

文章编号: 2095-4980(2014)01-0028-04

环烯烃聚合物太赫兹光子晶体光纤设计与制造

何晓阳^{1a,1b}, 陈琦^{1a,1b}, 张屹遐^{1a}, 孔德鹏²

(1.中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999;
2.中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 为降低传输损耗, 在太赫兹波段采用具有低吸收损耗的环烯烃共聚物作为基质材料, 设计了一种太赫兹光子晶体光纤。通过全矢量有限元法模拟仿真, 对光子晶体光纤的损耗和频率的关系进行了分析计算。结果表明, 这种光纤在太赫兹频段具有良好的传输特性, 大大优于传统的金属波导, 且该类型光纤还具备良好的弯曲性能, 在太赫兹频段具有重要应用价值。

关键词: 光子晶体; 太赫兹; 光纤

中图分类号: TN818

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201401.0028

Design and fabrication of cyclic-olefin copolymer based terahertz photonic crystal fiber

HE Xiao-yang^{1a,1b}, CHEN Qi^{1a,1b}, ZHANG Yi-xia^{1a}, KONG De-peng²

(1a.Institute of Electronic Engineering; 1b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2.Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shaanxi 710119, China)

Abstract: A terahertz Photonic Crystal Fiber(PCF) made of Cyclic-Olefin Copolymer(COC) with low absorption loss in terahertz band is designed to reduce the transmission loss. By full vector finite element method, the loss of terahertz PCF versus frequency is simulated and analyzed. Results show that the proposed fibers have much better transmission properties than metallic waveguides in terahertz band. Along with the fine flexibility to bend, they are of great importance in terahertz applications.

Key words: photonic crystal; terahertz; fiber

在太赫兹技术研究中, 太赫兹源无疑是研究的重点, 稳定的、高效的辐射源是太赫兹技术全面发展的关键。近年来, 由于超快激光技术、微电真空器件、固态振荡器、量子级联激光器和自由电子激光器的迅速发展, 太赫兹辐射源越来越接近实际应用。与此同时, 开展太赫兹信号处理、传输、辐射等关键技术的研究开始变得迫切起来, 太赫兹传输、辐射技术的研究将为今后太赫兹雷达系统、通信系统、成像系统的建立提供相关的技术支撑^[1]。光子晶体光纤(PCF)^[2-5]由晶格常数为波长量级的二维光子晶体构成, 光纤的核心由一个破坏了包层结构周期性的缺陷构成。对于纤芯为空气孔型缺陷的情况, 通过包层的二维光子晶体的布拉格衍射, 一定波长的电磁波被陷获在作为纤芯的空气孔中, 其机制不同于传统的全内反射光纤。太赫兹波极易被介质材料吸收, 对于太赫兹波的传输来说, 限制其传输损耗的一个关键因素是材料对太赫兹波的本征吸收。越来越多的研究表明, 高密度聚乙烯、特氟龙等聚合物材料制备的光子晶体光纤在太赫兹波段有着极低的传输损耗^[6-8]。本文采用全矢量有限元法, 仿真设计一种太赫兹光子晶体光纤, 并采用环烯烃共聚物^[9](COC)材料制备光纤样品。

1 设计与仿真

设计的光子晶体光纤横截面见图1, 该光纤材料设计为环烯烃共聚物, 相关结构参数为: $d=0.14$ mm, $\Lambda=0.2$ mm, $D=0.37$ mm, $D_{\text{core}}=1.98$ mm, $D_{\text{out}}=4$ mm。

采用 COMSOL 软件对设计的光纤进行仿真计算, 不同频率时光纤内主模

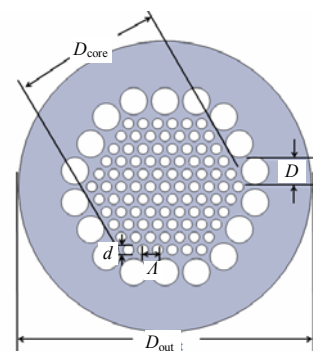


Fig.1 Cross-section of PCF
图1 光子晶体光纤横截面示意图

的场分布情况见图2,从图中可以看出,随着传输频率的增大,主模模场向太赫兹光子晶体光纤中心收缩,但同时在光纤上传输的主模模场能量随之增大。

图3反映了主模有效折射率随传输频率的变化情况。由图可知,随着传输频率的增大,主模有效折射率的实部随之增大,而其虚部随之减小。

光子晶体光纤的损耗主要由有效模式损耗和限制损耗2部分组成。其中,有效模式损耗是由材料吸收引起的,限制损耗是由有限包层所导致的模式泄漏带来的。

在空气中传输的模场能量分数将决定该光子晶体光纤有效模式损耗的大小。图4反映了空气孔中传输的模场能量分数随传输频率的变化情况。由图4可知,随着传输频率的增大,在空气孔中传输的模场能量分数先增大后减小,并在 $f=0.7$ THz左右达到最大,约为60.4%。此时有效模式损耗随传输频率的变化情况如图5所示。由图5可知,有效模式损耗随传输频率的增大近似线性增大。

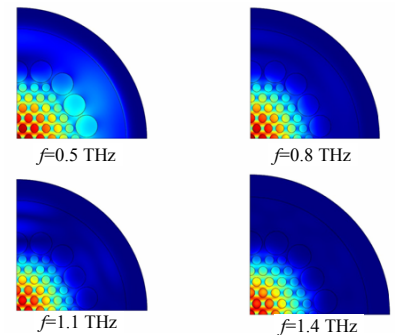


Fig.2 Fields distribution of fundamental mode at different frequencies
图2 不同频率时主模的场分布

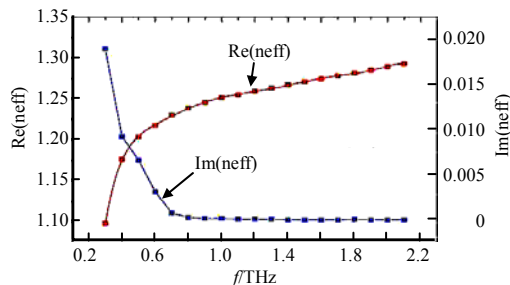


Fig.3 Fundamental mode effective refractive index vs frequency
图3 主模有效折射率随频率的变化

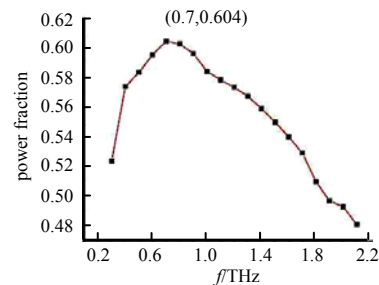


Fig.4 Mode field energy ratio vs transmission frequency
图4 模场能量分数随传输频率的变化

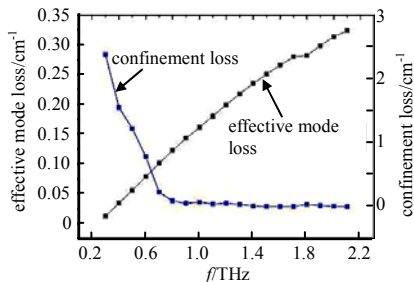


Fig.5 Effective mode loss and confinement loss vs transmission frequency
图5 有效模式损耗与限制损耗随传输频率的变化

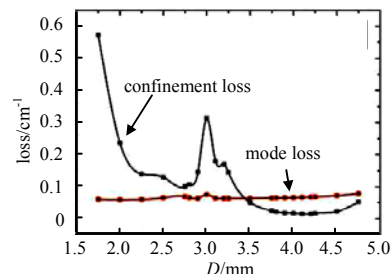


Fig.6 Influence of PCF outer diameters on transmission loss at 0.6 THz
图6 0.6 THz 时光子晶体光纤外径对传输损耗的影响

限制损耗主要由主模有效折射率虚部的大小决定,如图5所示,当传输频率小于0.8 THz时,限制损耗随着传输频率的增大而急剧减小(从0.3 THz时的 2.38 cm^{-1} 减小到0.8 THz时的 0.05 cm^{-1});当传输频率大于0.8 THz时,限制损耗维持在 0.05 cm^{-1} 量级。

将预制棒拉制成不同直径的太赫兹光子晶体光纤时,其结构参数随之发生等比变化,其传输特性,特别是损耗特性,也会有所不同。为了研究光纤外径对损耗特性的影响,在传输的太赫兹辐射频率为0.6 THz时,计算了不同外径大小情况下的限制损耗和有效模式损耗,结果见图6。

由图可知,光子晶体光纤外径的大小,对有效模式损耗影响不大(维持在 0.07 cm^{-1} 左右),而对其限制损耗的影响明显。这是由于随着太赫兹光子晶体光纤外径的变化,其相关尺寸是等比变化的,即纤芯孔洞直径与孔间距之比 d/Λ 是固定不变的。对于特定频率,纤芯孔洞直径不同的光子晶体光纤,其对主模的束缚能力是不同的,这就导致了外径的大小对限制损耗的影响明显。同时,当光纤外径为4 mm时,限制损耗达到最小,约为 0.016 cm^{-1} 。

该光子晶体光纤的总传输损耗见图7,在0.6 THz时损耗最小,约为0.72 dB/m,图8为0.6 THz时光子晶体光纤中主模的场分布。

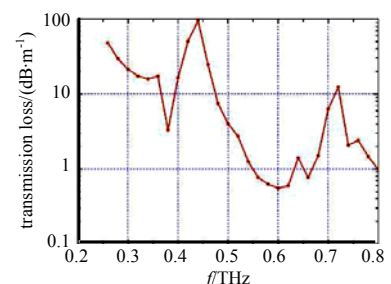


Fig.7 Simulation result of transmission loss of PCF
图7 光子晶体光纤的传输损耗

2 光纤的制造

把已经设计好的微结构光纤端面放大 10 倍, 得到预制棒的外径尺寸为 4 cm。据此结构设计制造光纤预制棒的模具。在模具中通过挤出成型法制造预制棒, 最后经过热拉伸, 得到各种直径的光纤样品。

目前, 国际上报道最多的预制棒制作方法是毛细管堆积法, 这种方法制备的微结构石英光纤已得到广泛应用。利用此方法制造聚合物微结构光纤的报道虽然有, 但是得到实用化的微结构聚合物光纤是采用实心棒钻孔法。因为塑料毛细管堆积成的预制棒在拉丝过程中, 高分子链的直线运动占优势, 而高分子链间的相互作用力比较弱, 所以不能得到微结构非常均匀的高品质光纤。对实芯聚合物棒体进行精密钻孔, 洞内壁抛光, 得到的预制棒长度在 12 cm 左右, 对于结构较复杂的预制棒, 加工难度太大, 能耗高, 不能实现性价比高的产品^[10-11]。

本文采用热挤出成型法制造光纤预制棒。首先将 COC 颗粒料放进挤出机干燥 1 h, 排除颗粒料中吸附的水分子, 然后把用聚二甲基硅油擦饰过的模具在 200 °C 下热处理 2 h, 冷却下来之后将模具擦干净, 接着将模具装在挤出机上, 设置好各加热区的温度, 预热 1 h, 开始把融化的 COC 原料挤入模具。等模具充满后关闭原料加热区, 等温度冷却到室温时, 把预制棒从挤出机上取下来, 在脱模机上卸模, 就得到了预制棒。

预制棒的拉伸工艺主要由加热炉的温度、预制棒送料速度、牵引速度、预制棒直径以及光纤直径决定。在电阻炉温度恒定的前提下, 如果定义拉丝时的牵引速度为 v_{draw} , 预制棒送料速度为 v_{feed} 。根据质量守恒定律可知, 预制棒直径 D 和太赫兹光纤直径 D_{out} 之间存在着下面的关系:

$$D_{\text{out}} = D \sqrt{\frac{v_{\text{feed}}}{v_{\text{draw}}}} \quad (1)$$

因此通过调整牵引速度 v_{draw} 和送料速度 v_{feed} 的大小, 可以精确控制太赫兹光纤直径。

把预制棒挂在高度为 11.7 m 的特种拉丝塔内, 设置炉区温度为 250 °C, 等温度恒定之后预热数小时, 在重力作用下, 当棒子开始变细时就开始加牵引力拉丝, 设置合适的送料速度和拉伸速度, 就可以得到芯径为 4 mm 的光纤。

把芯径为 4 mm 的光纤放在显微镜下, 可以清楚看到如图 9(a)所示的端面微结构图, 光纤内的微结构与设计的结构大体上相似。但是, 进一步放大可以看出小孔洞有椭圆化趋势, 这些缺陷会对光纤的损耗和输出模场轮廓产生一定影响。图 9(b)为弯曲起来的 1 m 长的光纤样品, 光纤干净明亮, 表面光滑, 粗细均匀。

微结构的变形或小孔塌陷主要是因为预制棒拉伸时加热炉温度场分布不均匀、导致预制棒的温度分布不均衡, 使光纤包层壁厚不均匀, 导致光纤微结构变形和塌陷。此外, 拉伸速度和送料速度协调不好, 会影响光纤直径的均匀性。拉伸速度一定时, 送料较快光纤较粗, 送料较慢光纤较细, 必须精确计算送料速度和拉伸速度, 只有两者协调一致才能够保证光纤的粗细均匀性。为了得到更完美的微结构光纤, 还需要进一步改进加热炉结构, 使温度场分布达到横向、纵向都均匀。

3 结论

在太赫兹波段采用具有低吸收损耗的新型聚合物材料 COC 作为基质材料, 设计了一种太赫兹光子晶体光纤。采用 COMSOL 软件模拟分析了不同芯径的光纤损耗和频率的关系。重点研究了芯径为 4 mm 的光纤的传输特性, 结果表明: 在 0.6 THz 时光纤损耗最小, 约为 0.72 dB/m。近期将对该光纤样品的传输特性进行测试, 以验证理论分析与仿真计算的准确性。采用热挤出成型工艺, 成功制造了长度约 22 cm 的高品质预制棒。通过热拉伸得到

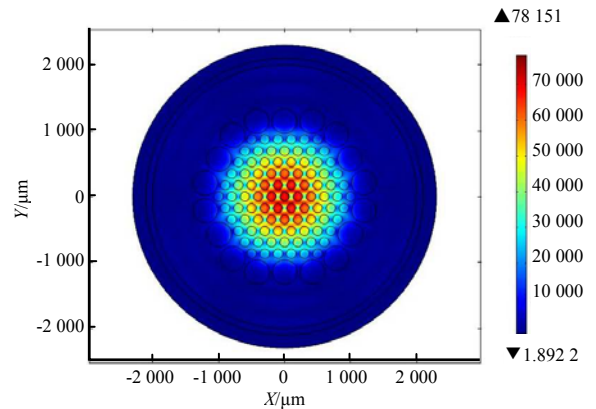


Fig.8 Fields distribution of PCF at 0.6 THz

图 8 在 0.6 THz 时光子晶体光纤的主模场分布图

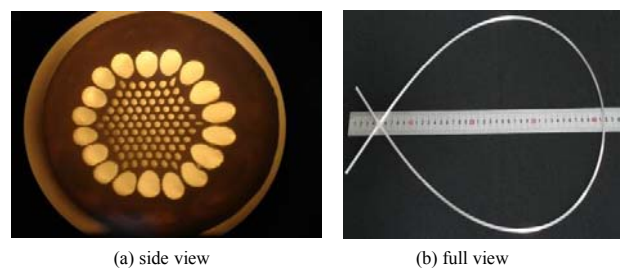


Fig.9 Photograph of PCF

图 9 光子晶体光纤的照相图

了4 mm 芯径的太赫兹光纤样品。显微观察了光纤的端面,发现光纤微结构较为完整,但是小孔洞有椭圆化趋势,下一步将优化拉伸工艺,制造结构更加完整、性能更加优良的光纤。

参考文献:

- [1] Lai C H, Hsueh Y C, Chen H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. Optics letters, 2009, 34(21):3457–3459.
- [2] Gerome F, Jamier R, Auguste J L, et al. Simplified hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics letters, 2010, 35(8):1157–1159.
- [3] Hassani A, Dupuis A, Skorobogatiy M. Porous polymer fibers for low-loss Terahertz guiding[J]. Optics express, 2008, 16(9): 6340–6351.
- [4] Atakaramians S, Afshar V S, Ebendorff-Heidepriem H, et al. THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization[J]. Optics express, 2009, 17(16):14053–15062.
- [5] Eijkelenborg M A, Argyros A, Leon-Saval S G. Polycarbonate hollow-core microstructured optical fiber[J]. Optics letters, 2008, 33(21):2446–2448.
- [6] Argyros A, Leon-Saval S G, Pla J, Docherty A, et al. Antiresonant reflection and inhibited coupling in hollow-core square lattice optical fibres[J]. Optics express, 2008, 16(8):5642–5648.
- [7] Lai C H, You B, Lu J Y, et al. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. Optics express, 2010, 18(1):309–322.
- [8] Wu D S, Argyros A, Leon-Saval S G. Reducing the size of hollow terahertz waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(1):97–103.
- [9] WANG Doudou, WANG Lili. Design and characteristics of novel optical polymer Topas COC-based microstructured optical fiber[J]. Acta Physics Sinica, 2010, 59(5):3255–3259.
- [10] Barton G, van Eijkelenborg M A, Henry G, et al. Fabrication of microstructured polymer optical fibres[J]. Optical Fiber Technology, 2004, 10(1):325–335.
- [11] Park J H, Shin B G, Kim J J. Fabrication of plastic holey fibers[C]// Proceedings of the International Plastic Optical Fibres conference. Tokyo:[s.n.], 2002:9–11.

作者简介:



何晓阳(1983–), 男, 湖北省嘉鱼县人, 博士, 主要研究方向为Metamaterial、太赫兹天线技术.email:hexy789@163.com.

陈琦(1981–), 男, 重庆市人, 在读博士研究生, 主要研究领域为光子晶体、太赫兹天线技术研究.

张屹遐(1987–), 女, 四川省绵阳市人, 硕士, 主要从事电磁场、微波毫米波天线技术研究.

孔德鹏(1980–), 男, 西安市人, 博士, 主要从事聚合物加工工艺技术方面的工作.