

低损耗传输太赫兹波的 Topas 多孔纤维设计

王豆豆¹, 王丽莉²

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054;

2. 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)

摘要: 以新型聚合物材料 Topas 环烯烃共聚物(COC)为基质, 设计了一种能够低损耗传输太赫兹波的多孔纤维。应用全矢量有限元方法对传输特性的研究表明, 该 Topas 多孔纤维在太赫兹波段具有宽带低损耗、低色散的特性: 0.4~1.5 THz 范围内的损耗小于 0.2 cm^{-1} ; 0.48~1.5 THz 范围内的色散为 $1.8 \pm 0.3 \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。所设计的多孔纤维兼顾了结构简单、易于制备的特点。研究结论为 Topas 太赫兹波导的制备提供了理论指导。

关键词: 太赫兹波; Topas 环烯烃共聚物; 聚合物多孔纤维; 有限元方法

中图分类号: O451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2409-05

Design of Topas porous fiber for low-loss Terahertz wave guiding

Wang Doudou¹, Wang Lili²

(1. College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: A kind of porous fiber for low-loss Terahertz wave guiding was designed based on Topas cyclic olefin copolymer (Topas COC). Topas COC is a kind of novel Terahertz low-loss material. Terahertz wave was well confined in a series of subwavelength air holes, which were arranged in base material with triangular lattice. Propagation properties of the designed porous fiber were investigated by using the full-vector finite element method. The results indicated that the designed Topas porous fiber had low loss and low dispersion properties within Terahertz frequency. The loss was less than 0.2 cm^{-1} from 0.4 THz to 1.5 THz, and the dispersion was $1.8 \pm 0.3 \text{ ps/THz/cm}$ within 0.48~1.5 THz. The designed fiber structure was relatively simple and feasible for fabrication. It can be fabricated by the thermo-drawing techniques of polymer preforms invented by our group. The results provided theoretical references for fabrication of Topas Terahertz low-loss and flexible fiber waveguides.

Key words: Terahertz wave; Topas COC; polymer porous fiber; finite element method

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61275106); 陕西省教育厅科研计划(2013JK1106); 西安科技大学博士启动金(2012QDJ043); 西安科技大学培育基金(201236)

作者简介: 王豆豆(1982-), 女, 博士, 主要从事光子晶体光纤在通信和传感方面的研究。Email: doudouwang@opt.ac.cn

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz (波长在 3 000~30 μm)范围内的电磁波,介于电磁波谱中已经被广泛利用的微波和红外光之间。太赫兹波在材料表征、非介入性安全/医学成像、光谱学以及生物化学传感等领域有着广阔的应用前景^[1-4]。在过去的十几年中,太赫兹相干辐射源^[5]和探测技术^[6]都取得了重大突破。然而,几乎所有的材料在太赫兹波段都具有很高的材料吸收率。这使得设计和制备低损耗太赫兹波导颇具挑战性。

目前,多数的太赫兹系统都是在自由空间中传输和处理太赫兹波。这些系统对环境敏感,需要专业的技术人员对系统进行调准和维护,从而严重限制了其应用和推广。因此,有人提出了太赫兹系统柔性化的解决方案。太赫兹系统柔性化的关键是太赫兹波导技术。已经报道的太赫兹波导包括:金属线^[7]、金属涂覆的介质管^[8]、Bragg 光纤^[9]以及亚波长聚合物纤维^[10]等等。其中金属波导通常弯曲损耗大、耦合效率低,受环境影响严重;介质管波导则由于刚性、不易弯曲而不具实用性。此外较大的材料损耗仍然是太赫兹波导及功能器件实用化所亟待克服的难题。

近几年来,聚合物太赫兹纤维波导技术成为了一个研究热点。聚合物除了具有价格低、种类多、加工温度低等众所周知的优点外,在太赫兹波段还具有较低的吸收损耗。在常用的聚合物材料中,新型聚合物材料 Topas 环烯烃共聚物(Topas COC)^[11]具有无定形结构,在太赫兹波段的材料吸收损耗相对较低(在 0.2~1.2 THz 范围内的损耗约为 0.14~0.3 cm^{-1})。比之前认为的太赫兹低损耗聚合物材料(如 Teflon、HDPE)的损耗还要低一个数量级,而比 PMMA 更是低两个数量级^[12]。此外,Topas COC 在太赫兹波段还同时具备低材料色散的特性^[13],其折射率在 0.1~1.5 THz 范围内近似为常数: $n=1.5258\pm 2\times 10^{-4}$ 。低损耗、低色散,结合其极低的吸水率(约为 PMMA、PC 的 1/10)和优良的机械性能^[11],使 Topas COC 成为制备太赫兹波导的最佳材料。

文中以 Topas COC 为基质材料,设计了一种能够实现低损耗传输太赫兹波的聚合物多孔纤维(Porous fiber)。应用有限元方法研究了其在太赫兹波

段的传输特性。结果表明:在该 Topas 多孔纤维中传输的太赫兹波,大部分功率可以分布在一系列亚波长的空气孔和周围的空气包层中。从而将材料吸收损耗降到了最低,在太赫兹波段具有宽带低损耗、低色散的特性。所设计 Topas 多孔纤维在追求优良传输特性的同时,兼顾了结构简单、易于制备的特点,可以借助课题组独创的挤出-成型法^[14]制备。

1 结构设计

尽管 Topas COC 在太赫兹波段具有较低的材料吸收和材料色散,波导结构的设计仍然是实现低损耗、低色散传输太赫兹波必不可少的环节。由于太赫兹波在干燥的空气或其它气体中几乎可以无损耗传输,为了进一步减小传输损耗,一个非常有效的策略就是最大程度的降低位于 Topas COC 材料中的传输功率比例,而增加在材料之外的空气中传输的功率。

为了实现这一目的,设计了如图 1 所示的 Topas 多孔纤维。在 Topas 基质中按照三角形晶格排列着 4 圈亚波长的空气孔,晶格常数和空气孔直径分别用 Λ 和 d 表示。该多孔纤维具有比空气折射率更高的等效折射率,起到“纤芯”的作用,外部的空气起着“包层”的作用。所以该多孔纤维还是基于“纤芯”和“包层”之间的全内反射原理引导太赫兹波传输的。

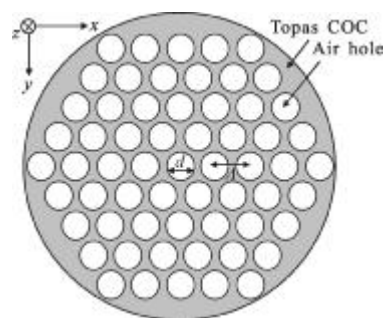


图 1 Topas 多孔纤维横截面示意图

Fig.1 Cross section of Topas porous fiber

2 特性分析

采用全矢量有限元法分析了图 1 中 Topas 多孔纤维在太赫兹波段的传输特性。再从模场特性、基模有效折射率、吸收损耗和色散系数与结构参数和频率的关系等几方面进行了研究。

2.1 传输特性与结构参数的关系

为了研究 Topas 多孔纤维的模场分布、基模有

效折射率和吸收损耗随结构参数的变化关系, 将波长固定为 $300\ \mu\text{m}$ (频率为 $1\ \text{THz}$)。由于 Topas COC 在太赫兹波段具有低材料色散的特性^[12], 将其材料折射率设置为常数。图 2(a) 为结构参数 $d/\lambda=0.1, d/\Lambda=0.83$ 的 Topas 多孔纤维在传输波长为 $300\ \mu\text{m}$ 时的基模模场分布。横截面内沿 x 方向对称轴(图中虚线方向)的光功率分布如图 2(b) 所示。可以看出模场强度在整个多孔纤维横截面内的分布呈现近似高斯型的包络, 很大一部分模场分布在空气孔中, 同时在周围的空气包层中也分布着部分功率。

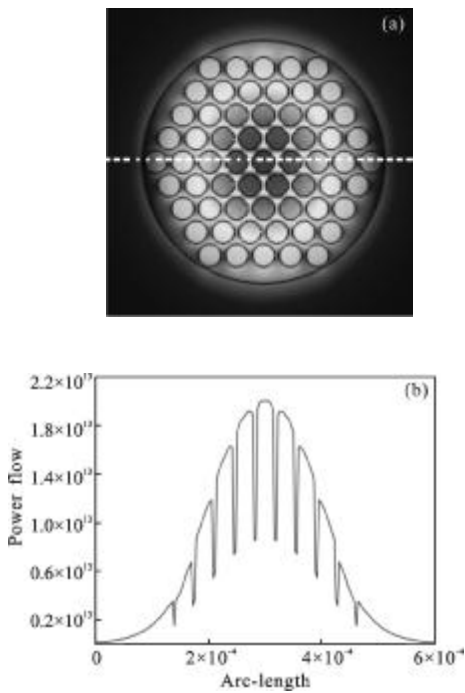


图 2 传输波长为 $300\ \mu\text{m}$ 时 Topas 多孔纤维的基模模场分布, $d/\lambda=0.1, d/\Lambda=0.83$, 沿 x 方向对称轴(虚线)的光功率分布
Fig.2 Modal patterns of fundamental mode of THz Topas MF at $300\ \mu\text{m}$ with $d/\lambda=0.1$ and $d/\Lambda=0.83$, power flow along x direction (dashed line)

为了降低材料吸收损耗, 总是希望尽可能多的传输功率分布在介质材料之外的空气孔或空气包层中。同时为了克服外部环境对传输性能的影响, 应该尽量减少位于空气包层中的功率。通过研究基模有效折射率 n_{eff} , 基模功率分布在纤芯空气孔以及全部空气中的比例随结构参数的变化关系, 可以对满足以上条件的多孔纤维结构参数进行优化。

基模有效折射率随结构参数的变化关系如图 3 所示。可以看出基模有效折射率随空气孔相对尺寸

d/Λ (空气填充率) 的增加而单调减小。当 d/Λ 较大(空气孔间的介质壁厚很小)时, 基模有效折射率远小于材料折射率而接近于空气折射率, 这说明绝大部分的功率分布在空气孔和空气包层中。此外, 对于固定的传输波长和空气填充率, 空气孔直径较大的多孔纤维具有高的基模有效折射率。

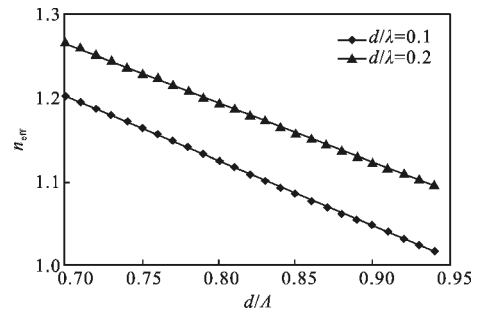


图 3 基模有效折射率随结构参数的变化关系($\lambda=300\ \mu\text{m}$)
Fig.3 Variation of effective refractive index of fundamental mode with structure parameters($\lambda=300\ \mu\text{m}$)

基模能量分布在空气中的比例如图 4 所示。图中上面的两条曲线表示基模能量分布在全部空气(包括空气孔和空气包层)中的比例; 下面的两条曲线表示空气孔中的能量比例。可以看出, 随着空气孔相对尺寸 d/Λ (空气填充率) 的增加, 全部空气中的能量单调增加。但是空气孔中的能量比例随空气孔相对尺寸的增加呈现出先增加、后减小的趋势。

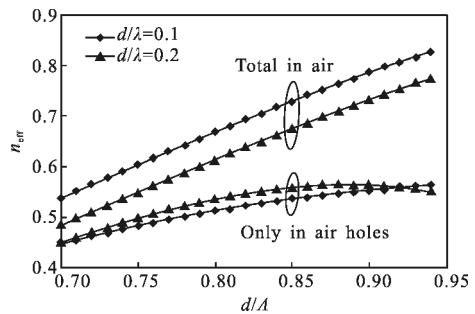


图 4 空气中的能量比例随结构参数的变化关系($\lambda=300\ \mu\text{m}$)
Fig.4 Fraction of modal power guided in the air as a function of structure parameters($\lambda=300\ \mu\text{m}$)

对于 $d/\lambda=0.2$ 的情况, 空气孔中的能量比例在 $d/\Lambda=0.89$ 附近达到最大值。这可以解释为: 在达到最佳尺寸后继续减小空气孔间的壁厚, 模式折射率进一步减小, 导致更多的模场进入空气包层, 从而降低了纤芯空气孔中的能量比例。此外, 当空气孔间壁厚减小到最佳尺寸之后, 继续减小壁厚反而会导致更

多的能量汇聚于介质壁中。同样使得纤芯空气孔中的能量比例减小。根据这些结论,通过对结构参数进行优化可以最大程度的增加位于空气孔中的能量比例。从而获得束缚较好、受外部环境影响较小而且可以低损耗传输太赫兹波的多孔纤维。

2.2 损耗特性

太赫兹多孔纤维的损耗机制主要包括材料吸收损耗和弯曲损耗。对于特定的模式,由于材料吸收引起的有效模式损耗 α_{mod} 可以由下面的公式^[15]求出:

$$\alpha_{mod} = \frac{(\epsilon_0/\mu_0)n\alpha_{mod} \int_{Topas} |E|^2 dA}{2 \int_{all} S_z dA} \quad (1)$$

式中: n 为材料折射率; α_{mod} 为基质块体材料的吸收损耗系数^[12], $S_z = 0.5 \times (\mathbf{S} \times \mathbf{H}^*) \cdot \hat{z}$ 为波印廷矢量的 z 分量; ϵ_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率。由于空气在太赫兹波段是透明的(材料吸收损耗系数为零),上式分子中仅对 Topas 介质材料进行积分。尽管材料折射率 n 在太赫兹波段可以认为是常数,但是材料吸收损耗系数 α_{mod} 却是与传输频率有关的。

将空气孔的直径 d 固定为 $30 \mu\text{m}$, 通过改变空气孔间距 Λ 的方式来改变空气填充率。在 $0.4 \sim 1.5 \text{ THz}$ 范围内,基模有效模式损耗 α_{mod} 随频率和结构参数的变换关系如图 5 所示。可以看出当结构参数固定时,基模有效模式损耗随频率的增加近似线性增加;

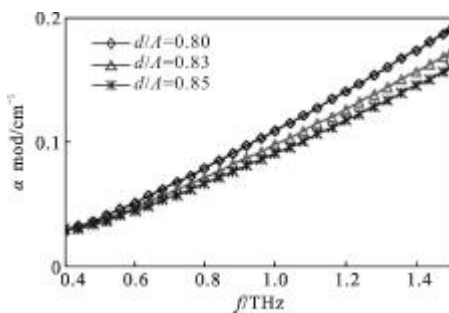


图 5 基模有效模式损耗随频率的变化关系

Fig.5 Fundamental mode loss caused by material absorption versus frequency

当频率固定时,模式损耗随 d/Λ 增加(空气填充率的减小)而降低。结构参数 $d=30 \mu\text{m}$, $d/\Lambda=0.83$ (空气填充率约为 62.5%),直径 $9 \Lambda \approx 325 \mu\text{m}$ 的多孔纤维,具有宽带低损耗特性:在 $0.4 \sim 1.5 \text{ THz}$ 的损耗小于 0.2 cm^{-1} 。1 THz 时的损耗约为 0.099 cm^{-1} (约 0.43 dB/cm),而此

时的材料损耗约为 0.276 cm^{-1} 。说明所设计的 Topas 多孔纤维可以实现低损耗传输太赫兹波。

2.3 色散特性

目前使用的许多太赫兹源发射的都是宽带皮秒脉冲,除了损耗之外,导致信号劣化的另一种机制就是色散。为了有效的传输这样的脉冲,要求波导在脉冲的整个频谱范围内具有低损耗和低群速度色散。在理论上,对于线性系统,通过色散补偿技术可以抵消波导色散的影响,恢复原始脉冲的形状。这也是光波通信系统克服色散所采用的主要方式。但是在太赫兹频率范围的色散补偿技术还未被探究^[15],因此研究太赫兹波导的色散特性和设计低色散的波导结构显得尤为重要。在太赫兹波段,色散通常用模式传播常数 β 关于频率的泰勒展开的二阶项系数 β_2 表示^[16]:

$$\beta_2 = \frac{1}{2\pi c} \left(2 \frac{\partial n_{eff}}{\partial f} + f \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial f^2} \right) \quad (2)$$

式中: β_2 单位为 $\text{ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

色散参数 β_2 随频率和结构参数的变化关系如图 6 所示。可以看出所设计的 Topas 多孔纤维在较宽的频率范围内具有平坦低色散特性。 $d/\Lambda=0.83$ 时,在 $0.48 \sim 1.5 \text{ THz}$ 范围内的色散为 $1.8 \pm 0.3 \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。与参考文献[15]所报道的 PE 基质(仅含一圈空气孔)的多孔纤维相比,文中所设计的 Topas 多孔纤维在具有相近空气填充率的前提下,在更宽的频率范围内获得了更低的色散参数。这一方面是由于 Topas 材料自身具备极低的材料色散,另一方面是所采用的多圈空气孔结构增加了波导色散的调节范围。在 $0.48 \sim 1.5 \text{ THz}$ 范围内,色散参数随空气填充率(d/Λ)的增加而减小。这可以解释为:随着空气填充率的增加,更多的基模场位于空气孔中,使得基模有效折射率接近空气的折射率,随频率的变化减小。

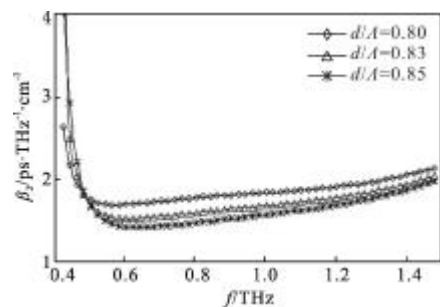


图 6 基模色散参数随频率的变化关系

Fig.6 Fiber dispersion of the fundamental modes versus frequency

3 结 论

文中以 Topas COC 为基质,设计了一种用于传输太赫兹波的多孔纤维。利用了 Topas COC 在太赫兹波段具有低损耗、低色散的材料特性的同时,通过对波导结构的设计最大程度的降低了介质材料对太赫兹波的吸收损耗。应用有限元方法对该 Topas 多孔纤维在太赫兹波段传输特性的研究结论表明:0.4~1.5 THz 范围内的损耗小于 0.2 cm^{-1} , 0.48~1.5 THz 范围内的色散为 $1.8 \pm 0.3 \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, 在较宽的频率范围内具有低损耗和平坦色散特性。所设计 Topas 多孔纤维在追求优良传输特性的同时,兼顾了结构简单、单易于制备的特点,可以采用笔者课题组独创的挤出-成型法制备。

参考文献:

- [1] Lan Tao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
- [2] Lin Xuling, Zhou Feng, Zhang Jianbing, et al. High power wideband terahertz sources based on femtosecond facility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 116-118. (in Chinese)
- [3] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 52(10): 2438-2447.
- [4] Jansen C, Wietzke S, Peters O, et al. Terahertz imaging: applications and perspectives [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): E48-E57.
- [5] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002, 417(1): 156-159.
- [6] Cai Y, Brener I, Lopata J, et al. Coherent terahertz radiation detection: Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(4): 444-446.
- [7] Jeon T, Zhang J, Grischnowsky D. THz sommerfeld wave propagation on a single metal wire[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(16): 161904-1.
- [8] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(20): 2945-2947.
- [9] Skorobogatiy M, Dupuis A. Ferroelectric all-polymer hollow Bragg fibers for terahertz guidance[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(11): 113514-1.
- [10] Chen L J, Chen H W, Kao T F, et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(3): 308-310.
- [11] Emiliyanov G, Jensen J B, Bang O, et al. localized biosensing with topas microstructured polymer optical fiber [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(5): 460-462.
- [12] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J L, et al. Bendable low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range[J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [13] Nielsen K, Rasmussen H K, Jepsen P U. Broadband terahertz fiber directional coupler[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(17): 2879-2881.
- [14] Kong D P, Wang L L. Ultrahigh-resolution fiber-optic image guides derived from microstructured polymer optical fiber performs[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2435-2437.
- [15] Ung B, Mazhorova A, Dupuis A, et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding [J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B848-B861.
- [16] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 4th ed. Singapore: Academic Press, 2007.