

太赫兹聚合物波导研究进展

刘 婧¹ 沈京玲² 张存林^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081

²首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

摘要 随着太赫兹技术的不断发展,太赫兹波导一直都是研究的热点,由此各种波导应运而生。相比于金属波导,聚合物材料波导在可弯曲和低损耗两方面都具有比较明显的优势。总结了波导技术应用于太赫兹领域的研究现状,重点总结了基于不同原理、不同结构的太赫兹聚合物波导,包括基于介质界面全反射的太赫兹聚合物波导和基于反谐振原理的太赫兹聚合物波导等。最后简要介绍了太赫兹聚合物波导的应用现状以及后续可行的工作方向。

关键词 光学器件; 太赫兹; 聚合物波导; 亚波长

中图分类号 TN814 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.080003

Progress of Terahertz Polymer Waveguides

Liu Jing¹ Shen Jingling² Zhang Cunlin^{1,2}

¹*School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

²*Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China*

Abstract With the development of terahertz (THz) technology, THz waveguides have always been a research hot spot and various waveguides arise at the historic moment. Compared to metal waveguides, polymer waveguides have obvious advantages in both propagation loss and flexibility. The recent researches on THz polymer waveguides are summarized. Different mechanisms of polymer tube terahertz waveguides, including total reflection guiding and anti-resonant reflecting guiding, are concluded. Finally, possible further applications of such terahertz polymer waveguides are briefly described.

Key words optical devices; terahertz; polymer waveguide; subwavelength

OCIS codes 230.7370; 230.3120; 130.2790

1 引 言

太赫兹(THz)波通常是指频率在0.1~10 THz范围内的电磁辐射。自20世纪80年代以来,随着科学技术的迅速发展,尤其是超快光学的飞速发展,科技工作者在太赫兹辐射源和探测器的研究方面不断取得新的发现与突破,使太赫兹科学技术发生了深刻的变革^[1]。伴随着这些发展,太赫兹技术在系统成像^[2-3]、生物医学^[4]、通信^[5]、安检^[6]等领域都有着广泛应用。

然而由于环境吸收等因素的影响,THz波在自由空间的传输仍是一个亟待解决的难题。导波技术和器件的发展,将会解决以上问题。由此,各种结构的太赫兹波导孕育而生,如平行板金属波导^[7-8]、金属管波导^[9-11]、介质波导^[12]、聚合物布拉格波导^[13]、聚合物微结构波导^[14]等。

相较于金属波导,聚合物波导在波导的低损耗与可弯曲两方面都有比较明显的优势。本文重点介绍基于不同原理的新型聚合物太赫兹波导,包括基于全反射原理的太赫兹聚合物波导和基于反谐振原理的太赫兹聚合物波导,并简要介绍了太赫兹聚合物波导的应用现状及后续工作方向。

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-12; 网络出版日期: 2015-07-11

作者简介: 刘 婧(1987—),女,博士研究生,主要从事仪器科学与技术等方面的研究。E-mail: newone_kaka@163.com

导师简介: 张存林(1961—),男,博士,教授,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn

2 几种典型的聚合物波导

相比较于金属波导,介质材料尤其是聚合物材料在波导的低损耗性与可弯曲性这两方面都有比较明显的优势,这也是本文的研究重点。聚合物波导在材料上选择对太赫兹波有较低吸收损耗的聚合物,常用的聚合物材料及其特性如表1所示^[15-17],其中频率 $f \leq 17$ Hz。

表1 典型的聚合物波导材料及特性

Table 1 Material properties of typical terahertz polymer waveguides

Polymer	Absorption /cm ⁻¹	Refractive index
PMMA	<20	1.53
PTFE	<0.9	1.43~1.44
HDPE	<0.4	1.50~1.56
COC	<0.25	1.51~1.53

典型波导类型按导波机理有基于全反射原理和基于反谐振原理两种,按波导结构可分为空心波导、实心波导和多孔型波导。

2004年,Harrington等^[18]利用液相化学手段在一种可弯曲的聚碳酸酯(PC)空芯波导内部沉积一层铜膜,利用全反射原理,该波导可实现传输损耗小于4 dB/m的太赫兹传输。

聚合物铁电聚偏氟乙烯(PVDF)作为另一种太赫兹导波材料,其空心波导的太赫兹波透射效率比同结构尺寸的金属空心波导高。2005年,Hidaka等^[19]对此种波导弯曲过程中,透射效率的角度依赖性进行了研究。

2007年,加拿大的Skorobogatiy等^[20]对聚合物空芯布拉格光纤进行了研究。图1(a)和(b)分别是这种波导的实物图和不同弯曲半径下这种波导的透射强度图。

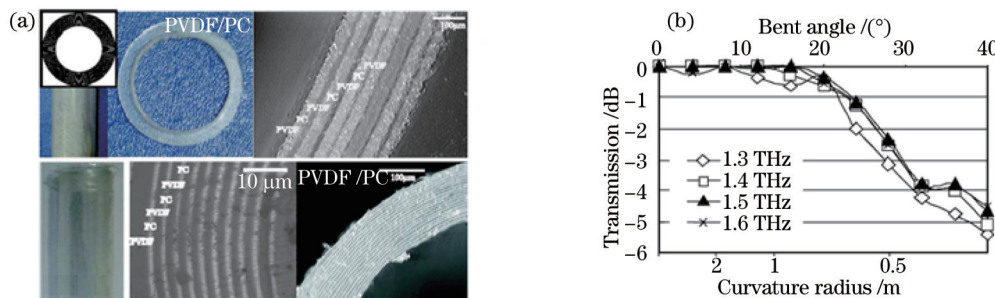


图1 (a) 聚合物空芯布拉格光纤实物图; (b) 该波导不同弯曲半径下的透射强度

Fig.1 (a) Example of hollow Bragg fibers; (b) transmittance of such waveguide as a function of bent angle

2007年,美国的Bowden等^[21]研究了具有银或聚苯乙烯(PS)涂层的空芯玻璃波导。通过分析长度为90 cm,直径为2 mm的波导的传输性质,发现当频率为2.5 THz时,该种波导的传输损耗是0.95 dB/m。2008年,日本的Matsuura研究小组对具有介质涂层的金属波导进行了太赫兹宽谱研究。他们使用的波导内径为3 mm,研究表明,当波长是200 μm时,该种波导的传输损耗是1.3 dB/m;当波长从150 μm变换到大于250 μm时,其传输损耗可以低于3 dB。该波导的制备过程如图2所示^[22]。

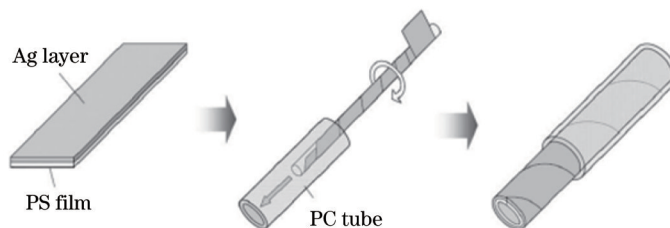
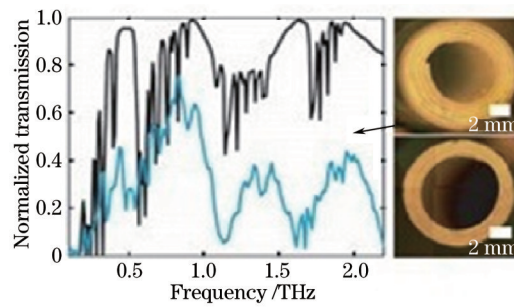


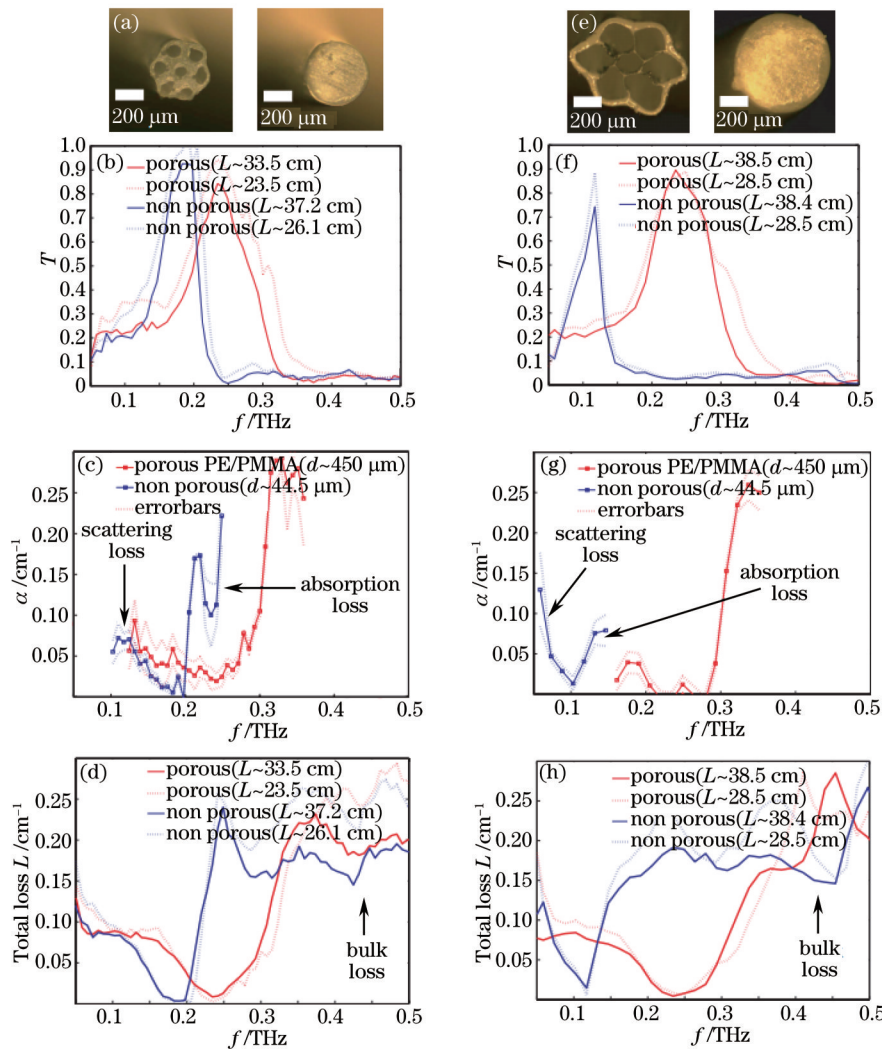
图2 具有银和聚苯乙烯涂层的空芯玻璃波导制备过程

Fig.2 Fabrication process of PE-film-inserted hollow fibers

2011年,加拿大的Ung等研究了聚四氟乙烯(PTFE)及负载TiO₂的高密度聚乙烯(HDPE)布拉格光纤和其传输特性,这种波导的直径约为12 mm,在传输窗口内的理论损耗约为0.1 cm⁻¹。图3显示了它的归一化理论与实验透射谱^[23]。

图3 PTFE及负载TiO₂的高密度聚乙烯布拉格光纤的归一化透射谱Fig.3 Polymer Bragg fibers using PTFE and TiO₂-loaded HDPE and its normalized transmission theoretical values (black curve) and experiment values (blue curve)

2011年,该小组设计并制造了聚合物微结构波导(MOFs),并对此类波导做了进一步研究。他们通过对比多孔波导(气孔占有率大于80%)和实心波导的空间透射和传输损耗特性,发现同样外径大小的两种波导都具有较小的传输损耗($\alpha \leq 0.02 \text{ cm}^{-1}$),但多孔波导有更宽的空间传输窗口,因此可以传输更高频率的太赫兹波,这两种波导的实物图、透射频谱和传输损耗谱如图4所示^[24]。

图4 聚合物微结构波导实物图、透射频谱和传输损耗谱。(a)~(d) 波导外径 $d \sim 450 \mu\text{m}$; (e)~(h) 波导外径 $d \sim 700 \mu\text{m}$ Fig.4 Photos and transmission and loss measurements of polymer MOFs. (a)~(d) Small diameter fibers $d \sim 450 \mu\text{m}$; (e)~(h) larger diameter fibers $d \sim 700 \mu\text{m}$

2006年,台湾大学Chen的研究小组,利用200 μm的聚乙烯塑料光纤型波导实现了对0.3 THz波的传输。这种光纤的纤芯部分材料是聚乙烯塑料,它利用纤芯与空气之间的全反射原理对太赫兹波进行传输,

但其大部分光能是在光纤外部空气中传输,故受环境影响较大,且弯曲损耗也比较大^[25-26]。

2008年,Lu小组利用反谐振的原理设计了一种空芯微结构光纤(TAMF),如图5所示^[27]。这种波导通过中间的空芯和呈周期性分布的包层结构(商用的Teflon塑料管)共同作用,在波导内限制低损横模的传输,通过线性调节光纤空芯部分的尺寸,可以调节该种波导的导波波长。他们的研究表明,该波导的导波机制类似于反谐振原理。同时,理论模拟的结果显示,光波被限制在光纤中心。此类波导可实现极低损的能量传输,同时,减少外部环境对波导传输信号的扰动影响,它的衰减损耗(包括耦合损耗和传输损耗)小于 0.01 cm^{-1} 。

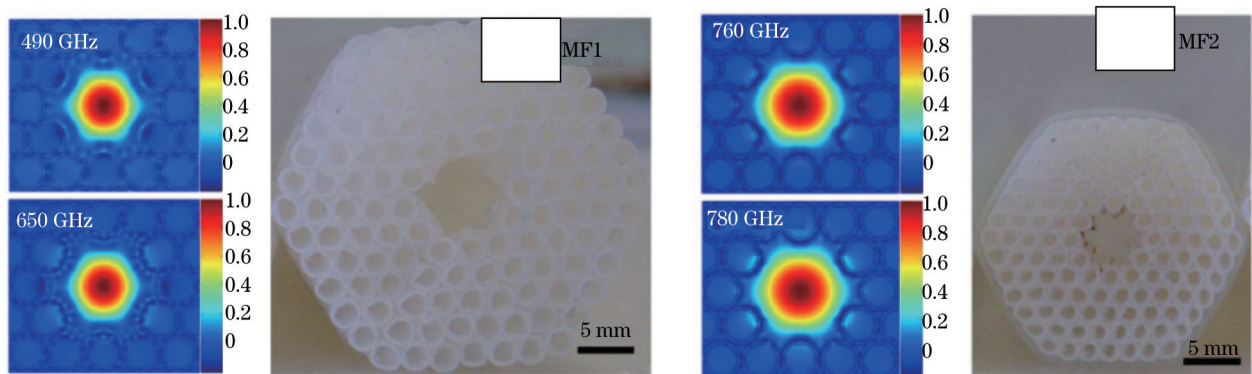


图5 空芯微结构光纤实物图及其不同频率模场分布的模拟结果

Fig.5 Simulated modal patterns at transmission peak wavelengths and photos of fabricated TAMF

2009年台湾大学的Lai研究小组利用商用的聚四氟乙烯管进行太赫兹波的传输研究,这种波导的内径为9 mm、厚度为0.5 mm,其折射率为1.4^[28],此类空芯聚合物波导的介质层较薄,在包层和线芯中有两种传输机制,包层中传播的模式限制机理是高折射率包层与低折射率空芯部分的折射率不同所引起的全反射,同时,在空气芯层还传输一种芯模,其传输机理类似于反谐振反射波导。2010年,Lai的研究小组继续对反谐振波导进行研究,并利用两组不同尺寸的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)波导(尺寸分别为 $D=8 \text{ mm}$, $t=1.0 \text{ mm}$ 和 $D=4 \text{ mm}$, $t=2.0 \text{ mm}$)进行了传输特性实验,其实验的归一化透射谱如图6所示^[29],这也印证了这类波导的导波机制是反谐振反射原理。

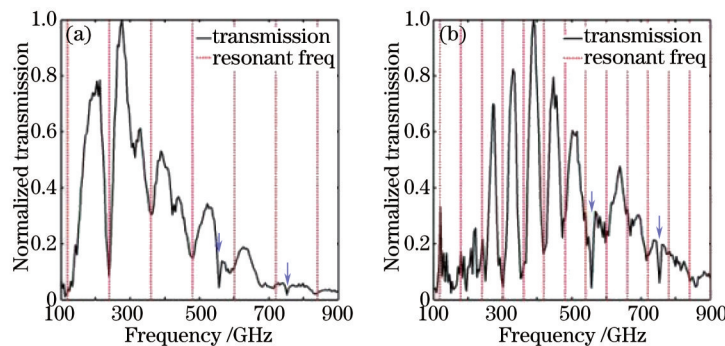


图6 PMMA管型波导的归一化透射光谱(点状线为计算得出的包层共振频率)。

(a) $D=8 \text{ mm}$, $t=1.0 \text{ mm}$; (b) $D=4 \text{ mm}$, $t=2.0 \text{ mm}$

Fig.6 Normalized transmission spectra of PMMA pipe waveguides (dotted lines are calculated resonant frequencies of cladding). (a) $D=8 \text{ mm}$, $t=1.0 \text{ mm}$; (b) $D=4 \text{ mm}$, $t=2.0 \text{ mm}$

基于这项工作,2013年清华大学Xiao等^[30]设计并制作了基于反谐振原理的PMMA薄壁自支撑结构波导。这种波导由内外两结构共同对入射的太赫兹波进行调制,15 cm长的该波导在3.1 THz的插入损耗为5.34 dB。实验和理论都证明,通过合理的设计这类波导,可实现低损耗单模传输,同时,由于使用了聚合物材料,该种波导具有一定的弯曲性,图7为其横截面照片及不同尺寸波导的典型模场分布图^[30]。

综上,聚合物波导的结构类型和导波机理可以总结为表2内容。

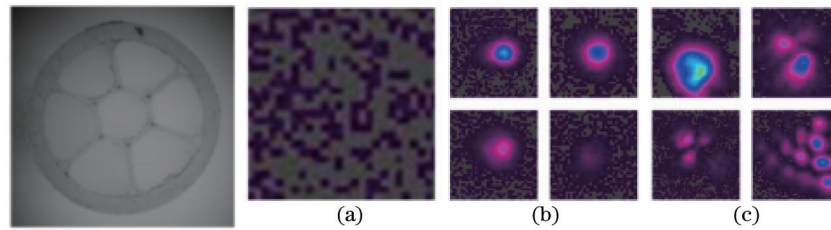


图7 PMMA薄壁自支撑结构波导横截面照片和不同尺寸波导的典型模场分布

Fig.7 Cross-section photograph of PMMA self-supporting waveguide and typical mode patterns of different sizes

表2 典型的波导类型及导波机理

Table 2 Typical waveguide type and guiding mechanism

Classification	Type of cladding	Guiding mechanism
Hollow core	Single or hybrid microstructure	Total internal reflection or antiresonance
Solid core	Air microstructure	Total internal reflection
Porous core	Air microstructure	Total internal reflection

3 太赫兹聚合物波导的应用

聚合物波导制备工艺成熟,成本较低,同时也具有良好的可弯曲性及低损耗性,它可能的应用有:太赫兹波段的微量气体传感、传统太赫兹时域光谱系统中太赫兹波的传输器件、太赫兹成像系统等。

2011年,台湾国立大学的Chen和Lee等在室温下利用太赫兹光纤近场扫描显微镜(频率为320 GHz)对二十位患者的乳腺组织切片进行了检测。研究表明,此种方法可以从正常组织中诊断出肿瘤组织而无需H&E染色,该方法在快速准确的肿瘤病理检测等方面有着潜在的应用前景。他们得到的太赫兹近场成像结果如图8所示,其中(a)是正常女性的组织切片染色和成像结果,(b)是患者组织切片染色和成像结果^[31]。

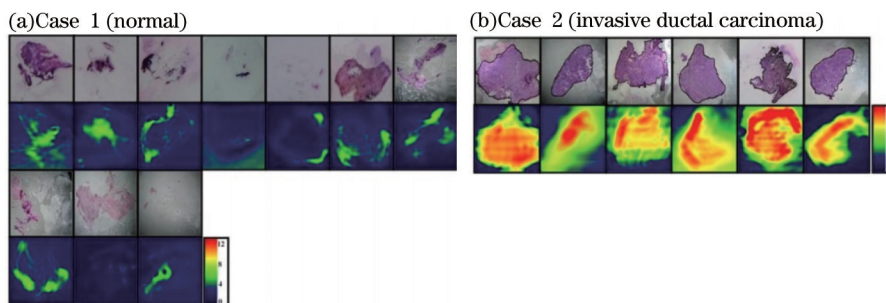


图8 (a)正常人和(b)患者组织切片染色结果与太赫兹近场成像结果

Fig.8 THz near-field microscopic images of (a) normal and (b) invasive ductal carcinoma and corresponding pathologic photomicrograph of H&E stained sections

2012年,加拿大的Mazhorova, Markov等利用太赫兹悬浮孔型波导对E大肠杆菌群落进行了传感实验。他们的传感系统可以实现含量为104~109 cfu/ml的大肠杆菌群落探测。实验使用的波导结构如图9所示。

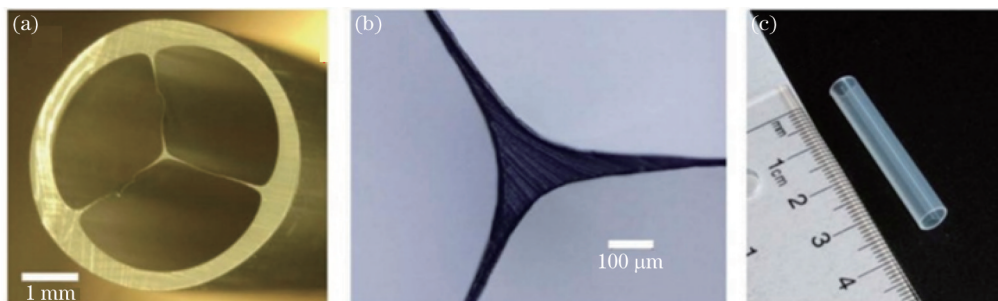


图9 太赫兹聚合物波导结构示意图。(a), (b) 直径为5.1 mm的该波导内由三个20 μm厚的支撑结构撑起大小为150 μm的芯;(c) 实验过程中使用的长为4 cm的此种波导

Fig.9 Structure diagrams of terahertz polymer waveguide. (a), (b) THz fiber featuring a 150 μm core suspended by three 20 μm thick bridges in the center of a 5.1 mm diameter tube; (c) 4 cm long fiber piece used in experiments

示,它的包层直径为 5.1 mm,其内部有一个芯径为 150 μm 的纤芯,该纤芯由一种亚波长结构支持。他们的研究表明,这是一种无标记菌落探测方法,该方法不依赖于这种菌落在太赫兹波段的指纹特性即可进行检测^[32]。

太赫兹波导应用的相关工作还有很多。2010年,You等^[33]提出管型亚波长波导的薄膜传感方法;2012年,天津大学姚建铨院士小组利用聚合物光子晶体波导实现了太赫兹波段的乙炔气体传感^[34];2014年,南开大学李珊珊等^[35]研究了一种基于填充式多孔光纤的太赫兹偏振分离器,该光纤基底选择聚合物材料 TOPAS 等。

4 总 结

太赫兹波导技术的发展为实现太赫兹安检仪和太赫兹时域光谱系统的小型化、便携化提供了条件,同时也为太赫兹通信、太赫兹医学检测等相关领域的发展提供了技术保障。性能上,波导的低损耗与可弯曲性是研究人员追求的目标。相较于传统波导,聚合物波导在这两方面都有比较明显的优势。进一步的聚合物波导研究可集中在新型低损聚合物材料的研发、制备技术研究和通信传感应用等方向。综上,低损耗、可弯曲的聚合物波导将是太赫兹波导器件的热门研究方向之一,以这类波导为基础的实用器件应用潜力巨大。

参 考 文 献

- 1 Mu Kaijun. Terahertz Spectroscopy of Explosives[D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.
牧凯军. 爆炸物的太赫兹光谱研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- 2 Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Opt Lett, 1995, 20(16): 1716-1718.
- 3 Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with a nanometer resolution[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(15): 3009-3011.
- 4 Anna Mazhorova, Andrey Markov, Andy Ng, *et al.* Label-free bacteria detection using evanescent mode of a suspended core terahertz fiber[J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5344-5355.
- 5 Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, *et al.* Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. IEEE Antennas and Propagation Mag, 2007, 49(6): 24-39.
- 6 Shen Y C, Lo T, Taday P F, *et al.* Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(24): 241116.
- 7 Mendis R, Grischkowsky D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses[J]. Opt Lett, 2001, 26(11): 846-848.
- 8 Zhan Hui, Mendis Rajind, Mittleman Daniel M. Characterization of the terahertz near-field output of parallel-plate waveguides[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(3): 558-566.
- 9 Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, *et al.* Terahertz waveguides[J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(5): 851-863.
- 10 Harrington J A, George R, Pedersen P, *et al.* Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. Opt Express, 2004, 12(21): 5263-5268.
- 11 Ito T, Matsuura Y, Miyagi M, *et al.* Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(5): 1230-1235.
- 12 Lu Jen-Tang, Lai Chih-Hsien, Tseng Tzu-Fang, *et al.* Terahertz polarization-sensitive rectangular pipe waveguides[J]. Opt Express, 2011, 19(22): 21532-21539.
- 13 Yu R J, Zhang B, Zhang Y Q, *et al.* Proposal for ultralow loss hollow-core plastic Bragg fiber with cobweb-structured cladding for terahertz waveguiding[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(12): 910-912.
- 14 Setti V, Vincetti L, Argyros A. Flexible tube lattice fibers for terahertz applications[J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3388-3399.
- 15 Jin Y S, Kim G J, Jeon S G. Terahertz dielectric properties of polymers[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2006, 49(2): 513-517.
- 16 Balakrishnan J, Fischer B M, Abbott D. Sensing the hygroscopicity of polymer and copolymer materials using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Appl Opt, 2009, 48(12): 2262-2266.
- 17 Fischer B M, Hoffmann M, Helm H. Broadband THz Time-Domain Spectroscopy of Biomolecules[D]. Freiburg: University of Freiburg, 2005.
- 18 Harrington J A, George R, Pedersen P, *et al.* Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. Opt Express, 2004, 12(21): 5263-5268.
- 19 Hidaka T, Minamide H, Ito H, *et al.* Ferroelectric PVDF cladding terahertz waveguide[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8): 2469-2473.

- 20 Skorobogatiy M, Dupuis A. Ferroelectric all-polymer hollow Bragg fibers for terahertz guidance[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(11): 113514.
- 21 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.
- 22 Matsuura Y, Takeda E. Hollow optical fibers loaded with an inner dielectric film for terahertz broadband spectroscopy[J]. J Opt Soc Am B, 2008, 25(12): 1949-1954.
- 23 Ung B, Dupuis A, Stoeffler K, *et al.*. High-refractive-index composite materials for terahertz waveguides: trade-off between index contrast and absorption loss[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(4): 917-921.
- 24 Dupuis A, Mazhorova A, DÚsÚvÚdavy F Ú Ú, *et al.*. Spectral characterization of porous dielectric subwavelength THz fibers fabricated using a microstructured molding technique[J]. Opt Express, 2010, 18(13): 13813-13828.
- 25 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.
- 26 Gao Fei, Chen Liqun, Feng Guangzhi, *et al.*. Progress of flexible and low-loss terahertz waveguides[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050005.
高飞, 陈立群, 冯广智, 等. 可弯曲的低损耗太赫兹波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050005.
- 27 Lu J Y, Yu C P, Chang H C, *et al.*. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(6): 064105.
- 28 Lai C H, Hsueh Y C, Chen H W, *et al.*. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. Opt Lett, 2009, 34(21): 3457-3459.
- 29 Lai C H, You B, Lu J Y, *et al.*. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. Opt Express, 2010, 18(1): 309-322.
- 30 Xiao M, Liu J, Zhang W, *et al.*. Self-supporting polymer pipes for low loss single-mode THz transmission[J]. Opt Express, 2013, 21(17): 19808-19815.
- 31 Chen H, Lee W J, Huang H Y, *et al.*. Performance of THz fiber-scanning near-field microscopy to diagnose breast tumors[J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19523-19531.
- 32 Mazhorova A, Markov A, Ng A, *et al.*. Label-free bacteria detection using evanescent mode of a suspended core terahertz fiber[J]. Opt Express, 2012, 20(5): 5344-5355.
- 33 You B, Lu J Y, Liou J H, *et al.*. Subwavelength film sensing based on terahertz anti-resonant reflecting hollow waveguides[J]. Opt Express, 2010, 18(18): 19353-19360.
- 34 Jing Lei. Research on Novel Gas Sensors with Photonic Crystal Fibers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
景磊. 新型光子晶体光纤气体传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- 35 Li Shanshan, Chang Shengjiang, Zhang Hao, *et al.*. Terahertz polarization splitter based on filled porous fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0723003.
李珊珊, 常胜江, 张昊, 等. 基于填充式多孔光纤的太赫兹偏振分离器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0723003.

栏目编辑: 殷建芳