

doi: 10.3788/gzxb20144306.0606002

低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤

王豆豆¹, 王丽莉², 张涛¹, 解忧¹

(1 西安科技大学 理学院, 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, 西安 710119)

摘 要:以太赫兹低损耗聚合物材料 Topas 环烯烃共聚物为基材,设计了一种带隙型光子晶体光纤. 光纤由三角形排列的圆角正六边形空气孔构成包层,缺失四个近邻空气孔构成近菱形的二重对称空气芯. 采用有限元法分析了该光纤在太赫兹波段的传输特性. 结果表明:在 1.5 THz 附近约 0.3 THz 的宽频范围内存在光子带隙,光纤可以基于光子带隙效应将太赫兹波束缚在空气芯中传输. 在 1.4~1.6 THz 范围内具有 10^{-3} 数量级的高双折射; x 偏振基模和 y 偏振基模的损耗都小于 0.1 cm^{-1} ,分别在 1.53 THz 和 1.5 THz 处达到最小值 0.0291 cm^{-1} 和 0.0287 cm^{-1} . 所设计的太赫兹 Topas 光子带隙光纤具备结构简单、易制备、直径小而易弯曲的特点.

关键词:太赫兹;光子晶体光纤;有限元方法;Topas 环烯烃共聚物;光子带隙;损耗;双折射

中图分类号:O451

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)06-0606002-5

Low Loss and High Birefringence Topas Photonic Bandgap Fiber at Terahertz Frequency

WANG Dou-dou¹, WANG Li-li², ZHANG Tao¹, XIE You¹

(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 photonic bandgap fiber was designed based on the novel Terahertz low-loss material Topas cyclic olefin copolymer. Fiber cladding was formed by arranging hexagonal air holes with rounded corners in triangular lattice pattern in the background of Topas. A rhombic hollow-core with rounded corners was formed by omitting four central air holes of the cladding structure. Propagation properties in the terahertz band of the fiber were investigated by using the finite element method. Numerical results indicate the fiber has a photonic bandgap within a broadband area about 0.3 THz around 1.5 THz, and THz wave is well confined in the air core. Birefringence of the order of 10^{-3} was obtained. Loss of the x - and y -polarized fundamental modes is less than 0.1 cm^{-1} within 1.4~1.6 THz, and reaches the minimum value of 0.0291 cm^{-1} and 0.0287 cm^{-1} at 1.53 THz and 1.5 THz, respectively. Structure of designed terahertz Topas photonic bandgap fiber is simple, feasible for fabrication and bendable because of the relatively small diameter.

Key words: Terahertz; Photonic crystal fiber; Finite element method; Topas cyclic olefin copolymer; Photonic bandgap; Loss; Birefringence

OCIS Codes: 060.5295; 160.5293; 300.6495; 070.7345

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61275106, 61201088)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(No. 2014JQ8335)、陕西省教育厅科研计划资助项目(No. 2013JK1106)、西安科技大学博士启动金(No. 2012QDJ043)和西安科技大学培育基金(No. 201236)资助
第一作者:王豆豆(1982-),女,讲师,博士,主要研究方向为微结构光纤的设计和传输特性模拟. Email: wangdoudou@xust.edu.cn
收稿日期:2013-10-21;录用日期:2013-12-18

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. THz 科技在材料表征、宽带通信、大气与环境监测、国家安全与反恐等多个领域具有独特优越性和广阔应用前景^[1-3]. 在过去的十几年中, THz 相干辐射源和探测技术都取得了重大突破^[4-6].

目前多数的 THz 系统都是在自由空间中传输和处理 THz 波. 这些系统受环境影响大、性能稳定性差、使用成本高, 严重限制了其应用和推广. 因此, 有人提出了 THz 系统“柔性化”的解决方案, 即研发出像基于光导纤维的光纤通信系统或光纤传感器那样的柔性、多功能、低能耗、易操作、易维护、易携带的 THz 系统. THz 系统柔性化的关键是 THz 波导技术. 已经报道的 THz 波导包括: 金属线、金属涂覆的介质管、Bragg 光纤以及亚波长聚合物纤维等等^[7]. 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 THz 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 THz 纤维波导技术成为了一个研究热点. 聚合物除了价格低、种类多、加工温度低等众所周知的优点外, 在 THz 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 Cyclic Olefin Copolymer, Topas COC) 具有无定形结构, 在 THz 波段的材料吸收损耗相对较低 (在 0.1 ~ 3 THz 范围内的吸收系数 $< 1 \text{ cm}^{-1}$)^[8]. 比之前认为的 THz 低损耗聚合物材料如聚四氟乙烯 (Teflon)、高密度聚乙烯 (HDPE) 的损耗还要低一个数量级, 而比聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 更是低两个数量级. 此外, Topas COC 在 THz 波段还同时具备低材料色散的特性^[9], 其折射率在 0.1 ~ 1.5 THz 范围内近似为常量: $n = 1.5258 \pm 2 \times 10^{-4}$. 低损耗、低色散, 结合其极低的吸水率 (约为 PMMA 的 1/10) 和优良的机械性能^[10], 使 Topas COC 成为制备 THz 波导的最佳材料.

本文以新型聚合物材料 Topas COC 为基质材料, 设计了一种在 THz 波段具有低损耗、高双折射特性的空芯带隙型光子晶体光纤. 应用有限元方法研究了该光纤在 THz 波段的传输特性. 结果表明: 所设计的光纤可以基于光子带隙效应将 THz 波束缚在空气芯中传输; 不仅从材料和结构两方面保证了 THz 波的低损耗传输, 同时又引入了几何高双折射.

1 光纤结构设计

尽管 Topas COC 在 THz 波段具有较低的材料吸

收, 波导结构的设计仍然是实现低损耗传输 THz 波必不可少的环节. 大量研究证明: THz 波在干燥的空气中几乎可以无损耗传输. 因此, 增加 THz 波在空气中的传输比例可以显著降低传输损耗.

为了实现这一目的, 本文设计了如图 1(a) 所示的三角形晶格、近菱形空气芯的 Topas 带隙型光子晶体光纤. 包层由三角形晶格排列的圆角正六边形空气孔构成, 该结构更接近真实光纤, 具有较高的空气填充率, 可以有效降低限制损耗. 去掉四个近邻的包层空气孔构成近菱形空气纤芯, 通过破坏纤芯的六重对称性打破两个偏振基模的简并, 引入了几何高双折射, 同时保持了包层的完整周期性和六重对称性. 这对于带隙型微结构光纤可以获得最大程度的带宽.

光纤结构参量如图 1(b) 所示, 其中 Λ 表示晶格常量, D 表示圆角正六边形空气孔一组对边间的距离 (对应于圆形空气孔时的孔直径), d_c 表示圆角曲率直径. 最靠近纤芯的一圈空气孔部分发生变形成为圆角五边形. 纤芯周围有一圈厚度为 t_r 的介质环, 用 $T = t_r / (\Lambda - D)$ 表示该介质环的相对厚度.

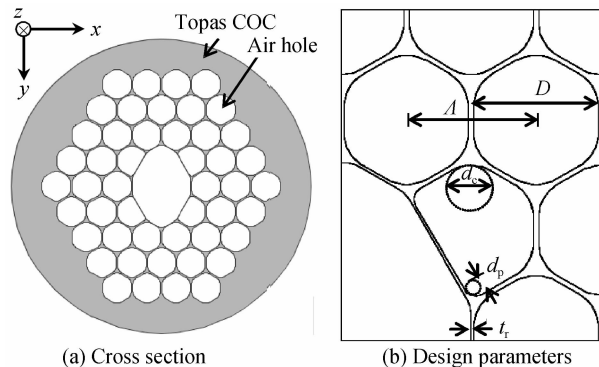


图 1 近菱形空气芯的 Topas 光子带隙光纤横截面及结构设计参量

Fig. 1 Cross section and design parameters of the Topas photonic bandgap fiber with a rhombic hollow-core

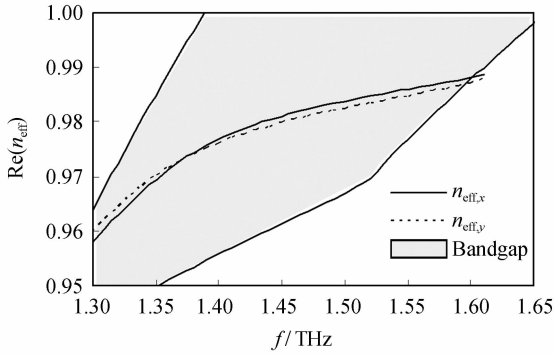
2 传输特性分析

采用全矢量有限元法^[11]研究了图 1 所示的 Topas 光子带隙光纤在 THz 波段的传输特性. 主要对光纤的带隙结构、模场特性、双折射特性、损耗特性和色散特性等进行了研究. 计算过程中采用的结构参量为: $\Lambda = 400 \mu\text{m}$, $D/\Lambda = 0.96$, $d_c/\Lambda = 0.6$, $d_p/\Lambda = 0.3$, $T = 0.5$.

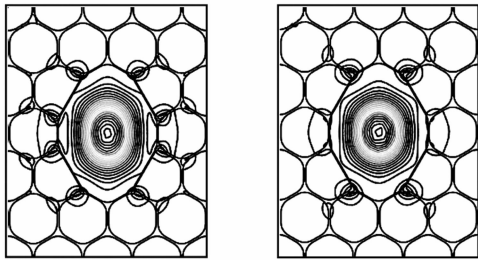
2.1 带隙结构及模场特性

所设计光纤的光子带隙结构、带隙范围内的 x 偏振基模和 y 偏振基模的色散曲线以及模场分布如图 2. 图 2(a) 中横坐标表示所传输的 THz 波频率, 纵坐标表示基模有效折射率的实部. 从图 2 可以看出, 在 1.5 THz 附近约 0.3 THz 的宽频范围内存在着光子带隙. 带隙范围内两个偏振基模具有明显的双折射现象, 且色散曲线都是连续的, 说明不存在表面模^[12], 可以

获得最宽的连续低损耗带宽. 图 2(b)和(c)分别是 1.5 THz时 x 偏振基模和 y 偏振基模的模场分布等高线图. 可以看出两个偏振基模大部分的能量都可以束缚在空气芯中,但是仍有一部分的能量扩散到了包层中. 这是由于有限的包层空气孔圈数(本文所设计的结构为 3 圈)导致了基模能量的泄露. 其中 x 偏振基模的泄露更为明显.



(a) Photonic bandgap and dispersion curves of the fundamental modes



(b) Power flow of x -polarized fundamental mode (c) Power flow of y -polarized fundamental mode

图 2 带隙及基模色散曲线和 1.5 THz 时 x 偏振基模和 y 偏振基模的模场分布等高线图

Fig. 2 Photonic bandgap, dispersion curves and power flow of the x - and y -polarized fundamental modes at 1.5 THz, respectively

为了研究带隙范围内基模能量的分布情况以及包层带隙对基模的束缚能力,计算了位于空气芯中的能量分数. 能量分数定义为^[13]

$$\eta_{\text{core}} = \frac{\int_{\text{core}} S_z dA}{\int_{\text{all}} S_z dA} \quad (1)$$

式中 S_z 为波印廷矢量的 z 分量,“core”和“all”分别表示积分范围为光纤的空气芯和整个横截面. 能量分数随频率的变化关系如图 3 所示. 可以看出,在 1.4~1.6 THz 范围内,两个偏振基模 80% 以上的能量位于空气芯中. 同时,纤芯能量分数随着传输频率向带隙边缘靠近而减小. 这是由于在带隙边缘附近,包层无法将基模很好地束缚在纤芯区域,有一部分能量扩散到了包层中,在低频区域更加显著. 因此,由纤芯能量分数随频率的变换关系也可以定性地去判断包层带隙的位置和光纤的传输谱.

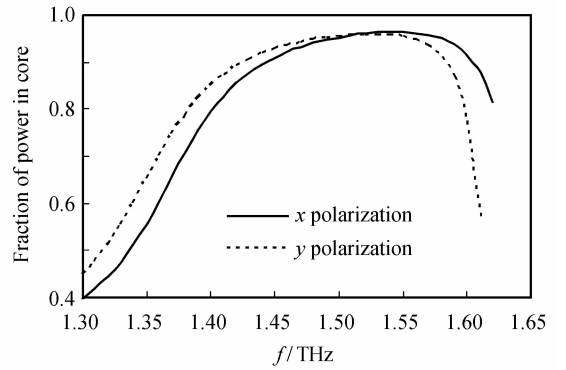


图 3 空气芯中的能量分数随频率的变化曲线

Fig. 3 Fraction of power localized in the core as a function of frequency

2.2 双折射特性

描述高双折射光子晶体光纤的两个重要参量就是相位双折射系数 B_{ph} 和群双折射系数 B_{g} . 相位双折射定义为两个偏振基模间的有效折射率差,即

$$B_{\text{ph}} = \text{Re}(n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y) \quad (2)$$

式中 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 偏振基模和 y 偏振基模的有效折射率.

尽管在理论方面的研究中提到的双折射既可以是相位双折射也可以是群双折射,但是大部分实验中测得的都是群双折射系数. 为了方便与实验结果进行比较,通过式(3)可以由相位双折射随波长(频率)的变化关系获得群双折射^[14],即

$$B_{\text{g}} = B_{\text{ph}} - \lambda \frac{dB_{\text{ph}}}{d\lambda} \quad (3)$$

光纤带隙范围内的相位双折射和群双折射随频率的变化关系如图 4. 可以看出,在带隙的低频部分 ($f < 1.34$ THz) 和 高频部分 ($f > 1.41$ THz) 具有 10^{-3} 数量级的高相位双折射. 在 1.3~1.45 THz 的频率范围内具有 10^{-2} 数量级的高群双折射.

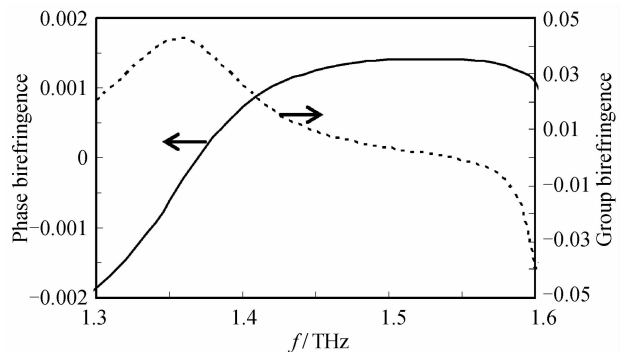


图 4 相位双折射和群双折射随频率的变化曲线

Fig. 4 Phase birefringence and group birefringence as a function of frequency

在 1.3~1.37 THz 范围内, y 偏振基模具有较大的有效折射率,按照式(2)的定义,相位双折射为负值. 在 1.37 THz 附近相位双折射趋于零,符号发生反转,

即发生了快慢轴的交换. 在 1.37~1.6 THz 范围内, x 偏振基模具有较大的有效折射率, 相位双折射为正值. 这可以归因于两个方面: 包层在 x 和 y 方向上的折射率周期性分布不同导致其对两个偏振基模的束缚程度不同; 在低频和高频处的光子频带中, 能量在包层中传输时分布方式不同^[15], 因此在带隙的低频和高频边缘处, 基模向包层的扩散方式不同.

2.3 损耗特性

对于带隙范围内导模的损耗主要包括: 基底材料吸收引起的模式吸收损耗和有限的包层空气孔圈数导致的模式泄露而带来的限制损耗. 模式吸收损耗 α_{mod} 与材料体吸收系数 α_{mat} 、材料折射率 n 以及模场分布有关, 可以表示为^[16]

$$\alpha_{\text{mod}} = \frac{(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} n \alpha_{\text{mat}} \int_{\text{Topas}} |E|^2 dA}{2 \int_{\text{all}} S_z dA} \quad (4)$$

式中 E 为电场强度, S_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量和磁导率. “Topas”和“all”分别表示积分范围为光纤的基底材料和整个横截面. K. Nielsen 等人的实验结果表明^[9], Topas COC 的材料体吸收系数在 0.2~1.6 THz 范围内随频率的增加近似线性增加. 采用式(4)计算模式吸收损耗时, 体吸收系数 α_{mat} 的取值从 0.4 THz 处的 0.06 cm^{-1} 以 $0.36 \text{ cm}^{-1}/\text{THz}$ 的比率线性增加^[17]. 背景材料的折射率 n 取 1.5258.

限制损耗 CL 可以由基模有效折射率的虚部求出^[11], 即

$$\text{CL} = 8.686 \frac{2\pi f}{c} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (5)$$

单位为 dB/m, 其中 Im 表示取复数折射率的虚部.

模式吸收损耗随频率的变化关系如图 5(a)所示, 可以看出在带隙范围内(1.3~1.6 THz)两个偏振基模的模式吸收损耗都小于 0.1 cm^{-1} . 在低频区域模式吸收损耗相对较大, 这是由于基模能量向包层介质扩散导致的, 该结论与纤芯能量分数随频率的变换关系得出的结论相一致. 限制损耗随频率的变化关系如图 5(b)所示, 在带隙的中心频率附近, 限制损耗最小, 随着传输频率向带隙边缘靠近, 限制损耗迅速增加. 在 1.4~1.6 THz 范围内, 两个偏振基模的限制损耗都小于 0.1 cm^{-1} .

图 5(c)给出了两个偏振基模的总损耗随频率的变化关系. 比较图 5(a)、(b)和(c)可以发现, 在低频区域限制损耗占主导地位; 在 1.4~1.6 THz 范围内, 限制损耗与模式吸收损耗具有相同的数量级, 总损耗小于 0.1 cm^{-1} . x 偏振基模的总损耗在 1.53 THz 处达到最小值 0.0291 cm^{-1} , y 偏振基模的总损耗在 1.5 THz 处达到最小值 0.0287 cm^{-1} . 研究表明, 管通过增加包层空气孔的圈数可以显著减小低频区域的限制损耗,

增加低损耗带宽, 但是对带隙中心附近的限制损耗和模式吸收损耗没有明显改善. 较多的包层空气孔的圈数(如 5 圈以上)会增加光纤的制备难度, 同时导致光纤直径太大, 缺乏柔性和不易弯曲. 本文设计的光纤包层中只有三圈空气孔, 其直径可以控制在 4 mm 以内. 因此在设计光纤结构时应该根据具体要求合理选择光纤包层空气孔的圈数.

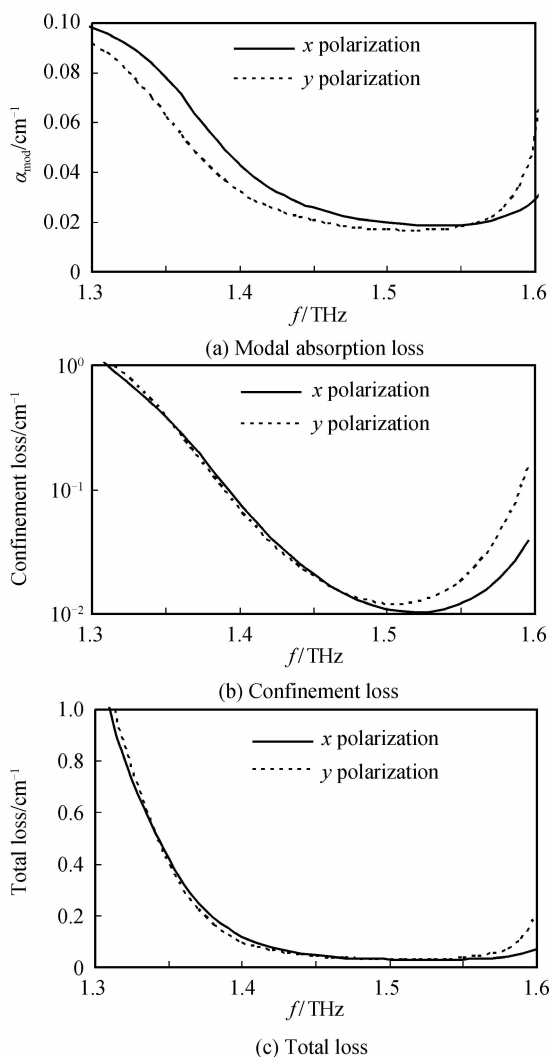


图 5 3 种损耗随频率的变化曲线

Fig. 5 Three kinds of losses as a function of frequency

2.4 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. 为了有效地传输这样的脉冲, 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. 在太赫兹波段, 色散参量 β_2 可以由模式有效折射率随频率的变化关系求出^[9], 即

$$\beta_2 = \frac{1}{2\pi c} \left(2 \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial f} + f \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial f^2} \right) \quad (6)$$

单位为 $\text{ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

图 6 给出了光纤两个偏振基模的色散参量随频率

的变化关系.在带隙中心 1.5 THz 附近,色散曲线较为平坦. x 、 y 偏振基模分别在 1.42~1.6 THz 和 1.4~1.58 THz 范围内具有 $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的低色散值,零色散频率分别出现在 1.56 THz 和 1.54 THz 附近.

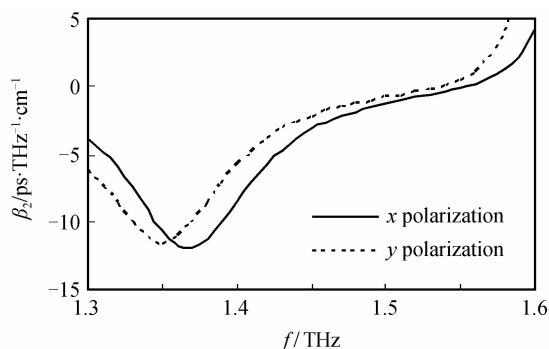


图 6 基模色散参量随频率的变化关系

Fig. 6 Dispersion parameter as a function of frequency

3 结论

本文以新型 THz 低损耗聚合物材料 Topas COC 为基质,设计了一种近菱形空气芯的带隙型光子晶体光纤.采用全矢量有限元方法对该光纤在 THz 波段的带隙结构、模场特性、双折射特性、损耗特性和色散特性进行了理论研究.研究结论表明:该光纤在 1.5 THz 附近约 0.3 THz 的宽频范围内存在着光子带隙.在 1.4~1.6 THz 范围内:两个偏振基模 80% 以上的能量位于空气芯中用于传输,具有 10^{-3} 数量级的高双折射、小于 0.1 cm^{-1} 的总损耗值(最低总损耗 $< 0.03 \text{ cm}^{-1}$) 和平坦近零色散特性.所设计的 THz Topas 光子带隙光纤在追求低损耗、低色散、高双折射传输特性的同时,兼顾了结构简单、易于制备,以及直径小、柔软可弯曲的特点,可以采用本课题组独创的挤出-成型法制备.

参考文献

[1] BRADLEY F, ZHANG Xi-cheng. Materials for terahertz science and technology[J]. *Physics*, 2003, **32**(5): 286-293.
Bradley Ferguson, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. 物理, 2003, **32**(5): 286-293.

[2] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.

[3] WANG He, ZHAO Guo-zhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1185-1188.
王鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1185-1188.

[4] KÖHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, *et al.* Terahertz semiconductor heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002, **417**(1): 156-159.

[5] CAI Y, BRENER I, LOPATA J, *et al.* Coherent terahertz radiation detection: Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **73**(4): 444-446.

[6] ZHANG Tong-yi, WANG Yi-shan, FAN Wen-hui, *et al.* Design of an intracavity photoconductive terahertz radiation generator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 219-224.
张同意, 王屹山, 范文慧, 等. 腔内型光电导太赫兹辐射产生器设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(2): 219-224.

[7] ZHONG Ren-bin, ZHOU Jun, LIU Sheng-gang. research development of terahertz waveguides [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, **41**(2): 247-252.
钟任斌, 周俊, 刘盛纲. 太赫兹波导的研究进展[J]. 电子科技大学学报, 2012, **41**(2): 247-252.

[8] JI Jiang-jun, FAN Wen-hui, KONG De-peng, *et al.* Design, fabrication and characteristics of cyclic olefin copolymers lens for terahertz application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(5): 1212-1217.
姬江军, 范文慧, 孔德鹏, 等. 环烯烃共聚物太赫兹透镜的设计、制备及特性分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(5): 1212-1217.

[9] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, ADAM A J L, *et al.* Bendable low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(10): 8592-8601.

[10] KHANARIAN G. Optical properties of cyclic olefin copolymers[J]. *Optics Engineering*, 2001, **40**(6): 1024-1029.

[11] SAITOH K, KOSHIBA M. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(23): 3100-3109.

[12] CORREA R A, BRODERICK N G R, PETROVICH M N, *et al.* Optimizing the usable bandwidth and loss through core design in realistic hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(17): 7974-7985.

[13] HASSANI A, DUPUIS A, SKOROBOGATIY M. Low loss microstructured polymer THz fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(7): 071101-1-071101-3.

[14] ALAM M S, SAITOH K, KOSHIBA M. High group birefringence in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(8): 824-826.

[15] HU J, MENYUK C R. Leakage loss and bandgap analysis in air-core photonic bandgap fiber for nonsilica glasses[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 339-349.

[16] UNG B, MAZHOROVA A, DUPUIS A, *et al.* Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(26): B848-B861.

[17] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, JEPSEN P U, *et al.* Broadband terahertz fiber directional coupler [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(17): 2879-2881.