算 THz PCF 的色散时只需考虑波导色散^[10]，其表达式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial^2 \lambda}, \quad (4)$$

式中， c 为真空中的光速， $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为传播模式有效折射率的实部。

本文采用全矢量 FEM(有限元法)进行分析计算。通过合理地设置参数并结合 PML(完美匹配层)条件，可以计算出具有复数形式的有效折射率 n_{eff} ，进而分析并计算单模传输范围以及在单模传输范围内的色散和损耗特性。

2 数值结果与分析

2.1 单模截止频率

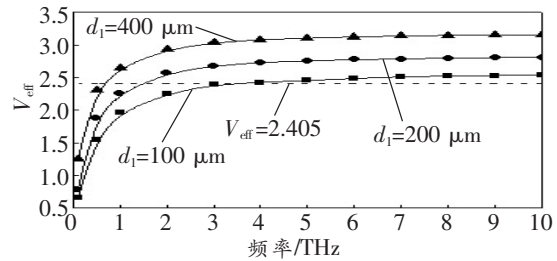
THz 波的频率范围很宽，要想在 THz 波段实现宽频带单模传输，可以通过合理地调节结构变量参数使其单模传输范围尽可能的大。

首先，固定 $\Lambda = 400 \mu\text{m}$ ，改变 d_1 和 d_2 的大小，研究其对单模截止频率范围的影响。

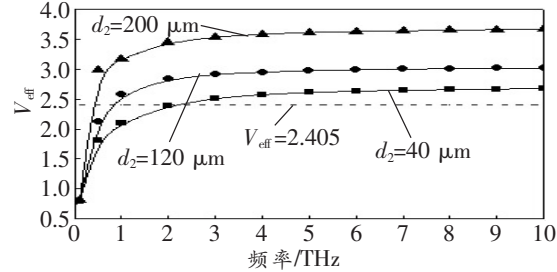
取 $d_2 = 60 \mu\text{m}$ ， d_1 分别为 100、200 和 $400 \mu\text{m}$ 时，通过计算得到 V_{eff} 与频率之间的关系，如图 2(a) 所示。当 $V_{\text{eff}} = 2.405$ 时，对应的频率为截止频率，

PCF 的截止频率随着 d_1 的增大而减小。这是由于 d_1 增大时，占空比 d_1/Λ 也随着增大，对应的包层等效折射率减小， V_{eff} 变大，单模截止频率范围就会减小。

取 $d_1 = 200 \mu\text{m}$ ， d_2 分别为 40、120 和 $200 \mu\text{m}$ ，通过计算得到 V_{eff} 与频率之间的关系，如图 2(b) 所示。由图中可以看出，THz PCF 的截止频率随着 d_2 的增大而减小。这是由于随着 d_2 增大，纤芯对光的限制能力增强，使得高阶模随频率的增大迅速进入纤芯，从而导致单模传输范围变窄。



(a) 取 $d_2 = 60 \mu\text{m}$ ，改变 d_1



(b) 取 $d_1 = 200 \mu\text{m}$ ，改变 d_2

图 2 保持 Λ 不变，改变 d_1 与 d_2 时，
 V_{eff} 随频率的变化曲线

其次， d_1 、 d_2 分别取为 100 和 $60 \mu\text{m}$ ，研究 Λ 对单模截止频率范围的影响。取 Λ 分别为 100、200 和 $400 \mu\text{m}$ ，通过计算得到对应的 V_{eff} 曲线，如图 3 所示。由图中可以看出，保持 d_1 、 d_2 不变，随着 Λ 的逐渐增大， V_{eff} 的值逐渐减小。这是因为随着 Λ 的增加，占空比 d_1/Λ 减小，对应的包层等效折射率增

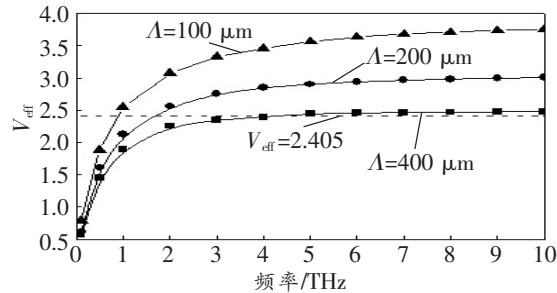


图 3 保持 d_1 与 d_2 不变，改变 Λ 时，
 V_{eff} 随频率的变化曲线

大, V_{eff} 变小, 导致截止频率向高频波段移动, 单模截止频率范围变大。

综合图 2 和图 3 的结论, 选取参数 $\Lambda=400\ \mu\text{m}$, $d_1=100\ \mu\text{m}$, $d_2=40\ \mu\text{m}$, 得知在 $0.1\sim5\ \text{THz}$ 频率范围内, THz 波在三角芯 PCF 中可以实现单模传输, 如图 4 所示, 而且在这个单模传输范围内可以获得非常好的传输特性。

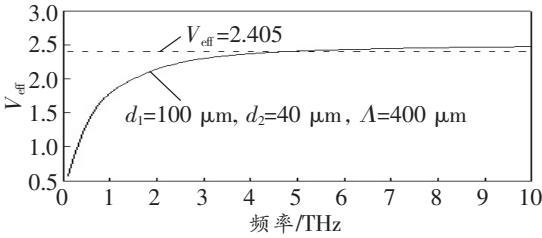


图 4 V_{eff} 随频率的变化曲线

2.2 传输损耗与波导色散

图 5~图 7 分别给出了 $\Lambda=400\ \mu\text{m}$, $d_1=100\ \mu\text{m}$, $d_2=40\ \mu\text{m}$, 频率取 $0.1\sim5\ \text{THz}$ 时, 吸收损耗和限制损耗以及总传输损耗随频率的变化曲线。结果表明, 在低频段光纤损耗主要受限制损耗

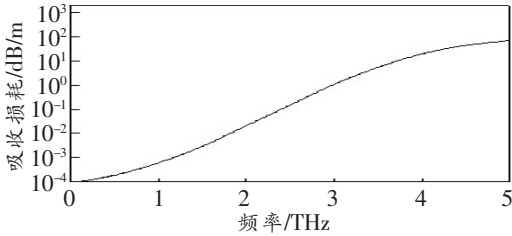


图 5 吸收损耗随频率的变化曲线

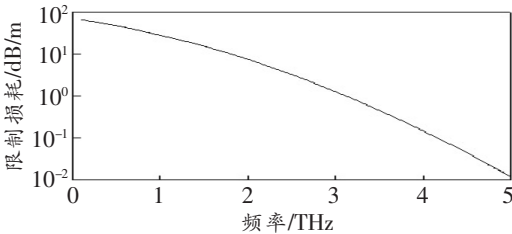


图 6 限制损耗随频率的变化曲线

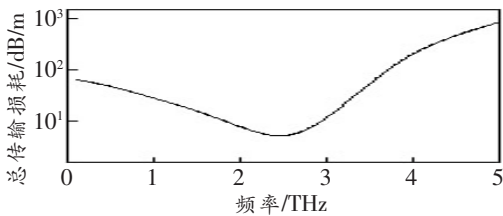


图 7 总传输损耗随频率的变化曲线

影响, 而在高频段主要受吸收损耗的影响。这是由于在低频段场能量大部分扩散到包层, 限制损耗非常大, 而包层对 THz 波的吸收损耗非常小(空气孔

的吸收损耗忽略); 而在高频段, 场能量几乎全部被限制在纤芯, 限制损耗非常小, 而基底材料的吸收损耗非常大。在频率为 $2.8\ \text{THz}$ 处, 总传输损耗达到最小值 $3.86\ \text{dB/m}$ 。

当 $\Lambda=400\ \mu\text{m}$, $d_1=100\ \mu\text{m}$, $d_2=40\ \mu\text{m}$ 时, 结合式(4)可以得到波导色散随频率的变化曲线, 如图 8 所示。由图可见, 在低频段, 波导色散为负值并随频率的增大而增大; 当频率大于零色散频率后, 是色散平坦区域, 色散趋于定值。在 $1.5\ \text{THz}$ 处, 波导色散达到正的最大值 $0.46\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 并且在 $0.5\sim5\ \text{THz}$ 频率范围内波导色散可以控制在 $\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。

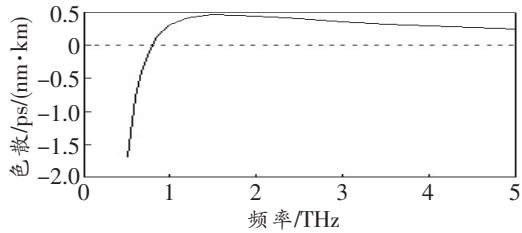


图 8 色散随频率的变化曲线

3 结束语

本文设计并研究了一种新型 THz PCF, 其包层由标准的正六边形三角晶格结构组成, 在纤芯中引入 3 个小空气孔, 形成等边三角形。通过改变 d_1 、 d_2 和 Λ 的值, 可以实现 $0.1\sim5\ \text{THz}$ 宽频率范围内的单模传输, 并且在单模传输范围内具有低损耗、低色散特性。在 $0.5\sim5\ \text{THz}$ 频率范围内, 可以将波导色散控制在 $\pm 0.5\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$; 频率为 $2.8\ \text{THz}$ 处的总传输损耗低至 $3.86\ \text{dB/m}$ 。这种新型 THz PCF 具有很好的束缚 THz 波的能力, 对下一代 THz 波的传输、研究和发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97—105.
- [2] Idehara T, Sakai K, Hangyo M, et al. Preface for the special issue on frontier of terahertz technology [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(1): 4.
- [3] Russell P. Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299(5605): 358—362.
- [4] 侯尚林, 韩佳巍, 强昭珺, 等. 改进型蜂巢晶格结构光子晶体光纤的色散与非线性特性 [J]. 发光学报, 2011, 32(2): 179—183.