

doi:10.3788/gzxb20154404.0406006

聚合物太赫兹光纤布喇格光栅

何忠蛟

(浙江工商大学 信息与电子工程学院, 杭州 310018)

摘要: 研究了一种基于聚合物太赫兹光纤的太赫兹光纤布喇格光栅. 通过二氧化碳激光器或紫外激光器点对点加工聚合物太赫兹光纤, 实现聚合物太赫兹光纤直径的周期性调制, 从而实现太赫兹光纤布喇格光栅的周期性折射率调制. 基于有限元方法和光纤布喇格光栅相关理论, 考虑反射峰波长、反射率、带宽、光纤长度、光纤直径和光纤直径形状变化程度等因素, 研究了太赫兹光纤布喇格光栅的特性. 理论模拟表明, 反射峰波长和光栅周期存在与传统光学波段光纤布喇格光栅不同的非线性关系.

关键词: 太赫兹; 光纤布喇格光栅; 有限元方法; 聚合物; 太赫兹光纤; 太赫兹波导; 二氧化碳激光器

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0406006-5

Fiber Bragg Grating Based on a Polymer Terahertz Fiber

HE Zhong-jiao

(College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A novel THz fiber Bragg grating based on a polymer THz fiber filter was proposed and investigated. The periodic index modulation of the THz fiber Bragg grating was introduced by the periodic diameter modulation of the polymer THz fiber by using a carbon dioxide laser or an ultraviolet laser to process the polymer THz fiber point by point. Based on the finite element method and fiber Bragg grating theory, the properties of the proposed THz fiber Bragg grating are well investigated considering the peak wavelength, reflectivity, bandwidth, length of the THz fiber Bragg grating and also the diameter and the degree of diameter deformation of the polymer THz fiber. The simulation results show that nonlinear relationship between the peak wavelength (reflectivity) and the grating pitch of the THz fiber Bragg grating is quite different from the conventional optical fiber Bragg grating.

Key words: Terahertz; Fiber Bragg grating; Finite element method; Polymer; THz fiber; THz waveguide; Carbon dioxide laser

OCIS Codes: 060.3735; 230.7370; 230.1480; 040.2235; 160.5470

0 引言

太赫兹波^[1-3]是电磁波的一部分,在成像^[4-5]、光谱学^[6]、通信^[7]和遥感^[8]等方面应用较多,太赫兹光源、太赫兹波导、太赫兹器件等引起科研人员广泛关注^[9-16].由于太赫兹辐射被大多数物质吸收,低损耗太赫兹波导对太赫兹波应用显得非常重要,特别是对于开发紧凑的和稳定实用的太赫兹系统.由于太赫兹波在干燥空气中传输损耗非常小,已经报道的不少太赫兹波导采用了太赫兹波能量在空气中传输的原理,如低损耗亚波长聚合物光纤^[17]、聚合物微管^[18]、多孔聚

合物太赫兹光纤和微结构聚合物太赫兹光纤^[19-22].因此,聚合物太赫兹光纤是低损耗太赫兹波导重要发展方向之一,文献^[23]提出基于太赫兹光纤的无源太赫兹器件,如太赫兹耦合器^[23].光纤布喇格光栅^[24]在光学光纤滤波器和光学光纤传感器方面具有重要的应用,太赫兹光纤布喇格光栅(THz fiber Bragg grating, T-FBG)在太赫兹滤波和太赫兹传感方面具有重要的应用价值.2012年,香港城市大学的研究小组报道了太赫兹光纤布喇格光栅的实验制作^[25].2013年,加拿大蒙特利尔综合理工学校的研究小组报道了太赫兹光纤布喇格光栅的传感应用^[26].

基金项目:浙江省自然科学基金(No.12F05004)资助

第一作者:何忠蛟(1974-),男,副教授,硕士,主要研究方向为光纤光学. Email:he335577@163.com

收稿日期:2014-10-17;录用日期:2014-12-22

<http://www.photon.ac.cn>

本文研究了基于聚合物太赫兹光纤的太赫兹光纤布喇格光栅,分析了反射峰波长、反射率、带宽等特性,并与传统光学光纤布喇格光栅进行对比,发现了太赫兹光纤布喇格光栅反射峰波长和光栅周期的非线性关系。

1 太赫兹光纤布喇格光栅的结构

目前为止,已有不少低损耗的聚合物太赫兹光纤被提出用于太赫兹波传输.一些聚合物材料,例如聚丙烯,聚乙烯,四氟乙烯,高密度聚乙烯,环烯烃共聚物 TOPAS 等在太赫兹波段具有低吸收的特性^[27-28],是很有前途的太赫兹光纤材料.在太赫兹波段中这些材料的折射率是 1.5 左右.在本文中,为方便分析,聚合物太赫兹光纤的聚合物材料的折射率假设为 1.5.为了更直观地研究太赫兹光纤布喇格光栅的特性,使用由实心聚合物丝和空气组成的太赫兹光纤作为刻写布喇格光栅的基底光纤,其太赫兹传输模式为基模.图 1 显示了在聚合物太赫兹光纤上刻写了长度为 L 的太赫兹光纤布喇格光栅,聚合物太赫兹光纤的直径为 d .

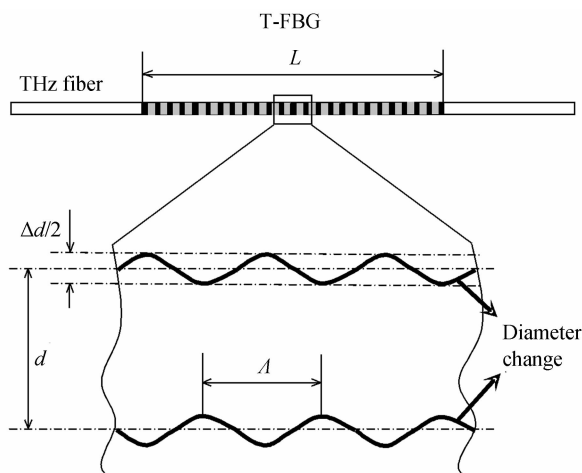


图 1 太赫兹光纤布喇格光栅的结构示意图,放大部分是光纤直径在纵向改变分布

Fig. 1 Schematic configuration of the THz fiber Bragg grating, The enlarged part shows the diameter change along the light propagation direction

在传统光学波段,一般采用紫外干涉光照射光纤,使得有效折射率沿光纤长度被周期性调制,从而实现光纤布喇格光栅的制作.然而,据作者所了解,到目前为止没有报道采用紫外光干涉实现太赫兹波段聚合物太赫兹光纤有效折射率周期性调制的方法.这里,提出一种新方法来实现对聚合物太赫兹光纤有效折射率的周期性调制.太赫兹光纤布喇格光栅的栅距周期为几百微米或几千微米,因此可以采用二氧化碳激光器或紫外激光器点对点加工聚合物太赫兹光纤,使得光纤直径沿着光纤长度方向周期性的改变.具体制作方法如下:将聚合物太赫兹光纤放置在移动准确度 $1\ \mu\text{m}$ 、

移动范围 20 cm 的一维位移平台上;采用输出功率大于 5W 的二氧化碳激光器,用透镜系统使得激光光束聚焦在聚合物太赫兹光纤上,聚焦处聚合物发生部分熔化,从而改变光纤直径;采用计算机控制位移平台及二氧化碳激光输出,以栅距周期移动聚合物太赫兹光纤重复上述步骤,从而实现太赫兹光纤布喇格光栅的结构.相比较而言,二氧化碳激光聚焦使得聚合物熔化改变形状比较容易,系统成本较低;采用紫外激光聚焦可以直接在聚合物太赫兹光纤刻出缺陷,但系统成本较高.如图 2,直径改变近似为光纤长度的正弦函数,其最大直径扰动为 Δd .我们用直径调制比($\eta = \Delta d/d$)定义聚合物太赫兹光纤直径变形的程度。

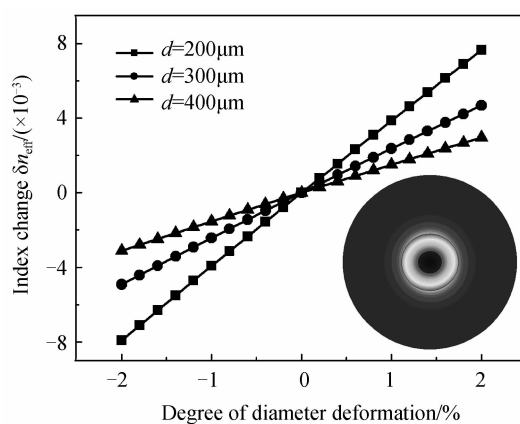


图 2 有效折射率变化对应聚合物太赫兹光纤直径变形,插图是聚合物太赫兹光纤基模模场分布图

Fig. 2 Effective index change vs the degree of diameter deformation for the polymer THz fiber, Inset shows the mode profile of the fundamental mode of the polymer THz fiber

从聚合物太赫兹光纤横截面来看,高折射率(假设为 1.5)的聚合物和外围的空气(折射率为 1)构成了太赫兹波传输的波导结构.在已知聚合物光纤尺寸和太赫兹波工作波长的情况下,可以通过严格的麦克斯韦方程组或有限元方法^[17-18]计算获得对应光纤模式的有效折射率.当聚合物太赫兹光纤直径变化时,对应的基模有效折射率也发生变化.图 2 显示了有效折射率变化和聚合物太赫兹光纤的直径变形程度的对应关系.其中采用了直径分别为 $200\ \mu\text{m}$ (矩形曲线)、 $300\ \mu\text{m}$ (圆形曲线)、 $400\ \mu\text{m}$ (三角形曲线)的三种聚合物太赫兹光纤,并假设太赫兹工作波长是 $300\ \mu\text{m}$ (对应于 1 THz).图 2 插图给出了直径为 $300\ \mu\text{m}$ 的聚合物太赫兹光纤基模的模场分布图.有效折射率变化被定义为 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{d+\Delta d/2} - n_{d-\Delta d/2}$,其中 $n_{d+\Delta d/2}$ 和 $n_{d-\Delta d/2}$ 是聚合物太赫兹光纤直径 $d+\Delta d/2$ 和 $d-\Delta d/2$ 的基模的有效折射率,它们的数值可以从直径为 $d+\Delta d/2$ 和 $d-\Delta d/2$ 的太赫兹光纤通过有限元方法计算获得.图 2 表明,光纤直径沿着长度方向周期性变化会带来有效折射率周期性变化,而且在直径调制比一定的情况下光

纤直径越小有效折射率变化越大, 当聚合物太赫兹光纤的直径变形程度是 $\eta=1\%$, 有效折射率变化达到 10^{-3} 数量级.

2 太赫兹光纤布喇格光栅的特性

图 3 给出了计算的太赫兹光纤布喇格光栅的反射谱, 其中光栅长度、栅距周期分别为 $L=30\text{ cm}$ 、 $\Lambda=110\text{ }\mu\text{m}$, 聚合物太赫兹光纤直径为 $d=300\text{ }\mu\text{m}$, 图 3 (a)、(b) 分别对应有效折射率变化为 5×10^{-4} 、 2×10^{-3} 的情况. 太赫兹光纤布喇格光栅的反射峰波长(布喇格波长)大约是 $300\text{ }\mu\text{m}$, 带宽是十分之一微米量级. 显然, 太赫兹光纤布喇格光栅的反射率和带宽随着聚合物太赫兹光纤有效折射率变化的增加而变大, 这一点和传统光学波段的光纤布喇格光栅一样.

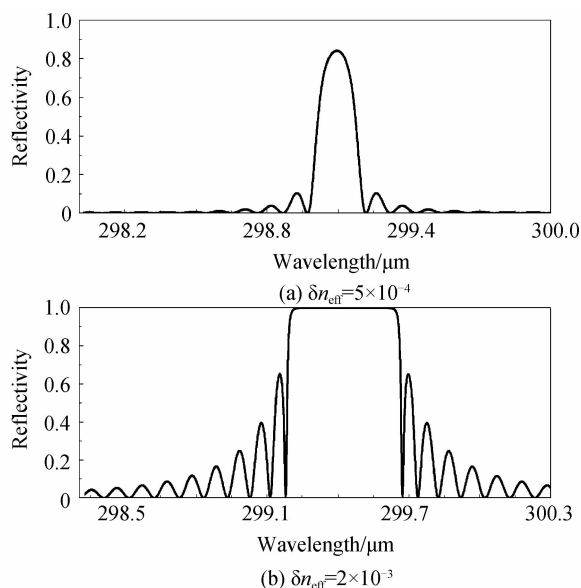


图 3 聚合物太赫兹光纤有效折射率变化和对应的太赫兹光纤布喇格光栅反射谱

Fig. 3 Reflectivity spectra of the T-FBGs with the index changes

传统光学波段的光纤布喇格光栅的反射峰波长 $\lambda_{\text{T-FBG}}$ 和栅距周期 (Λ) 满足线性关系, 即

$$\lambda_{\text{T-FBG}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

考虑到式(1), 当且仅当光纤的有效折射率(n_{eff})是常量时, 反射峰波长与栅距周期成比的. 对于传统的基于标准单模光纤的布喇格光栅, 在较大波长范围内有效折射率可以被看作常量, 因为纤芯和包层的折射率差异是非常小的(10^{-3} 数量级或小于它). 然而, 对于聚合物太赫兹光纤, 折射率差异是非常大的(大于 10^{-1} 数量级), 有效折射率是波长的非线性函数. 太赫兹光纤布喇格光栅的反射峰波长、反射率和栅距周期的关系如图 4 所示. 这里, 所有的太赫兹光纤布喇格光栅有相同的长度($L=10\text{ cm}$), 其基底是直径($d=300\text{ }\mu\text{m}$)的聚合物太赫兹光纤, 直径变形程度是 $\eta=1\%$. 图 4 表明

反射峰波长、反射率和栅距周期存在非线性关系.

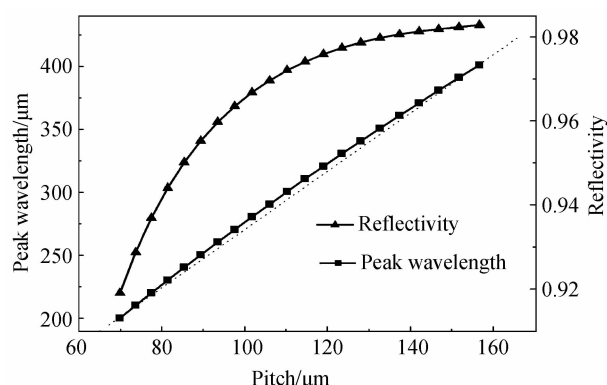


图 4 反射峰波长、反射率和栅距周期的关系

Fig. 4 Peak wavelength and reflectivity of T-FBGs with different grating pitches (Λ)

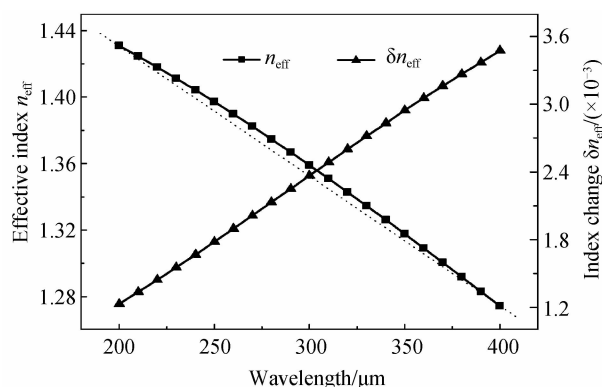


图 5 有效折射率、有效折射率变化和工作波长的关系

Fig. 5 Effective index and index change of the polymer THz fiber with different operation wavelengths

通过有限元方法计算获得聚合物太赫兹光纤(直径是 $d=300\text{ }\mu\text{m}$)的有效折射率和波长的非线性关系如图 5 中的矩形曲线所示. 这说明式(1)中的有效折射率(n_{eff})和波长存在非线性关系, 因此根据式(1), 可得到反射峰波长和太赫兹光纤布喇格光栅栅距周期之间的非线性关系. 另外, 图 5 中的三角形曲线显示了有效折射率对不同波长的变化, 其中聚合物太赫兹光纤的直径变形是 $\eta=1\%$. 随着波长增加, 有效折射率变化也增大, 这导致太赫兹光纤布喇格光栅反射率的增加.

另外一个值得研究的问题是不同长度的太赫兹光纤布喇格光栅的特性. 假设用于制作太赫兹光纤布喇格光栅的聚合物太赫兹光纤的直径是 $d=300\text{ }\mu\text{m}$, 太赫兹光纤布喇格光栅的栅距周期是 $\Lambda=110\text{ }\mu\text{m}$. 对于聚合物太赫兹光纤的直径变形的程度设定是 $\eta=0.2\%$ 或 $\eta=1\%$. 图 6 给出了太赫兹光纤布喇格光栅反射率的计算结果(实心矩形曲线对应于 $\eta=0.2\%$, 实心三角形曲线对应于 $\eta=1\%$)和太赫兹光纤布喇格光栅带宽的计算结果(空心矩形曲线对应于 $\eta=0.2\%$, 空心三角形曲线对应于 $\eta=1\%$). 从图中可以看出要获得 95% 以上的反射率, 太赫兹光纤布喇格光栅的长度至少是 10 cm (对应 $\eta=1\%$)和 45 cm (对应 $\eta=0.2\%$), 远大于

传统光纤布喇格光栅 1~2 cm 的长度. 当太赫兹光纤布喇格光栅的长度是 10 cm 的时候, 反射率分别是 97% (对应 $\eta=1\%$) 和 22% (对应 $\eta=0.2\%$), 说明在长度为 10 cm 情况下, 太赫兹光纤布喇格光栅的反射率可以根据直径变形的程度从 22% 至 97% 自由选择. 此外, 图 6 表明太赫兹光纤布喇格光栅的带宽随着长度的增加而减少, 这个规律和传统光纤布喇格光栅一致. 太赫兹光纤布喇格光栅的长度为 50 cm 的时候, 对应的带宽分别是 $0.17 \mu\text{m}$ (对应 $\eta=1\%$) 和 $0.54 \mu\text{m}$ (对应 $\eta=0.2\%$).

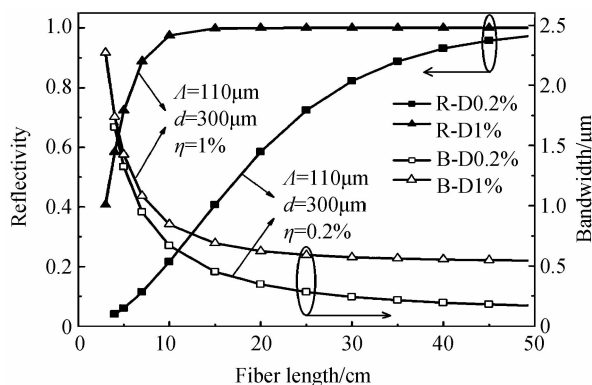


图 6 太赫兹光纤布喇格光栅反射率、带宽和长度的关系 (R-D0.2% 和 R-D1% 表示反射率曲线, B-D0.2% 和 B-D1% 表示带宽曲线)

Fig. 6 Reflectivity and bandwidth for T-FBGs with different lengths (R-D0.2% and R-D1% are marked for reflectivity curve, B-D0.2% and B-D1% are marked for bandwidth curve)

3 结论

本文研究了基于聚合物太赫兹光纤的太赫兹光纤布喇格光栅. 以聚合物太赫兹光纤为基底光纤, 利用二氧化碳激光器或紫外光激光器实现点对点加工聚合物太赫兹光纤, 通过聚合物太赫兹光纤直径改变实现有效折射率的变化, 从而获得太赫兹光纤布喇格光栅. 研究了聚合物太赫兹光纤直径改变对应的有效折射率变化; 描述了太赫兹光纤布喇格光栅的反射率、带宽特性; 讨论了太赫兹光纤布喇格光栅反射率、反射峰波长和栅距周期的关系; 发现了太赫兹光纤布喇格光栅反射峰波长和栅距周期的非线性关系, 并给出了解释. 本文研究表明, 一个长度 10 cm、栅距周期 $110 \mu\text{m}$ 、直径变形程度大于 0.2% 的太赫兹光纤布喇格光栅, 其反射峰波长约为 $300 \mu\text{m}$, 具有小于 $1 \mu\text{m}$ 的带宽, 反射率可以在 22% 至 97% 范围内自由选择.

参考文献

[1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technology*, 2002, **50**(3): 910-28.
 [2] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
 [3] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Terahertz fields and applications[J]. *Terahertz Fields and Applications Progress*

in Quantum Electronics, 2004, **28**(1): 1-66.

- [4] CHEN Q, JIANG Z, XU G X, *et al.* Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(15): 1122-1124.
 [5] CHEN H T, KERSTING R, CHO G C. Terahertz imaging with a nanometer resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(15): 3009-3011.
 [6] HAN P Y, TANI M, USAMI M, *et al.* A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(4): 2357-2359.
 [7] PIESEWCZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, *et al.* Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, **49**(6): 24-39.
 [8] BRUCHERSEIFER M, NAGEL M, BOLIVAR P H, *et al.* Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(24): 4049-4051.
 [9] CHENG Wei, LI Jiu-sheng. A dual-wavelength Terahertz wave power splitter based on photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 123002-1.
 程伟, 李九生. 基于光子晶体的双波长太赫兹波功分器研究 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 123002-1.
 [10] GAO Cun-mei, CHEN Ling, XIE Le, *et al.* Comparison on Terahertz transmission based on spoof surface plasmon polaritons between bull's eye structures with different ring grooves[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1156-1160.
 高春梅, 陈麟, 谢乐, 等. 不同周期数牛眼结构对基于伪表面等离子激发的太赫兹透射的影响 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1156-1160.
 [11] WANG Dou-dou, WANG Li-li, ZHANG Tao, *et al.* Low loss and high birefringence Topas photonic bandgap fiber at Terahertz frequency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0606002-1.
 王豆豆, 王丽莉, 张涛, 等. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(6): 0606002-1.
 [12] XU De-gang, YU Hong, ZHANG HAO, *et al.* Theoretical study on combining model of Terahertz beams [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0319001-1.
 徐德刚, 于红, 张昊, 等. 太赫兹波束技术的理论研究 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(3): 0319001-1.
 [13] DUAN Jie, XIE Xiao-ping, DUAN Tao, *et al.* An all-optical exclusive-OR gate based on Terahertz optical asymmetric demultiplexer-four wave mixing effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1031-1038.
 段杰, 谢小平, 段弢, 等. 基于太赫兹光解复用器-四波混频效应的全光异或门方案 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1031-1038.
 [14] CARR G L, MARTIN M C, MCKINNEY W R, *et al.* High-power terahertz radiation from relativistic electrons [J]. *Nature*, 2002, **420**(6912): 153-156.
 [15] KOHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, *et al.* Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, **417**(6885): 156-159.
 [16] WANG K, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding [J]. *Nature*, 2004, **432**(7015): 376-379.
 [17] CHEN L J, CHEN H W, KAO T F, *et al.* Low-loss subwavelength plastic terahertz waveguiding [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(3): 308-310.
 [18] CHEN D R, CHEN H B. A novel low-loss Terahertz

- waveguide: polymer tube[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(4): 3762-3767.
- [19] ATAKARAMIANS S, H. EBENDORFF-HEIDEPRIEN S A V, NAGEL M, *et al.* THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(16): 14053-14062.
- [20] LU J Y, YU CP, CHANG H C, *et al.* Terahertz air-core microstructure fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(16): 064105-064107.
- [21] CHEN H B, CHEN D R, HONG Z. Squeezed lattice elliptical-hoe terahertz fiber with high birefringence [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(20): 3943-7.
- [22] ALEXANDRE D, ALLARD J F, MORRIS D, *et al.* Fabrication and THz loss measurements of porous subwavelength fibers using a directional coupler method[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(10): 8012-8028.
- [23] CHEN H W, CHIU C M, LAI C H, *et al.* Subwavelength dielectric-fiber-based THz coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(11): 1489-1495.
- [24] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1263-75.
- [25] ZHOU S F, REEKIE L, CHAN H P, *et al.* Polymer fiber Bragg gratings for the THz region[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, California United States, March 4-8, 2012: JW2A.
- [26] YAN G, MARKOV A, CHINIFOOROSHAN Y, *et al.* Resonant THz sensor for paper quality monitoring using THz fiber Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(13): 2200-2202.
- [27] 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.
- [28] JIN Y S, KIM G J, JEON S G. Terahertz dielectric properties of polymer [J]. *Journal of Korean Physics Society*, 2006, **49**(3): 513-517.