

环烯烃共聚物空芯微结构太赫兹光纤的设计与制造

姬江军¹,孔德鹏¹,马天¹,何晓阳²,陈琦²,王丽莉¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,陕西 西安 710119;
2. 中国工程物理研究院电子工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:以环烯烃共聚物(cyclic-olefin copolymer, COC)材料为基质,设计、制造了一种空芯多孔包层太赫兹(THz)纤维。利用 comsol 软件模拟了芯径为 6 mm 的光纤在 0.2~1.5 THz 波段的损耗特性,结果表明:在 0.85~1.5 THz 波段存在多个低损耗频带,而且在 0.85~1.1 THz 波段有低于 3 dB/m 的三个窗口;特别是在 0.99 THz,损耗达到 0.208 dB/m。芯径为 3 mm、4.8 mm 和 6 mm 的光纤在 0.8~1.5 THz 波段的损耗特性对比分析表明:该 COC 微结构多孔包层空芯纤维的损耗随着光纤外径的增加而减小。把设计的太赫兹纤维外径放大 7 倍达到 7 cm,据此设计制造了光纤预制棒成型专用模具。借助热挤出成型方法得到了结构完整、孔洞表面光滑,长度为 22 cm 的空芯多孔包层预制棒。利用该实验室独有的微结构光纤拉丝塔,成功获得了微结构保持完好的光纤样品。损耗分析结果表明:6 mm 芯径的光纤样品在 1.27 THz 的平均损耗为 2.175 dB/m,与该频率的理论损耗(1.95 dB/m)接近。

关键词:微结构太赫兹纤维; 空芯波导; 抗共振反射; 损耗特性; 环烯烃共聚物

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1909-05

Design and fabrication of cyclic-olefin copolymer based hollow-core microstructured terahertz fiber

Ji Jiangjun¹, Kong Depeng¹, Ma Tian¹, He Xiaoyang², Chen Qi², Wang Lili¹

- (1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A hollow-core porous microstructured terahertz fiber based on Topas cyclic-olefin polymer (COC) was designed and manufactured. The loss characteristics of an optical fiber with outer diameter 10 mm was simulated using comsol software in the 0.2-1.5 THz band. There are several low-loss bands in the 0.85-1.5 THz, and there are three windows in which the loss is lower than 3 dB/m in the 0.85-1.1 THz band, the loss is about 0.208 dB/m especially in the 0.99 THz. By comparing the loss characteristics of the fiber with core diameter of 3 mm, 4.8 mm and 6 mm in 0.8-1.5 THz band, the loss was reduced with increasing the diameter. The outer diameter of designed THz fiber was enlarged to 7 cm, and a dedicated mold was designed for manufacturing preform. A 22 cm long THz fiber preform with a standard structure and smooth surface was manufactured by the hot extrusion molding method. Finally,

收稿日期:2013-10-05; 修订日期:2013-11-10

基金项目:国家自然科学基金(61275106, 61108061)

作者简介:姬江军(1987-),男,硕士生,主要从事太赫兹波导器件的研究。Email:jjhit@163.com

导师简介:王丽莉(1957-),女,博士,研究员,主要从事聚合物光学材料制造与应用等方面的研究。Email:wangll@opt.ac.cn

through the laboratory's unique draw tower, the terahertz fiber of the core diameter of 3 mm, 4.8 mm and 6 mm were manufactured. The loss analysis result show that the average loss of the fiber with core diameter of 6mm is 2.175 dB/m in 1.27 THz and it is near the theoretical loss (1.95 dB/m).

Key words: microstructured terahertz fiber; hollow-core waveguide; antiresonant reflecting; loss characteristics; Topas COC

0 引言

随着太赫兹源和探测器技术的成熟,太赫兹波导技术研究成为太赫兹科学研究的热门课题。然而太赫兹波导技术面临的关键问题是在太赫兹波段没有低损耗的材料。对于太赫兹波来说,最透明的传输介质依然是干燥的空气。因此,有人研究用金属管子、塑料管子用来传输太赫兹波^[1]。越来越多的研究表明,高密度聚乙烯(HDPE)、特氟龙、环烯烃共聚物(COC)等聚合物空芯光纤在太赫兹波段比金属空芯光纤具有更好的透过性,而石英材料光纤在太赫兹波段基本不透明。因此聚合物微结构光纤用于实现太赫兹波传输的研究应运而生^[2-3]。国际上首次演示基于微结构光纤的太赫兹波导的试验是利用了一根高密度聚乙烯固体芯,以高密度聚乙烯管子环绕在固体芯周围作为包层。随后,有人用有更低损耗的特氟龙管子取代高密度聚乙烯做了同样的探索,这种实心微结构太赫兹纤维的损耗主要是由材料吸收损耗决定。为了减小损耗,人们探索利用微结构纤维,如规则排列的亚波长孔阵列纤维,这种结构使得纤芯折射率降低,依据反射机理传输太赫兹能量。纤维本身作为高折射率的纤芯,外部的空气作为低折射率的包层,这样的多空气孔芯,使得材料损耗显著降低,但是这种亚波长多孔纤芯对周围环境的扰动很敏感^[4]。

有人报道采用空芯管状结构可以实现太赫兹波的低损耗传输。空芯波导纤维在紫外、可见光区,特别是中红外波长区(作为二氧化碳激光传输介质)已经实用化。空芯波导主要根据两种传输机理实现导波:一是全内反射效应;二是光子带隙效应。光子带隙型纤维是由三角阵列孔做包层来限制光在纤芯中传输。布拉格反射传导机理则是根据抑制耦合机理,芯和包层模之间有较低的重叠,这限制了纤芯和包层之间的耦合,使得光沿着纤芯传输。这两种波导机理产生了完全不同的传输特性,最常见的光子带

隙型设计具有较窄的传输窗口(约为中心频率的20%)和较低的损耗;而抑制耦合设计具有较宽的传输窗口(约为中心频率的70%)和较高的损耗。在抑制耦合光纤中,光和包层中的材料的相互作用明显减弱,这就意味着材料的吸收损耗大大降低,已有研究证实:采用聚合物空芯纤维结构,传输损耗比材料吸收损耗可以低两个数量级^[4]。

为了制备出具有宽带宽、低损耗的太赫兹纤维,材料选择和波导结构设计是关键。该研究拟采用抑制耦合原理设计一种具有微结构包层空芯型太赫兹光纤^[5-7]。该设计力求保持波导纤维力学结构合理(抗变的支撑结构层)。因此笔者采取空芯-多孔包层-支撑结构层的几何结构^[8]。

空芯光纤的损耗在结构一定时,就决定于材料的损耗。该研究选用在可见、近红外、太赫兹波段都有很宽的透明窗口的环烯烃共合物(COC)。这种新型的聚合物材料中不含残余单体,具有低密度、高折射率、高光学透光率、大的 Ab 数、低双折射、极低的吸水率(约为PMMA、PC的1/10)以及耐热性能好、热膨胀系数低、化学性能稳定、耐酸碱性、机械性能优良等诸多优点。虽然高密度聚乙烯、特氟龙这两种塑料在太赫兹波段也有较低的损耗,但是热加工性远不如COC^[9]。

1 光纤结构设计

早在1986年有人就提出抗共振反射光波导(Antiresonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW)理论研究。这一波导的芯区有相对较大的截面,且工作原理与传统的光波导不同,光在传统波导中通过上下界面的全内反射(Total Internal Reflection, TIR)进行传播,ARROW结构则利用芯区包层的抗共振反射性质。包层可以看作法布里-珀罗标准具,性质和共振腔相似,传输光谱具有周期性,在共振频率处能量完全由包层泄露,因此在芯区和包层分界面处几乎没有反射,芯区没有能量场存在。相反,对于共

振频率以外的光,当传输到芯区和包层分界面时存在反射,光被反射回波导的芯区,因此存在芯区传输模式^[2]。此外,ARROW 具有许多传统光波导所无法比拟的优点:仅传播 TE 模,而对 TM 模及高阶模有很强的抑制能力^[4]。

在此,笔者设计了如图 1(a)所示的空芯微结构

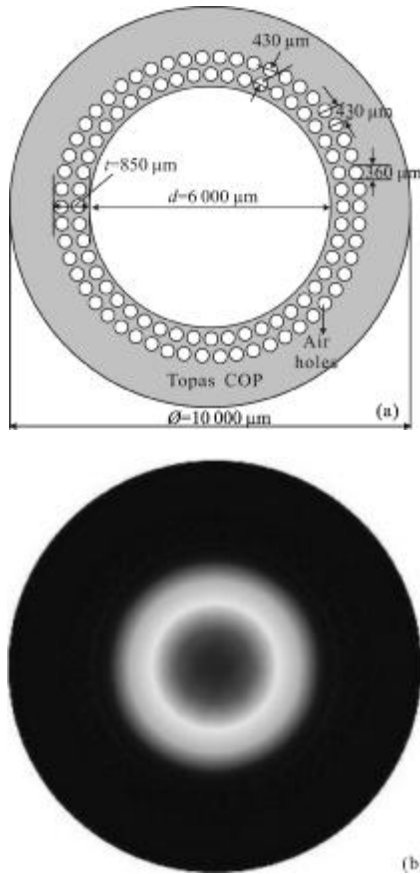


图 1 太赫兹光纤结构外径为 10 mm 的光纤微结构端面和在 0.99 THz 时的基模能量分布图

Fig.1 Structure of THz fiber fiber microstructure cross-section with $\phi=10$ mm and intensity distribution of fundamental core mode at 0.99 THz

包层太赫兹光纤。该光纤由芯区、包层和支撑结构三部分构成。基质材料为环烯烃聚合物(商品名 Topas COC),空芯区直径 d 为 $6000\ \mu\text{m}$,包层厚度 t 为 $850\ \mu\text{m}$,由两圈大小相同的小洞圆环构成,内圈有 48 个小洞,外圈有 54 个小洞,小孔洞直径为 $360\ \mu\text{m}$,孔洞间距和行间距均为 $430\ \mu\text{m}$;为了保持光纤的柔韧性同时为了拉伸时保持光纤内部结构的完整性,在光纤包层外加固了一层厚度为 $1150\ \mu\text{m}$ 的 Topas COC 保护层,作为该太赫兹光纤的力学结构支撑,可以有效减少光的泄露,

光纤整体外径 ϕ 为 $10000\ \mu\text{m}$ 。笔者模拟了光纤在 0.99 THz 时的基模模式图,如图 1(b)所示,耦合进中心大孔的能量达到总能量的 96%以上。

2 太赫兹光纤传输损耗与太赫兹频率以及直径的关系

目前国际上已经报道的大部分太赫兹光纤的损耗都在数 dB/cm 量级,因此没有实用化的太赫兹光纤波导系统。如果能够制备出传输损耗在 3 dB/m 以下的光纤,意味着太赫兹波在传输 1 m 后,仍然有 50%以上的能量输出,就会有一定的实际应用价值。因此,文中重点研究所设计的 THz 纤维理论损耗在低于 3 dB/m 波段的特性。

利用 comsol 软件,模拟分析了芯径 d 为 6 mm 的光纤在 0.2~1.5 THz 波段的损耗特性,结果如图 2 所示。在低频波段光纤损耗较大,在高频波段损耗较低,而且损耗呈现一定的周期性,与理论相符,这是由于包层的抗共振机理产生的。同时在 0.85~1.1 THz 存在三个损耗低于 3 dB/m 的传输窗口,在 0.99 THz 附近有最低损耗,约为 0.208 dB/m。因此,设计的光纤在 0.2~1.5 THz 波段,损耗较低,同时呈现周期性的分布,而且存在多个损耗极低的传输频带,具有重要的应用前景。

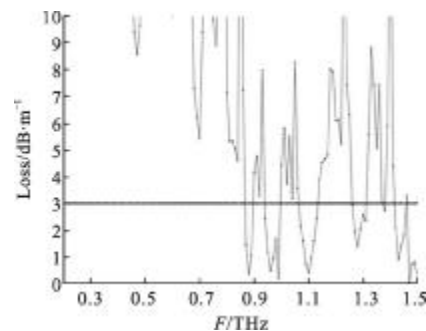


图 2 d 为 6 mm 的光纤在 0.2~1.5 THz 波段的损耗
Fig.2 Loss of fiber from 0.2 to 1.5 THz with $d=6$ mm

此外,还分析了不同直径光纤的损耗特性,把 ϕ 为 10 mm 的光纤,整体尺寸按比例缩小到 5 mm 和 8 mm,对应芯区直径 d 分别为 3 mm 和 4.8 mm。由于在低频波段光纤损耗较大,没有实际应用价值,因此笔者重点分析了芯径 d 为 3 mm、4.8 mm 和 6 mm 的光纤在 0.8~1.5 THz 波段的损耗特性,图 3 为损耗随频率的变化曲线,点划线代表损耗为 3 dB/m 的恒定

值。结果表明:在 0.8~1.5 THz 范围内, d 为 3 mm 的光纤损耗比其他两种光纤大数倍;在 1~1.5 THz 范围内, d 为 4.8 mm 和 6 mm 的光纤有较低的损耗, 都存在损耗低于 3 dB/m 的传输频带; 在 0.8~1 THz 范围内, d 为 3 mm 和 4.8 mm 的光纤损耗均在 3 dB/m 以上, d 为 6 mm 的光纤具有较低的损耗。由此可知, 在 0.2~1.5 THz 波段, 光纤损耗随着芯径的增加有降低的趋势, 尤其是在低太赫兹波段, 随着光纤芯径的增加, 光纤损耗降低明显。但是考虑到实际需要光纤的芯径不宜太粗, 否则影响光纤的柔韧性和实用性。

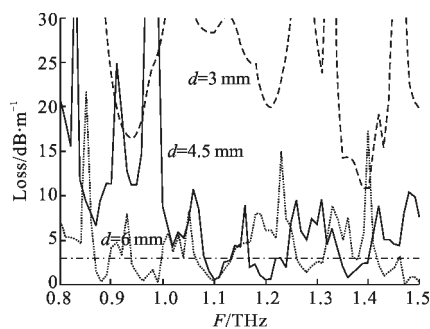


图 3 芯径 d 为 3 mm、4.8 mm 和 6 mm 的光纤在 0.8~1.5 THz 波段的损耗

Fig.3 Loss of fibers from 0.8 to 1.5 THz with $d=3$ mm, $d=4.8$ mm, $d=6$ mm

3 太赫兹光纤的制造工艺

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 7 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, 国际上报道最多的方法是毛细管堆积法。这种方法制备的微结构石英光纤已经得到了广泛应用, 虽然有利用此方法制造聚合物微结构光纤的报道, 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。对实心棒进行精密钻孔、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]。

文中采用该课题组发明的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。该预制棒中心大洞表面光滑, 包层小孔完整、排列整体规范, 预制棒长度 22 cm。如果模具加长到 45 cm, 就可以得到 22~45 cm 长的预制棒。

4 光纤损耗测试

为了测试文中设计、制造的微结构包层空芯太赫兹光纤性能, 笔者采用基于可调谐 CO₂ 激光器选择性激励甲苯气体, 造成气体分子的转动和振动能级跃迁而产生的太赫兹辐射源(SIFIR-50 型光泵浦 THz 激光器, 其中心频率为 1.27 THz) 和一个热释电探测器, 搭建了一套太赫兹纤维损耗测试系统。图 4 为太

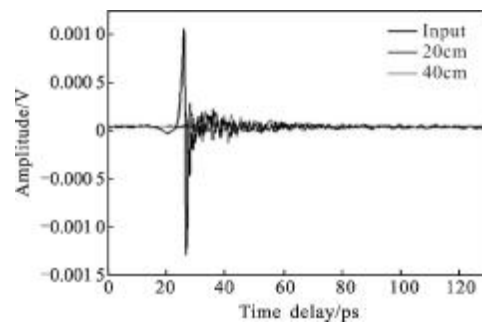


图 4 太赫兹时域系统的脉冲扫描图

Fig.4 Scan of pulse propagated into fiber with TDS system

赫兹时域光谱图, 直线是太赫兹波在自由空气中传输时的脉冲, 点线、虚线分别是太赫兹波在芯径为 6 mm 长为 20 cm、40 cm 的光纤中传输后的脉冲。通过测试不同长度太赫兹纤维的输出功率, 评估了太赫兹纤维样品的传输损耗。为了减小耦合损耗对太赫兹纤维损耗测试的影响, 笔者采用了一种类似截断法的测试方法: 在相同耦合条件下, 测得太赫兹辐射经过不同长度 6 mm 芯径太赫兹纤维的输出功率。假设待测太赫兹纤维的长度分别为 L_1 和 L_2 , 对应的输出功率分别为 P_1 和 P_2 , 则太赫兹纤维的传输损耗 α 可由公式(1)给出, 其单位为 dB/m。

$$\alpha = -10 \frac{\lg(P_2/P_1)}{L_2 - L_1} \quad (1)$$

笔者测量了 0.2 m、0.4 m 长度光纤的传输损耗,

为了减小由斩波器的不稳定性及人为因素带来的实验误差,对太赫兹纤维的输出功率进行多次测量,取其平均值。根据公式(2),得到光纤的传输损耗,平均损耗为 2.175 dB/m。芯径 d 为 6 mm、外径 ϕ 为 10 mm 的光纤在 1.27 THz 频率的理论损耗值应为 1.95 dB/m,实验结果较之高 0.225 dB/m 左右。这可能是由于实际得到光纤的结构缺陷、光纤形变,导致实际损耗略大于理论损耗。

最后采用一个特殊的 THz camera (热释电探测器阵列) 测量了该光纤对 1.27 THz 波输出的模场。图5为芯径 6 mm 长 0.4 m 的光纤的输出模场图,可以看到 1.27 THz 波长处能量很好地被束缚在光纤芯中。由于光纤结构有变形,所以模场形状也有变形,这也是导致实际损耗大于理论损耗的证据。

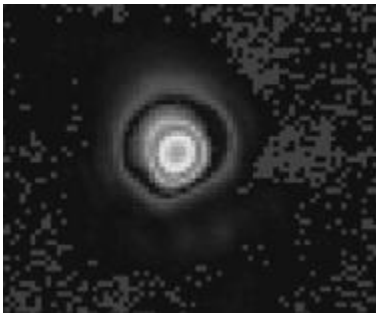


图5 模场能量分布图

Fig.5 Energy distribution of mode field

由于受到太赫兹源和探测器的限制,现阶段还不能实现该光纤样品在 0.2~1.5 THz 波段的损耗谱的测试研究。

5 结论

采用在太赫兹波段具有低吸收损耗的新型聚合物材料 Topas COC 作为基质材料,以抗共振反射机理为理论依据设计了一种空芯多孔包层的太赫兹纤维。采用 comsol 软件模拟分析了不同芯径的光纤的损耗和频率的关系。重点研究了芯径为 6 mm 的光纤在 0.2~1.5 THz 波段的传输特性,结果表明:在 0.85~1.1 THz 波段存在三个损耗低于 3 dB/m 的传输频带,而且在 0.99 THz 附近存在最低损耗约为 0.208 dB/m。通过对比分析芯径为 3 mm、4.8 mm 和 6 mm 的光纤在 0.8~1.5 THz 波段的损耗特性,发现随着光纤外径的增加损耗减小,设计的光纤在太赫兹波段具有重要应用价值。

采用该课题组成熟的热挤出成型工艺,成功制造了长度约 22 cm 的高品质预制棒。通过热拉伸得到了不同芯径的太赫兹光纤样品。显微观察了芯径为 6 mm 光纤的端面,发现光纤微结构较为完整,局部出现损坏甚至塌陷。对芯径为 6 mm 光纤样品在 1.27 THz 的损耗测量结果表明其平均损耗约为 2.175 dB/m,较理论值 1.95 dB/m 偏高,主要是因为光纤微结构的不完整造成。由于太赫兹光源限制,未能分析光纤在 0.85~1.1 THz 波段的损耗特性。笔者课题组将进一步优化拉伸工艺,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, 21(34): 3457-3459.
- [2] Argyros A, Leon-Saval S G, Pla J, et al. Antiresonant reflection and inhibited coupling in hollow-core square lattice optical fibres[J]. *Optics Express*, 2008, 8(16): 5642-5648.
- [3] Lai C H, You B, Lu J Y, et al. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. *Optics Express*, 2010, 1(18): 309-322.
- [4] Wu D S, Argyros A, Leon-Saval S G. Reducing the size of hollow terahertz waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 1(29): 97-103.
- [5] Gerome F, Jamier R, Auguste J L, et al. Simplified hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2010, 8(35): 1157-1159.
- [6] Hassani A, Dupuis A, Skorobogatiy M. Porous polymer fibers for low-loss Terahertz guiding [J]. *Optics Express*, 2008, 9(16): 6340-6351.
- [7] Atakaramians S, Afshar V S, Ebendorff-Heidepriem H, et al. THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization[J]. *Optics Express*, 2009, 16(17): 14053-15062.
- [8] Eijkelenborg M A, Argyros A, Leon-Saval S G. Polycarbonate hollow-core microstructured optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2008, 21(33): 2446-2448.
- [9] Wang Doudou, Wang Lili. Design and characteristics of novel optical polymer Topas COC-based microstructured optical fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(5): 3255-3259. (in Chinese)
- [10] Barton G, van Eijkelenborg M A, Henry G, et al. Fabrication of microstructured polymer optical fibres [J]. *Opt Fiber Technol*, 2004, 10(1): 325-335.
- [11] Park J H, Shin B G, Kim J J. Fabrication of plastic holey fibers [C]//In Proceedings of the International Plastic Optical Fibres Conference, 2002: PD9-11.