

文章编号: 2095-4980(2014)06-0792-06

太赫兹纤维波导研究进展

孔德鹏¹, 苗 竟^{1,3}, 陈 琦², 何晓阳², 王丽莉^{1*}, 张晓冬^{1,3}

(1.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;

2.中国工程物理研究院 电子工程研究所&太赫兹科学技术研究中心, 四川 绵阳 621999;

3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 实现太赫兹波的低损耗、柔性传输是解决太赫兹设备轻量化、便携化的一个核心途径。本文综合分析了近年来太赫兹纤维波导技术的研究历程, 把纤维波导的研究分为原始材料的选择和挖掘、纯材料的结构设计与加工、拉伸超材料波导的设计与加工 3 个阶段, 并对各阶段的典型研究成果、优缺点及应用性进行了总结。最后, 展望拉伸超材料将成为近期太赫兹纤维波导技术研究的新方向, 有望实现太赫兹波的低损耗、柔性化、低廉性传输。

关键词: 太赫兹; 纤维波导; 微结构; 聚合物; 拉伸超材料

中图分类号: TN818

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201406.0792

Research progress of terahertz fiber waveguide

KONG De-peng¹, MIAO Jing^{1,3}, CHEN Qi², HE Xiao-yang², WANG Li-li^{1*}, ZHANG Xiao-dong^{1,3}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Shaanxi 710119, China; 2. Institute of Electronic Engineering & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Achieving low-loss and flexible transmission of terahertz wave is the key approach to develop light and portable terahertz equipment. Research progress of terahertz fiber waveguide technology is overviewed. The whole progress is divided into 3 stages described as selection and exploitation of original materials, design and fabrication of pure materials, design and fabrication of drawn meta-material. Then the achievements, advantages and disadvantages, and applications of these stages are analyzed. Finally, it is prospected that the drawn meta-material will be a novel research direction, and the high-transmission, flexible and low-cost terahertz fiber waveguide is expected to be fabricated in the future.

Key words: terahertz; fiber waveguide; microstructure; polymer; drawn meta-material

太赫兹(Terahertz, THz)波一般是指频率为 0.1 THz~10 THz(对应波长为 3 000 μm ~30 μm)的电磁波, 具有丰富的物理和化学信息以及传统光源所不具备的许多独特性质, 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具有巨大的应用潜力。太赫兹技术的核心内容是研究太赫兹波的发生、检测、传输和应用, 是近十多年来世界各国研究的一个重点和热点问题。其中, 太赫兹波传输是太赫兹技术中的一个核心问题, 现在采用的技术大多是通过自由空间传输, 而造成系统的体积庞大, 使用不方便, 成本昂贵。与之相对应的纤维波导技术是太赫兹波的一种介质传输方式, 具有柔性可弯曲、使用方便等优点, 近年来世界各地的许多机构都在关注, 并投入了大量的人力和物力进行研究。

本文在查阅大量国内外相关文献的基础上, 结合作者所在研究小组多年来在聚合物微结构光纤方面的研究, 对太赫兹纤维波导的研究进展情况进行了综合分析和总结。

收稿日期: 2014-09-01; 修回日期: 2014-10-16

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201307); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(新型聚合物梯度折射率型微结构太赫兹波导纤维技术研究); 国家自然科学基金资助项目(61275106, 11474351)

*通信作者: 王丽莉 email: liliwang@opt.ac.cn.

1 太赫兹纤维波导的研究历程

截止目前,太赫兹纤维波导的研究主要有3个阶段:原始材料的选择和挖掘;纯材料的结构设计和加工;拉伸超材料波导的设计与加工。

1.1 原始材料的选择和挖掘

最初,研究人员从现有材料中选择能够传输太赫兹波的种类,并以生活中现成的用品为对象,分析和探索其对太赫兹波的传导特性。例如金属丝、金属管、塑料丝、塑料管等。

国外对太赫兹波导的研究自上世纪末开始,早在1991年Frankel提出了太赫兹共面传输线^[1];1999年美国的俄克拉荷马州立大学首次把自由空间传输的太赫兹波耦合进入直径为亚毫米级的不锈钢注射针头内传输^[2],次年,他们又研究了太赫兹波在圆形和矩形金属管内的传输特性^[3];2004年美国的莱斯大学在《Nature》上发表了用不锈钢丝传输太赫兹波并用其搭建太赫兹窥镜实验系统的研究成果^[4],次年他们又发表了钢、铝、铜、锌以及镍铬铁合金金属丝对太赫兹波传输特性的研究论文^[5],研究表明,太赫兹波在裸金属丝表面以倏逝波的形式传播,具有近零的色散特性。

除金属外,人们也发现许多聚合物材料(塑料)在太赫兹波段具有较低的吸收损耗^[6](如图1所示)。因此,聚合物太赫兹波导也一直是各国研究人员关注的重点。2000年,同样是美国的俄克拉荷马州立大学报道了塑料带太赫兹波导^[7];国立台湾大学研究发现聚乙烯(PE)材质的细丝(如PE钓鱼线)和特氟龙薄壁管对太赫兹波具有良好的传输性能^[8-9]。

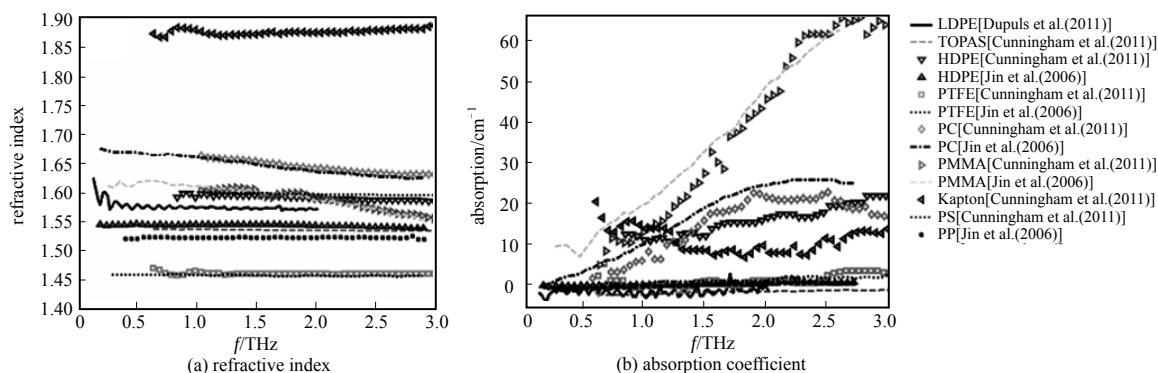


Fig.1 Characteristics of common optical polymer materials in the terahertz band
图1 常见光学聚合物材料在太赫兹波段的特性

通过初期的研究发现,金属丝(或金属管)中太赫兹波是以倏逝波的形式在金属与空气的界面上传输,材料吸收少,传输损耗小,几乎是零色散。可是金属丝(或金属管)裸露在空气中,受环境影响严重,难以封装使用。另外,太赫兹波在简单的塑料线和塑料管中分别以全内反射和抗共振反射的原理也可以传输,但是前者由于材料的吸收损耗大,难以封装,后者由于受形状、弯曲等因素的影响较大也难以使用。于是,研究开始向深层次的结构设计与加工转变。

1.2 纯材料的结构设计和加工

经过初步研究发现现有的自然材料无法满足使用需求时,研究人员倾向于对初期筛选的一些优异材料进行结构的设计和加工,通过在材料中引入空气孔阵列,实现对太赫兹波的限制性传输。这类研究所用的材料以容易成型加工、吸收损耗相对较低的聚合物为主,如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚四氟乙烯(PTFE)、环烯烃聚合物(COP或COC)等。工作的重点体现在光纤微结构的设计和制备上。典型的光纤结构有光子带隙型、多孔芯型、悬浮实芯型、中心大孔型和布拉格光栅型等(如图2所示)。

2008年台湾国立大学用聚四氟乙烯毛细管堆积制作了太赫兹波导^[10](端面结构如图2(a)所示),在0.3 THz~1 THz谱段的最低损耗达到了 0.01 cm^{-1} 量级,但是波导的尺寸较大,直径在25 mm以上,不利于实际应用;中科院西安光机所采用低损耗的COP材料设计并制作出悬浮多孔芯结构(端面结构如图2(b)所示),直径在毫米量级,可以实现柔性弯曲使用;2011年,奥克兰大学和悉尼大学合作报道了一种COP材料制作的悬浮实芯型太赫兹纤维波导^[11],波导的原理近似于传统的阶跃型光纤,中心的COP材料为纤芯,周围的大空气孔为低折射率包层,经测试发现纤维波导的传输损耗主要取决于材料的吸收,受波导结构的影响甚小;为了降低材料吸收引起的

传输损耗,多国的学者合作研究了基于共振反射原理的空心型微结构纤维波导(端面结构如图 2(d)所示),估计其传输损耗约为 0.9 cm^{-1} ;另外,阿德莱德大学和丹麦技术大学利用挤出成型法制作蜘蛛网型或者矩形网型的预制棒,然后拉伸得到高占比(约 60%)的太赫兹微结构纤维波导^[12-13](端面结构如图 2(e)所示),发现用 COC 制作的纤维波导,在 0.24 THz 处损耗低达 0.003 cm^{-1} ;还有一种典型的太赫兹纤维波导是中空型的聚合物布拉格纤维^[14],加拿大蒙特利尔综合理工学院采用聚合物薄膜与空气或者掺杂聚合物薄膜卷绕制作了这种太赫兹波导,某些波段的最低损耗达到 0.05 cm^{-1} 量级,类似地,浙江大学某课题组也提出一种基于普通蚕丝,制成泡沫微结构的生物兼容太赫兹光纤波导^[15],其空气填充率达到 94%。采用截断法测试蚕丝泡沫的太赫兹谱特性,在 $0.2 \text{ THz} \sim 0.5 \text{ THz}$ 波段的实际损耗也小于 0.8 cm^{-1} 。此外,国内的天津大学、南开大学、燕山大学、电子科技大学等研究机构^[15-28]也开展了各类太赫兹波导相关的研究工作,并取得一定进展。

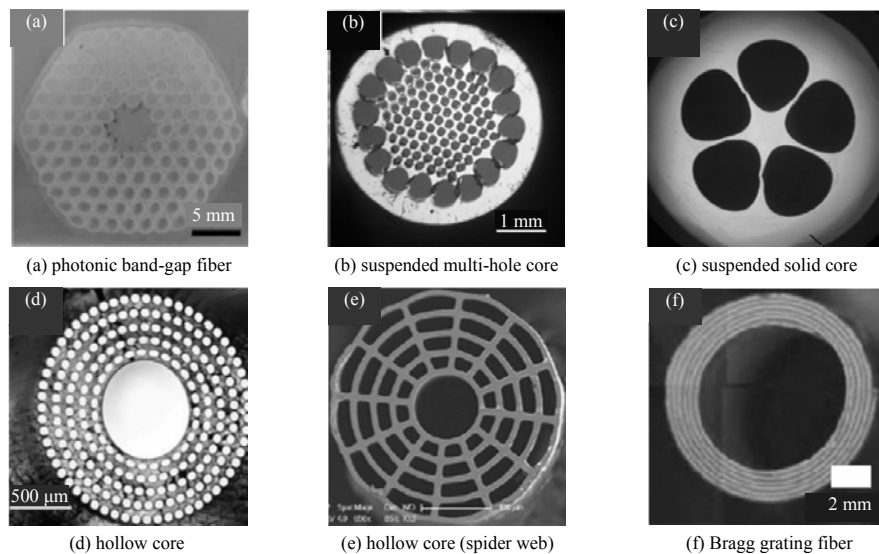


Fig.2 Typical terahertz waveguide fibers of microstructure polymer

图 2 典型的太赫兹聚合物微结构纤维波导

研究人员对太赫兹传输纤维波导的研究主要围绕损耗、带宽、色散等几个核心问题,但是在现有的几种典型结构中,带隙型光子晶体波导尺寸太大,不易弯曲,且带宽受限制;大空气孔包围的亚波长实芯或亚波长悬浮芯结构,纤芯的材料吸收无法避免,并且基模有部分泄漏在纤芯周围;多孔芯结构中模场虽有部分被集中在孔内,但吸收损耗仍不可忽视;空气芯、多孔包层或多层包层的微结构光纤和布拉格光纤,旨在用折射率交替的多包层结构限制电磁波能量在空气芯中传播,但是传输带宽和损耗仍不理想。

1.3 拉伸超材料波导的设计与加工

太赫兹纤维波导的研究经历了上述 2 个阶段以后,人们开始把研究方向转向结构更复杂、需两种或更多种类的材料复合而成的超材料。而作为太赫兹波传输的纤维波导,最容易实现的是二维结构超材料。目前的制作方法仍是预制棒拉伸法,这种纤维被称为拉伸超材料。

拉伸超材料波导集合了金属与非金属 2 种完全不同介电性质的材料,将材料的电导率和磁导率同时纳入研究的范围,超材料中的人造原子(或称为超原子)对电磁波的电场分量和磁场分量的作用得到综合利用。而在常规材料中,原子与磁场分量的相互作用很弱(特别是在高频下),一般被忽略不计。正因为如此,电磁波在超材料中表现出奇特的光学特性和诱人的应用前景。

2008 年,巴斯大学在微结构光纤孔洞内引入金属制作复合微结构光纤^[29],继而被悉尼大学深入研究,扩展到金属/塑料复合的拉伸超材料(纤维超材料)波导,并逐渐进入各国学者的视线^[30-39],开辟了太赫兹纤维波导技术研究的一个新方向。

图 3^[34]是拉伸超材料研究测得的实验结果。其中图 3(a)简单描述了拉伸超材料的结构及成型过程。图 3(b)是金属线阵超材料的端面结构图以及不同尺寸超材料的透过特性,结果表明,可调的等离子特性实现了高通滤波,高于超材料的等离子频率时,电介质特性导致了高的透过性;而低于等离子频率时,金属性导致了高的折射特性,通过改变金属线的直径和间距,就可以根据频率来调整其性质。图 3(c)是开口环拉伸超材料的磁共振特性结果。通过对 3 种不同结构和尺寸的开口环结构超材料进行研究,超材料对方向平行于纤维轴的磁场均表现出了磁通特

性,并得到了不同的磁导率,由此说明拉伸超材料可实现较强的磁共振。通过金属线阵的等离子体特性实现的在电场方面的高透过性,以及磁场方面利用2种材料的开口环结构实现磁通特性,相当于高的磁场透过性,而且两种性质都是在THz波段显现,因而作为THz波导,至少其理论上的特性是很优异的,实际制备上虽然比较困难,但是如果特性足以弥补加工难度或高成本的缺点,这种类型的THz波导还是很有前景的。

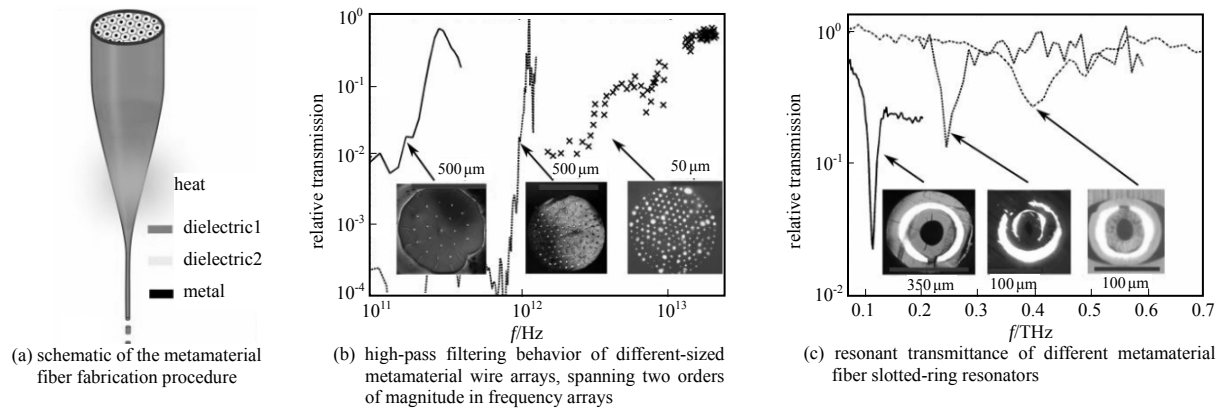


Fig.3 Experimental results

图3 实验结果

2 结论

太赫兹技术是近年来科学界研究的重点和热点之一,其中太赫兹波的高效、柔性传输是其中的一个亟待解决的问题。通过对太赫兹纤维波导技术的研究过程进行分析和总结,作者把迄今为止的研究分为3个阶段。首先,学者们从现有的材料中挑选了一些金属和塑料的丝或管状物,实验证明其具有传播太赫兹波的性质,但由于各种原因,几乎没有实际应用的可能性。然后,研究人员设想通过微结构来消除上述弊端,同样因为传输带宽和损耗的原因也不能理想地用于实际中。最后,超材料的概念和研究方法被引入太赫兹纤维波导中,研究了拉伸超材料的磁响应和电响应特性,成功实现了拉伸超材料对磁导率的调谐。这有望研制出低损耗、柔性、低价的太赫兹纤维波导,并实现应用。

参考文献:

- [1] Frankel M Y, Gupta S, Valdmanis J, et al. Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(6): 910-916.
- [2] McGowan R W, Gallot G, Grischkowsky D. Propagation of ultrawideband short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides[J]. Optics Letters, 1999, 24(20): 1431-1433.
- [3] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, et al. Terahertz waveguides[J]. JOSA B, 2000, 17(5): 851-863.
- [4] WANG K, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. Nature, 2004, 432(7015): 376-379.
- [5] WANG K, Mittleman D M. Guided propagation of terahertz pulses on metal wires[J]. JOSA B, 2005, 22(9): 2001-2008.
- [6] Ung B, Mazhorova A, Dupuis A, et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B848-B861.
- [7] Mendis R, Grischkowsky D. Plastic ribbon THz waveguides[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(7): 4449-4451.
- [8] CHEN L, CHEN H, KAO T, et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding[J]. Optics Letters, 2006, 31(3): 308-310.
- [9] LAI C, Hsueh Y, CHEN H, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3457-3459.
- [10] LU J, YU C, CHANG H, et al. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(6): 064105-064105-3.
- [11] Anthony J, Leonhardt R, Argyros A, et al. Characterization of a microstructured Zeonex terahertz fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(5): 1013-1018.
- [12] Atakaramians S, Afshar V S, Nagel M, et al. Direct probing of evanescent field for characterization of porous terahertz fibers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(12): 121104-121104-3.
- [13] Atakaramians S, Afshar V S, Ebendorff-Heidepriem H, et al. THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14053-15062.

- [14] Dupuis A,Stoeffler K,Ung B,et al. Transmission measurements of hollow-core THz Bragg fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011,28(4):896-907.
- [15] 严国锋. 微结构光纤光栅及太赫兹波导器件应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014. (YAN Guo-feng. Applications of microstructured fiber gratings and THz waveguide devices[D]. Hangzhou,Zhejiang,China:Zhejiang University, 2014.)
- [16] 韩婷婷. 基于功能材料填充的微结构光纤特性调控机理及其应用研究[D]. 天津:南开大学, 2013. (HAN Ting-ting. Research on the mechanisms and applications of the properties controlling in functional materials filled microstructured optical fibers[D]. Tianjin,China:Nankai University, 2013.)
- [17] 徐焰. 基于光子晶体光纤的多功能太赫兹波导研究[D]. 太原:太原科技大学, 2013. (XU Shao. Multifunctional terahertz waveguide research based photonic crystal fiber[D]. Taiyuan,Shanxi,China:Taiyuan University of Science &Technology, 2013.)
- [18] 章乐. 基于介质柱型光子晶体波导的太赫兹功能器件研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013. (ZHANG Le. Research on terahertz functional devices based on photonic crystal waveguide formed by dielectric rods[D]. Hangzhou,Zhejiang,China: Zhejiang University, 2013.)
- [19] 汪静丽. 太赫兹波传输及光子晶体光纤温度传感的研究[D]. 天津:天津大学, 2011. (WANG Jing-li. Study on the propagation of terahertz wave and photonic crystal fiber temperature sensing[D]. Tianjin,China:Tianjin University, 2011.)
- [20] 耿优福. 太赫兹波的差频产生及低损耗传输波导的研究[D]. 天津:天津大学, 2009. (GENG You-fu. Study on difference-frequency generation of terahertz waves and low loss waveguides for terahertz transmission[D]. Tianjin,China: Tianjin University, 2009.)
- [21] 钟任斌. 太赫兹传输线研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (ZHONG Ren-bin. Study of terahertz transmission lines [D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [22] 侯宇. 太赫兹光纤功能器件的设计与研究[D]. 天津:南开大学, 2013. (HOU Yu. Design and research on terahertz fiber functional device[D]. Tianjin,China:Nankai University, 2013.)
- [23] 牛之果. 太赫兹光子晶体光纤的理论分析与制作[D]. 杭州:浙江大学, 2007. (NIU Zhi-guo. Theoretical study and fabrication on terahertz photonic crystal fiber[D]. Hangzhou,Zhejiang,China:Zhejiang University, 2007.)
- [24] 李晓文. 太赫兹源及太赫兹波导的理论和实验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2012. (LI Xiao-wen. Experimental and theoretical study on terahertz source and terahertz waveguide[D]. Zhengzhou,Henan,China:Zhengzhou University, 2012.)
- [25] 金龙. 微结构光纤光栅的理论、实验与应用研究[D]. 天津:南开大学, 2008. (JIN Long. Theoretical, experimental, and applied research on the microstructure fiber grating[D]. Tianjin,China:Nankai University, 2008.)
- [26] 郭璇. 微结构光纤光栅免标记生物传感特性的理论研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013. (GUO Xuan. Theoretical research on the label-free biosensor characteristic of the microstructured optical fiber grating[D]. Qinhuangdao,Hebei, China:Yanshan University, 2013.)
- [27] 吴志芳. 微结构光纤模式控制机理和应用研究[D]. 天津:南开大学, 2013. (WU Zhi-fang. Investigation on mechanisms and applications of mode controlling in microstructured optical fibers[D]. Tianjin,China:Nankai University, 2013.)
- [28] 王志辉. 新型太赫兹导波结构特性研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (WANG Zhi-hui. Characterization of novel terahertz guided wave structures[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [29] HOU J,Bird D,George A,et al. Metallic mode confinement in microstructured fibres[J]. Optics Express, 2008,16(9): 5983-5990.
- [30] Uniz A,Lwin R,Argyros A,et al. Direct-drawn metamaterial fibers with magnetic response in the 100 GHz range[C]// Australian Optical Society Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2011. Sydney,Australia:Optical Society of America, 2011:C676.
- [31] Tuniz A,WANG A,Hunt P,et al. Drawn metamaterial fibers with negative permeability[C]// 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO 2011). Piscataway,NJ:IEEE Computer Society, 2011:08855-1331.
- [32] Tuniz A,Kuhlmey B T,Lwin R,et al. Drawn metamaterials with plasmonic response at terahertz frequencies[J]. Applied Physics Letters, 2010,96(19):191101.
- [33] Tuniz A,Lwin R,Argyros A,et al. Fabricating metamaterials using the fiber drawing method[J]. Journal of Visualized Experiments, 2011(68):284-288.
- [34] Tuniz A,Kaltenecker K J,Walther M,et al. Fiber metamaterials:recent advances and outlook[C]// 3rd Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications. Sigtuna,Sweden:Optical Society of America, 2013:F2-F5.

- [35] Fleming S, Tuniz A, Argyros A, et al. Metamaterials drawn in fibers[C]// 2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference(OECC). Busan, Korea:IEEE, 2012:795–796.
- [36] Fleming S, Tuniz A, Argyros A, et al. Metamaterials Fabricated by Drawing[C]// 2012 Conference on Lasers and Electro-Optics. Piscataway, USA:Optical Society of America, 2012:M1N–M5N.
- [37] Tuniz A, Pope B, Wang A, et al. Spatial dispersion in three-dimensional drawn magnetic metamaterials[J]. Optics Express, 2012,20(11):11924–11935.
- [38] Tuniz A, Pope B, Argyros A, et al. Spatial dispersion management in three-dimensional drawn magnetic metamaterials[J]. Optics Express, 2012,20(11):11924–35.
- [39] Tuniz A, Lwin R, Argyros A, et al. Stacked-and-drawn metamaterials with magnetic resonances in the terahertz range[J]. Optics Express, 2011,19(17):16480–16490.

作者简介:



孔德鹏(1982–), 男, 西安市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为聚合物微结构光纤的设计、制作工艺等.email:kongdp@opt.ac.cn.

苗 竟(1991–), 男, 陕西省咸阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为聚合物微结构光纤的制备.

何晓阳(1983–), 男, 湖北省嘉鱼县人, 博士, 主要研究方向为超材料、太赫兹天线技术.

王丽莉(1957–), 女, 西安市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为特种聚合物光纤、聚合物微结构光纤及其应用.

张晓冬(1980–), 男, 郑州市人, 在读博士研究生, 研究方向为聚合物微结构光纤设计.

陈 琦(1981–), 男, 重庆市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为光子晶体、太赫兹天线技术.

(上接第 791 页)

作者简介:



唐 焱(1983–), 女, 长春市人, 工程师, 主要研究方向为返波管振荡器研制.email:tangye1983@163.com.

冯进军(1966–), 男, 山西省运城市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的研究工作, 研究的器件包括毫米波空间行波管、W波段行波管、太赫兹真空器件、铯束管等.