

环烯烃共聚物多孔太赫兹纤维的设计与特性模拟

马 天,孔德鹏,姬江军,王光珍,王丽莉

(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: 太赫兹纤维波导是太赫兹系统中重要的组成元件。为了实现太赫兹辐射的低损耗低色散传输,设计了一种以环烯烃共聚物为基质的多孔太赫兹纤维,并利用基于全矢量有限元法的商业软件 COMSOL 分析了该多孔太赫兹纤维的传输特性,着重考察了亚波长多孔纤芯的结构参数对传输特性的影响。结果表明,这种太赫兹纤维可以将模场能量很好地限制在亚波长多孔纤芯中传输,具有较小的有效模场面积、低的传输损耗和平坦近零色散等优良的传输特性;同时,通过增大多孔纤芯的占空比,可以将更多的模场能量限制在亚波长直径的空气孔洞中传输,并减小太赫兹纤维的有效模场面积和有效模式损耗,但同时会增大限制损耗和色散。

关键词: 多孔亚波长太赫兹纤维; 环烯烃共聚物; 全矢量有限元法; 传输特性

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0631-06

Design and characteristics of cycloolefin copolymer porous terahertz fiber

Ma Tian, Kong Depeng, Ji Jiangjun, Wang Guangzhen, Wang Lili

(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: Terahertz fiber is one of the essential components in the terahertz system. In order to realize minimum low loss and dispersion of terahertz transmission, a novel hollow terahertz fiber was designed and optimized, which was based on Topas COC. Using the commercial software COMSOL based on the full-vector finite element method, the transmitting characters of this hollow terahertz fiber were calculated and the effects of the structural parameters on transmitting THz wave in the porous fiber core were analyzed. The research shows that adopting designed porous structure can confine the mode energy in porous core, and obtain small mode area, low propagation loss and nearly zero ultra-flattened dispersion. Increasing rate of the hole diameter to the hole spacing, the more mode energy can be confined in the porous fiber core, and the effective mode area and effective mode loss were reduced, but the confine loss and dispersion would be enlarged simultaneously.

Key words: porous sub-wavelength terahertz fiber; cycloolefin copolymer; full-vector finite-element method; propagation characters

收稿日期:2012-07-05; 修订日期:2012-08-13

基金项目:国家自然科学基金(61275106、61108061)

作者简介:马天(1989-),男,博士生,主要从事太赫兹波导器件方面的研究。Email:matian@opt.cn

导师简介:王丽莉(1957-),女,研究员,博士,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

0 引言

太赫兹波在新一代宽带通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、无损检测、安全检查、化学与生物学等领域的巨大应用潜力,使之成为继光纤技术之后的又一科技革命的推动力^[1-3]。在目前的太赫兹系统中,太赫兹波主要是在自由空间传输,导致系统体积庞大,使用不便。因此,开展柔性太赫兹波导技术研究有着非常重要的意义。到目前为止,人们研究了太赫兹金属波导、聚合物纤维、塑料带状波导和蓝宝石纤维等不同类型的太赫兹波导器件^[4]。但是如何降低传输损耗和色散,仍是太赫兹波导理论研究的关键问题之一^[5-6]。

微结构光导纤维,又被称为光子晶体光纤或多孔光纤,是由单一介质构成,由其包层中的小空气孔阵列(2 维光子晶体)形成的禁带,将模场能量限制在纤芯的空气大孔,或是实芯中(2 维光子晶体缺陷)。这种微结构实心光纤具有无限单模传输、极大有效模场面积、高模式双折射以及超宽带平坦色散等^[7]。而空心的光子晶体光纤则具备超低损耗、模场直径可调等优良特性,这是传统结构的光导纤维无法比拟的。

环烯烃共聚物(Topas COC)是一种新型的光学聚合物材料,与现有的光学聚合物材料,如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)和聚苯乙烯(PS)等相比^[8],具有低密度、高折射率、高透过率、大的阿贝数、低双折射、极低的吸水率(仅为 PMMA、PC 的 1/10)以及耐热性好、热膨胀系数低、化学性能稳定、机械性能优良等诸多优点。笔者所在的课题组已经设计了多种以 Topas COC 为基质的微结构光纤^[9-10]。

最近已经有研究证明 Topas COC 在太赫兹波段比最常用的高密度聚乙烯具有更低的损耗^[8],因此,设计了一种基质材料为 Topas COC 的多孔太赫兹纤维。其纤芯中引入亚波长直径的空气孔,包层由大直径的空气孔组成。对于这种太赫兹纤维,通过调节纤芯中空气孔的结构参数,可以将模场限制在芯中的空气空洞中,减少太赫兹纤维材料吸收对太赫兹能量传输的影响。这种多孔聚合物太赫兹纤维不仅结构简单,易于制备,并且其损耗与色散均很小,有望在未来的太赫兹波导器件中发挥作用。

1 基本理论

1.1 太赫兹纤维结构的设计

文中所设计的新型多孔太赫兹纤维的端面结构如图 1 所示。在 Topas 基质上,包含了 2 个不同的多孔区:第一多孔区由 12 个均匀排列的大直径空气孔构成,空气孔直径为 D ,这些大孔作为低折射率的包层,可以将模场能量限制在多空纤芯中传输,同时还可以起着隔离外部干扰的作用;第二孔区在第一孔区的内部,该孔区包含了 61 个亚波长尺寸的空气孔,这些亚波长尺寸空气孔呈三角形排列,分作四层,孔直径为 d ,孔间距为 Λ ,多孔纤芯直径 D_{core} 。太赫兹辐射的模场能量主要是被限制在多孔纤芯中的亚波长空气孔中传输。

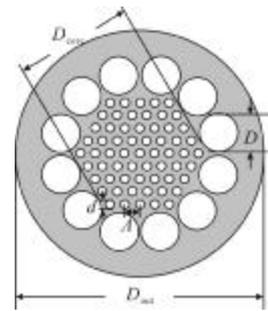


图 1 太赫兹纤维端面结构示意图

Fig.1 Cross-section of designed terahertz hollow fiber

1.2 全矢量有限元法

有限元法^[11]是一种非常有效的求解数值边值问题的数学计算方法,可对太赫兹纤维中的模场分布和传输特性进行非常精确的计算^[12]。相对于其他数值方法,有限元法的优点是可以精确地分析任意结构和任意空气孔排列的传输特性,使之成为分析微结构纤维的有效理论方法。有限元法首先是将计算域划分为有限个互不重叠的单元,将由 Maxwell 方程组得到的本征方程运用于每个单元,借助于变分原理或加权余量法,将本征方程离散求解,解出每个单元的近似解得到整个求解域的解,从而得到光场的分布和传输特性。

2 数值模拟结果与分析

文中所设计的太赫兹纤维,其纤芯孔洞直径 $d=$

60 μm, 孔间距 $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 。包层为 12 个直径 $D=240 \mu\text{m}$ 的空气孔, 分布在直径为 1.05 mm 的圆周上。根据基于全矢量有限元法的商用软件 COMSOL, 对这种结构太赫兹纤维的传输特性进行了理论模拟, 并分析了改变纤芯空气孔直径对该太赫兹纤维的模场分布、有效折射率(n_{eff})、有效模场面积及损耗和色散特性的影响。

2.1 传输特性

2.1.1 模场分布和有效折射率

图 2 给出了改变传输频率和结构参数对该太赫兹纤维模场分布的影响。由此图可知, 当固定结构参数不变时, 随着传输频率 ν 的增大, 该太赫兹纤维的限制损耗减小, 对太赫兹波的限制能力增大, 太赫兹模场能量向纤芯中集中; 但与此同时, 随着频率的增大, 太赫兹波的波长随之减小, 亚波长尺寸的纤芯孔洞对太赫兹波模场能量的限制减弱, 在基质上传输的模场能量比例增大。当增大纤芯孔洞直径时(此时纤芯孔洞直径 d 依次为 $50 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $70 \mu\text{m}$), 对于同一频率($\nu=0.5 \text{ THz}$), 模场分布有着与改变传输频率时类似但不明显的变化趋势, 即: 增大孔洞直径会将更多模场能量限制到纤芯中传输, 但亚波长尺寸的纤芯孔洞对模场能量的束缚能力也会减弱。基模有效折射率的变化情况如图 3 所示。这里, 将 Topas COC 的折射率视为常数 $n_{\text{coc}}=1.5258$, $\Lambda=100 \mu\text{m}$ 。由图可知, 该太赫兹纤维的基模有效折射率小于材料折射率 n_{coc} , 随频率的增大而增大, 而随着 d/Λ 的增大而减小。

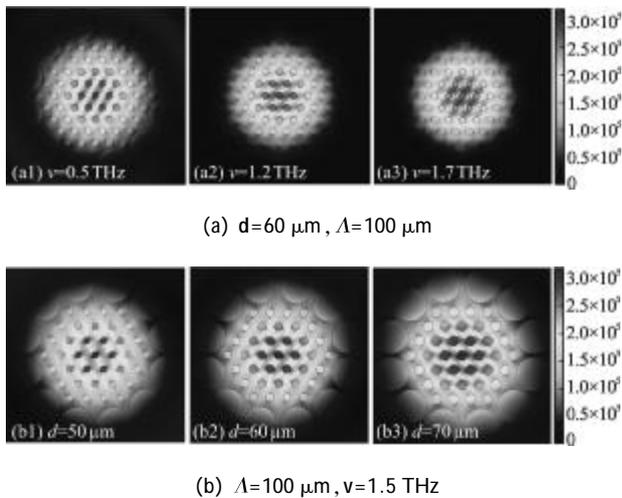


图 2 模场分布随结构参数和传输频率的变化情况

Fig.2 Model distributions of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

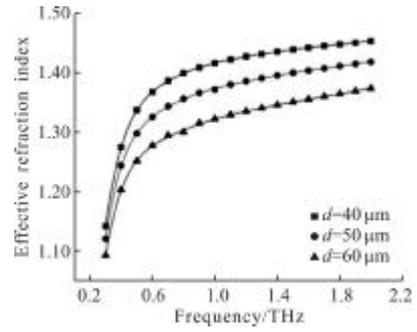


图 3 基模有效折射率随传输频率和结构参数的变化

Fig.3 Effective refractive index of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

对于传统的光纤, 必须通过设计复杂的折射率分布才能调节基模模场面积的大小。而对于多孔纤维, 仅仅需要在设计过程中选择不同的孔洞直径 d 和孔间距 Λ , 就可以得到或大或小的基模模场面积。基模有效模场面积 A_{eff} 可以通过计算基模模场强度在太赫兹纤维横截面内的分布 $E(x, y)$ 得出^[13]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}$$

式中: A_{eff} 随传输频率的变化如图 4 所示。由图可以看出, 在低频波段($\nu \leq 0.5 \text{ THz}$ 时), 随着传输频率 ν 的增大, 基模有效模场面积逐步减小; 相反, 在高频波段($\nu \geq 0.5 \text{ THz}$ 时), 随着传输频率 ν 的增大, 基模有效模场面积逐步增大。同时, 对于同一传输频率的太赫兹辐射, 当太赫兹纤维直径增大时, 其基模有效模场面积大致呈递增的趋势。

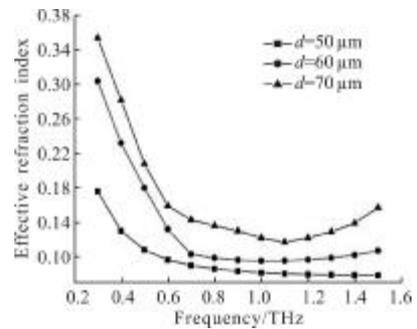


图 4 有效模场面积随传输频率和结构参数的变化($\Lambda=100 \mu\text{m}$)

Fig.4 Effective mode area of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

2.2 损耗特性

多孔太赫兹纤维的损耗主要有有效模式损耗

α_{mod} 和限制损耗 CL 两部分组成。其中,有效模式损耗 α_{mod} 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。

2.2.1 有效模式损耗

由材料吸收引起的有效模式损耗 α_{mod} 可由下式给出^[14]:

$$\alpha_{\text{mod}} = \frac{(\epsilon_0/\mu_0)^2 n_{\text{mat}} \int_{\text{Topas}} |E|^2 dA}{2 \int_{\text{all}} S_z dA}$$

式中: n 为材料折射率; a_{mat} 为基质材料的吸收损耗系数。由于在太赫兹波段,干燥空气的材料吸收损耗系数为零,在计算有效模式损耗时,可以仅考虑 Topas COC 基质对损耗的影响。Topas COC 在太赫兹波段的材料吸收损耗系数 a_{mat} 与传输频率有关,在 0.2~1.6 THz 波段内随频率的增加近似线性增加,从 0.4 THz 处的 0.06 cm^{-1} 开始以 $0.36 \text{ cm}^{-1}/\text{THz}$ 的比率增大^[15]。

图 5 给出了不同结构太赫兹纤维的有效模式损耗随传输频率的变化情况。可以看出,当结构参数不变时,有效模式损耗随频率的增大而增大;当传输频率保持不变时,有效模式损耗随着空气孔洞直径的增大而减小。这是由于传输频率增大时,空气孔对太赫兹模场能量的限制能力降低,在 Topas COC 基质上传输的模场能量增多,材料吸收所导致的有效模式损耗增大;同时,空气孔直径越大,即太赫兹纤维的空气填充率越大,在 Topas 基质上传输的模场能量就越多,有效模式损耗也就越小。

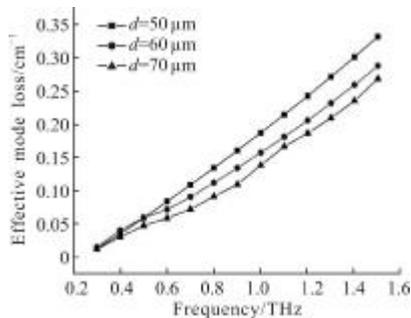


图 5 有效模式损耗 α_{mod} 随传输频率和结构参数的变化

Fig.5 Effective mode loss of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

2.2.2 限制损耗

限制损耗 CL 是由于传输模式的泄露造成的,与

基模有效折射率的虚部有关,可以通过下式得出^[16]:

$$\text{CL} = 0.02 * \frac{2\pi V}{c} \text{Im}(n_{\text{eff}})$$

其单位为 cm^{-1} , $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示基模有效折射率的虚部。

图 6 给出了限制损耗随传输频率和太赫兹波导结构参数的变化情况,图中黑色实线表述基体材料的吸收损耗。由图可以看出,限制损耗随着传输频率的增大而减小。在低频波段,限制损耗远大于同样情况下的材料吸收损耗,这表明此时限制损耗为该太赫兹波段的主导损耗机理。随着传输频率的增大,限制损耗急剧减小,当传输大于 1 THz 时,限制损耗已小于 0.01 cm^{-1} , 小于同样情况下的基质材料吸收损耗,即此时该太赫兹波导的主要损耗为材料吸收损耗。当多孔纤芯中的空气孔直径增大时,限制损耗随之增大,即对模场的限制能力下降,更少的模场能量被限制在纤芯中传输。

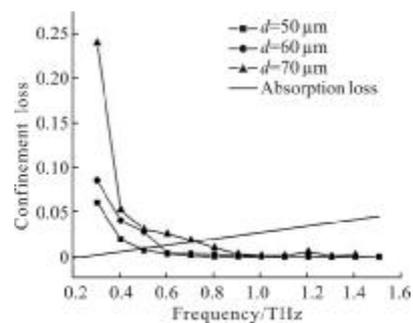


图 6 限制损耗随传输频率和结构参数的变化情况

Fig.6 Confinement loss of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

2.3 色散特性

目前,太赫兹系统中所使用的太赫兹发射源多为宽带皮秒脉冲源。除损耗之外,另一个严重影响系统性能的机制就是色散:在传输过程中,色散会使信号频谱展宽,从而使信号劣化。为了有效地传输太赫兹脉冲信号,就需要太赫兹波导在整个频谱范围内具有低群速度色散。对于传统的光波导结构,可以通过色散补偿等技术抵消色散的影响,恢复脉冲的原始形状。但是,可用于太赫兹波段的色散补偿技术还未被研究,因此研究太赫兹波导的色散特性,并设计低色散的太赫兹波导结构,对于太赫兹技术研究就显得尤为重要。

在太赫兹波段,色散常数 D 可以表示为^[17]:

$$D(\nu) = \frac{1}{2\pi c} \left(2 \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \nu} + \nu \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \nu^2} \right)$$

其单位为 ps/(THz·cm⁻¹)。色散参数 D 随频率和结构参数的变化关系如图 7 所示。由图可见,这种结构在太赫兹纤维 0.5~1.5 THz 波段可以获得很好的平坦化近零色散,并且随着空气孔直径的减小,其色散具有更好的平坦化特性。这种平坦化近零色散特性主要是由 Topas COC 极低的材料色散和多层气孔结构增加了太赫兹波导的色散调节范围造成的。同时,零色散点随着空气孔直径的增加向低频方向移动。

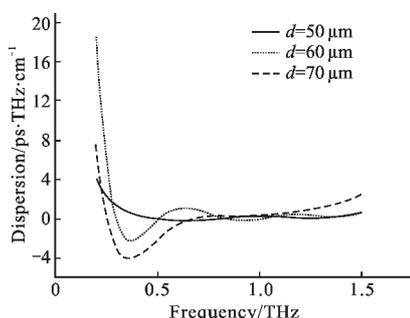


图 7 色散随频率和结构参数的变化情况

Fig.7 Dispersion of the designed terahertz fiber versus THz frequency and structural parameters

3 结论

文中设计了一种可实现太赫兹传输的新型塑料多孔纤维,其中包含了两种不同尺寸的空气孔:纤芯中的亚波长空气孔可以将模场能量限制在空气中传输,从而减小太赫兹波的传输损耗。纤芯周围的大直径空气孔层作为低折射率的包层,将模场限制在多孔纤芯中;大孔外层的塑料基质则起着支撑多孔包层和隔离外部扰动对太赫兹传输干扰的作用。

理论模拟研究表明,文中设计的新型环烯烃共聚物多孔结构的太赫兹纤维,不仅有很小的材料吸收损耗和限制损耗,并且具有很好的平坦化近零色散特性。通过调整结构参数,改变其多孔纤芯的占空比,可以改变这种太赫兹纤维的传输特性:增大多孔纤芯的占空比,可以减小材料吸收带来的有效模式损耗,优化其色散的平坦化特性,但与此同时,限制损耗会随之增大,制备时的难度也会增大。因此在制备过程中,就需要根据实际要求(非线性特性、损耗特性或色散特性)和制备条件,依据文中所模拟的结果,选取最合适的结构参数。

参考文献:

- [1] Mu Kaijun, Zhang Zhenwei, Zhang Cunlin. Terahertz science and technology [J]. Journal of CAE, 2009(3): 231-237. (in Chinese)
- [2] Shen Jin'e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 342-347. (in Chinese)
- [3] Lu Yimin, Wang Jiachun, Lin Zhidan. Continuous THz transmission imaging experiment of 337 μm laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 236-240. (in Chinese)
- [4] Huang Wanwen, Li Baojun. Progress on terahertz waveguide devices [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(7): 9-15. (in Chinese)
- [5] Jamison S P, McGowan R W, Grischkowsky D. Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fiber [J]. Applied Physics Letters, 2000, 15: 1987-1989;
- [6] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, Terahertz wave guides [J]. J Opt Soc Am B, 2000(5): 851-863;
- [7] Mogilevtssev D, Birks T A, Russell P St J. Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers[J]. Opt Lett, 1998, 23(21): 1662-1664.
- [8] Bora Urg, Anna Mazhorova, Alex Dupuis, et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding [J]. Optics Express, 2011, 26: 848-861;
- [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] Wang Doudou, Wang Lili, Li Dongdong. Design and analysis of thermally tunable liquid-crystal-filled microstructured polymer optical fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 128101. (in Chinese)
- [11] Ma Lingfang, Liu Min, Dong Chuanpei, et al. Dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (7): 1831-1835. (in Chinese)
- [12] Brechet F, Marcou J, Pagnoux D, et al. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal Fibers, by the finite element method [J]. Optical Fiber Technology, 2000, (6): 181-191;
- [13] Wang Z, Ren G B, Lou S Q, et al. Supercell lattice method for photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2003, 11 (9): 980-991.

- [14] Ung B, Mazhorova A, Dupuis A, et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding [J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B848-B861.
- [15] Nielsen K, Rasmussen H K, Jepsen P U. Broadband terahertz fiber directional coupler[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(17): 2879-2881.
- [16] Saitoh K, Koshiba M. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt Express*, 2003, 11: 3100-3109.
- [17] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2007.

下期预览

红外宽频吸收硅基复合气凝胶的制备及表征

韩朝江¹, 马拥军^{1,2}, 裴重华¹, 曾敏¹

(1. 西南科技大学 四川省非金属复合与功能材料重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 分析测试中心, 四川 绵阳 621010)

摘要:以正硅酸乙酯为硅源,采用酸碱两步催化法经过溶胶-凝胶和冷冻干燥制备出 SiO₂ 气凝胶基材,并在凝胶老化过程中添加三乙胺盐酸盐得到兼具中远红外吸收特性的硅基复合气凝胶。利用 X 射线衍射、扫描电子显微镜、氮吸附-脱附和傅里叶红外吸收光谱对气凝胶的结构和性能进行了表征。结果表明:胺盐在硅气凝胶网络结构中穿插结晶;基材的比表面积、最大孔容和平均孔径分别为 524.5 m²/g、1.2 cm³/g 和 9.2 nm,复合材料的比表面积、最大孔容和平均孔径分别为 37.93~138.7 m²/g、0.08~0.28 cm³/g 和 7.1~8.8 nm;基材和复合气凝胶的表观密度分别为 0.25 g/cm³ 和 0.35~0.51 g/cm³;复合气凝胶在中远红外窗口具有宽频吸收的特性,且随着三乙胺盐酸盐含量的增加,中红外相对吸收强度成比例增强。