

太赫兹波导的研究进展

钟任斌, 周俊, 刘盛纲

(电子科技大学太赫兹研究中心 成都 610054)

【摘要】太赫兹(THz)有丰富的科学内涵和独特的优越特性,在物理、化学、电子信息、生命科学、材料科学、天文学、大气与环境监测、通讯雷达、国家安全与反恐等多个领域具有重要的应用前景。由于水汽对THz波的强烈吸收,适用于不同应用需求的THz波导成为急需。根据不同需求并考虑各种不同结构及材料波导特有的优势与缺陷,扬长避短选取合适的波导将有利于发挥THz科学技术在科学研究、生产、生活中的应用特色。该文对现有THz金属空腔波导、金属线波导、介质波导和其他THz波导的研究情况进行了综述,以期展现当前THz波导的研究情况,开拓研究思路。

关键词 介质波导; 金属波导; 光子晶体波导; 太赫兹; 传输线

中图分类号 O44

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.015

Research Development of Terahertz Waveguides

ZHONG Ren-bin, ZHOU Jun, and LIU Sheng-gang

(Terahertz Science and Technology Research Center, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract There are rich scientific connotation and unique features in Terahertz (THz) spectrum, which lead to many important applications such as physics, chemistry, electric information, biomedicine, material science, astronomy, atmosphere and environment monitoring, communication and radar, national security and anti-terrorism, etc. THz waveguides suitable for different applications are urgent due to the strong vapor absorption of THz waves in the open air. Each THz waveguide has its most suitable applications according to its unique advantages and limitations, a rational choice will definitely facilitate the application of THz inscience research, manufactures, and lives efficiently. This paper presents an overview on research development of some typical waveguides such as THz metal cavity waveguides, metal wire waveguides, dielectric waveguides, and so on.

Key words dielectric waveguides; metal waveguides; photonic crystal waveguides; terahertz; transmission line

太赫兹(THz)波是指频率在0.1~10 THz(波长为30~3 000 μm , 1 THz=10¹² Hz)范围内的电磁波。它在长波段与毫米波(亚毫米波)相重合,在短波段与红外线相重合,具有丰富的科学内涵。

一套先进的光学或微波毫米波应用系统中,电磁波的传输通道——波导是不可或缺的关键组成部分,THz系统亦然。随着THz科技的发展,它在物理、化学、电子信息、生命科学、材料科学、天文学、大气与环境监测、通讯雷达、国家安全与反恐、等多个重要领域具有的独特优越性和巨大的应用前景逐渐显露。由于太赫兹波的独特特性,如水汽等对THz波有强烈吸收,使THz空间传输应用受限,因此研究适于不同应用需求的THz波导成为急需,也促进了各类THz波导研究的发展。

根据 THz 波在电磁波谱中处于红外与微波毫米波之间的特殊位置,光波段以及微波毫米波段已成熟的波导技术被尝试移植到 THz 波段,如利用各种截面形状的金属或介质波导、光纤、光子晶体等的全封闭、半封闭或开放传输技术实现 THz 传输。本文综述了国内外 THz 波导研究的发展现状。

1 THz波导研究现状

1.1 金属腔和平行金属板THz波导

1999年,McGowan研究小组首先成功地将THz波耦合进直径为240 μm 、长为24 mm的不锈钢圆金属波导中,在0.65~3.5 THz范围内实现了总能量吸收系数低于1 cm^{-1} 的THz传输^[1](耦合到波导的能量为入射能量的40%)。该波导对THz的吸收损耗远低于

收稿日期: 2011-11-21; 修回日期: 2012-01-15

基金项目: 国家重大基础研究项目(2007CB310401); 教育部博士点基金(20100185110022)

作者简介: 钟任斌(1973-),女,博士生,主要从事赫兹传输及相关元器件方面的研究。

于包括共面传输线等波导,实验装置如图1所示,利用标准THz时域光谱(THz-TDS)搭建。研究表明该波导传输模式达25个以上,为多模传输,截止频率为0.62 THz,其中主要传输模式为 TE_{11} 、 TE_{12} 、 TM_{11} 。文献[1]还研究了矩形不锈钢金属波导的THz传输,使用横截面积为 $250\ \mu\text{m}\times 125\ \mu\text{m}$ 、长度为25 mm的矩形波导,测得其总能量吸收系数小于 $0.5\ \text{cm}^{-1}$,波导内传输模式达35个以上,其中主要传输模式为 TE_{10} 、 TE_{30} 、 TM_{12} 。以上两种金属波导对THz的吸收损耗较小,其主要不足之处是THz在其中传输的群速度色散较大,采用导电率更高的金属材料制备波导可获得更低的损耗。

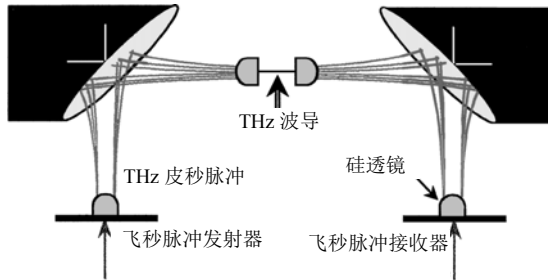


图1 金属波导耦合实验装置图

2003年,文献[2]研究了在半径为8 mm的裸空心Cu波导内壁涂覆铁电聚偏氟乙烯(PVDF)的传输特性,在传输1 THz脉冲时衰减为 $0.015\ \text{cm}^{-1}$,是相同规格Cu波导衰减($0.045\ \text{cm}^{-1}@1\ \text{THz}$)的1/3,这是因为某些铁电材料(如 SrTiO_3)和聚合物材料的介电常数在THz频段变得非常高,从而可获得高反射率和小损耗。

针对文献[1]发现的圆形和方形金属波导传输的色散问题,2001年,文献[3-4]采用平行平面金属波导有效地抑制了群速度色散的影响。将0.3 ps的THz脉冲入射到长为24.4 mm、板间距为0.108 mm的铜平行平面波导中,在0.1~4 THz范围内,观察到无失真、低损耗单个横电磁模式(TEM模)的传输。实验装置类同于图1,所得的实验结果如图2所示,分别测量了两半柱面镜之间无平行平面金属波导和放置不同长度的平行平面金属波导时的THz脉冲输出,可看出三者的输出脉冲非常相似,且脉冲展宽也都很小,可见该种波导损耗和色散较小。该波导的频率响应范围也很宽,能实现宽频传输,但电磁能量可从板间空隙泄漏。2009年,文献[5]研究了利用该平行平面金属波导有效地传输 TE_1 模式THz波,在克服该模式的低频截止($f_c=c/(2nb)$,其中 c 为真空中光速, n 为板间介质折射率, b 为板间距)和截止频率附近的色散问题后,可获得dB/km的超低欧姆损耗;

并提出将平行平面变形为平行凹面板传输结构,如图3所示,以改善其能量泄漏,利于更长距离的传输应用。

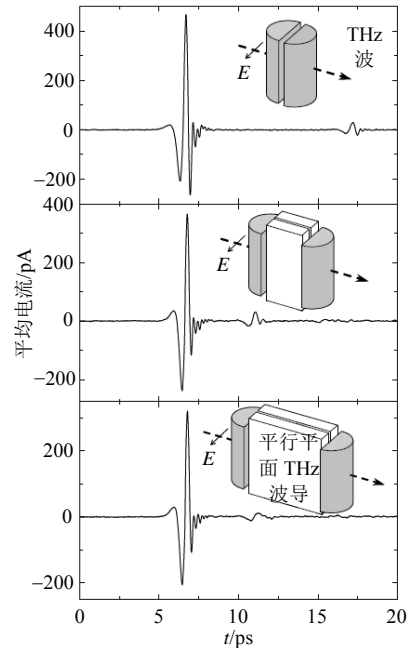


图2 平行平面金属波导传输图

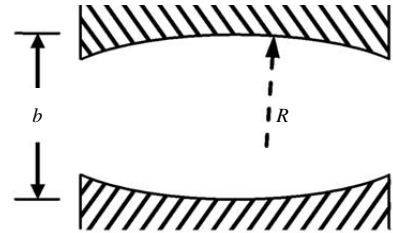


图3 变形的平行平面金属波导横截面图

1.2 金属线THz波导

单金属线传输线是一种结构非常简单的THz波导。从2004年开始,文献[6-8]实现了几乎无色散、平均损耗系数小于 $0.03\ \text{cm}^{-1}$ 的不锈钢单金属线传输。实验表明THz波在金属线中传输4 cm和24 cm后几乎没有形变,且衰减常数随传输频率的增大而减小,与普通金属波导衰减常数随传输频率的增大而变大有所不同。

利用直径0.9 mm的金属线实现THz的传播与探测,该装置可用作THz内窥镜,如图4所示。由图4a、4b可见,THz波被耦合进金属丝的一端,分别经与其成 90° 和 45° 的平面镜反射后,由另一端金属线输出并被探测,由此获得腔底部和腔侧壁的信息,实物图如图4c所示。文献[7]使用直径为0.9~6 mm的金属线做了实验,发现金属线的形状对THz波的传播特性影响不大,主要为电导率的影响。文献[9]采用铜线在0.1~1 THz获得了小于 $0.002\ \text{cm}^{-1}$ 的衰减。在

此基础上,文献[10]表明在金属线上涂覆适当介质层有利于THz波的传输。

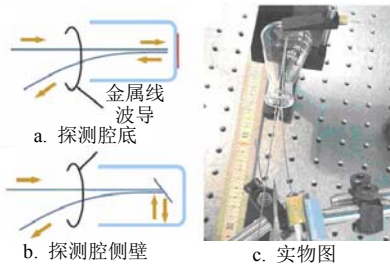


图4 THz波在金属线波导中的传播与探测图

理论研究表明在单金属线上传播的THz波为Sommerfeld波,这种波一般只存在于具有有限电导率的金属表面,是一种径向对称的弱导表面波^[11-12],因此具有较大的弯曲损耗,且波在传输过程中容易受周围环境和金属器件的影响。由于常用THz辐射源一般为线偏振,单金属线THz波导的输入耦合效率较低,设计适当的耦合输入结构以适应其径向对称的偏振传输模式是其应用的一个难点。针对上述问题,文献[13]设计出径向对称光导天线以增加金属线波导与自由空间THz波的耦合效率,如图5所示。另外,在不锈钢线耦合区域开槽,利用开槽数量和槽间距控制THz波与金属线波导的耦合^[14],如图6所示,还可利用准波长同轴孔输入提高耦合效率^[15]。

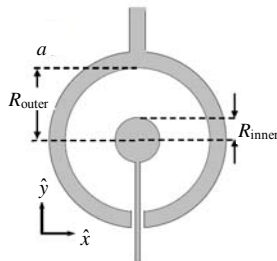


图5 径向对称光导天线

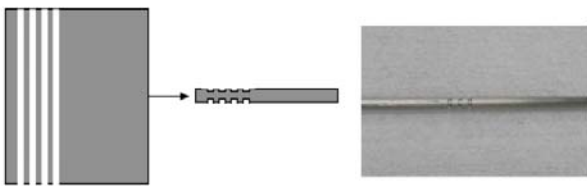


图6 不锈钢线耦合区域开槽增强耦合

针对金属单线弯曲损耗大的缺点,文献[16]提出双金属线THz波传输线,如图7所示,线偏振THz辐射以45°角斜射入第3根与两传输线相同、但垂直于两线之间的金属线上,实现了输入耦合。由于两线间的传输场存在耦合,因此与线外场存在相位差,其弯曲损耗比单金属线传输的弱导Sommerfeld波小得多。实验测得65 cm长双线传输线在不同曲率时输出脉冲波形差别不大,且与直波导输出比较峰值线平

缓,证明双线传输线在THz波段弯曲损耗小。采用9.5 cm长300 Ω的商用TV双线进行双线THz传输实验,结果如图8所示,在90°弯曲时,传输频率上限可达0.2 THz^[17]。由于双线传输两线间场呈线偏振,输出为偶极子形式,与双线传输的基模TEM模式理论吻合,所以该传输线也更易于与普通辐射源耦合。

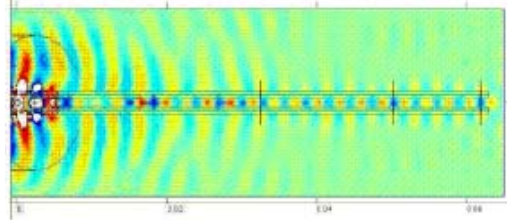


图7 双线传输线电场在z-x平面的x分量图

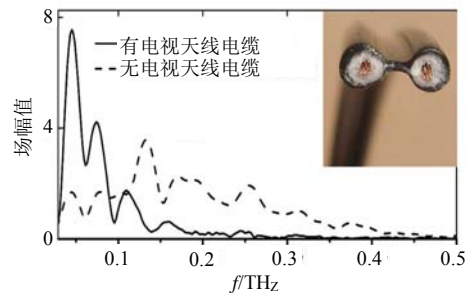


图8 采用9.5 cm长的商用TV双线进行双线传输的实验结果

实验和理论研究表明,优化双线尺寸及线间距,双线传输可获得与单金属线及平行板波导相近的低衰减常数。其基模传输具有损耗低、无色散、宽带宽等特点^[18-20]。因此,THz双线传输线是一种结构简单、易于加工、使用灵活方便,有很强实用潜力的THz传输线。

1.3 介质波导

在THz频段也可用全介质作为波导^[21-22],包括各种形状、结构的介质空腔波导和实心波导。介质空腔波导的传输原理与传统光纤类似,也称为THz光纤。根据光波段的研究经验,选取介电常数合适的介质波导可获得比金属波导更低的吸收,且相对于金属波导可延展低频极限;另外,介质波导耦合比金属波导好,易产生线偏振模,实现单模传输。但一般介质波导在THz频段的损耗比光频段大得多。研究表明,单晶蓝宝石、碳板、塑料等是THz频段的较低衰减材料。2000年,文献[23]利用直径为325 μm、长为7.3 mm的单晶蓝宝石光纤,在0.8~3.5 THz实现了衰减小于1 cm⁻¹的传输。

THz介质空心波导的横截面形状一般为圆形和矩形,也有一些变化形式。相对于金属波导由于管内壁粗糙而造成传输损耗大等问题,介质管空心波

导具有损耗小、柔韧性好等特点,但是弯曲造成的附加损耗较大^[24]。在介质基管内镀金属膜为一种较好的解决办法,当金属膜厚大于趋肤深度时,该结构的空心光纤在传输原理上与金属管波导相同,但是由于金属膜表面比金属管内壁光滑,镀金属膜介质波导的损耗比金属管波导小,且由于采用了介质材料作为基管,该结构波导的柔韧性也较好,在THz波段可支持TE₁₁模的传输。内径为1 mm的镀银空心光纤,在190~250 μm波段损耗为7.5~8.0 dB/m;实验测得当波导以15 cm半径弯曲90°时,即使是小半径情况,弯曲造成的附加损耗也小于0.5 dB;内径为3 mm的镀铜空芯聚碳酸酯介质波导在波长158.31 μm(1.89 THz)时损耗为3.9 dB/m^[25-26];另外还可在介质基管内分层镀介质膜和金属膜,称为介质/金属空心光纤,介质膜增加了金属表面的反射率,从而大大降低了光纤的传输损耗。文献[27]报道了在镀银的硅空芯光纤中再加镀聚苯乙烯(Polystyrene, PE)膜提高传输效率的研究,当PE膜厚取最优值时,该光纤支持HE₁₁模的传输,膜厚为17.2 μm时,衰减常数为1.9 dB/m,该值远小于仅镀银膜时的5.4 dB/m衰减。一般认为THz介质波导并不适合像光纤一样的长距离传送THz波。

2006年,文献[28]利用直径为200 μm的塑料作为纤芯,空气作为包层,制作了THz塑料线波导,即实心介质波导。用该塑料线波导传输0.3 THz脉冲,获得了小于0.01 cm⁻¹的衰减。采用合适的直径波长比(0.2/1),减少进入介质的能量,可获得更低的衰减,且可实现单模传输,自由空间耦合效率就可达20%,结合离轴透镜可更好地与常用THz辐射源耦合,提高使用灵活、可靠性。塑料线THz波导由于结构简单、使用材料的价格低廉,被认为是一种有重要实用前景的THz波导。

1.4 光子晶体THz波导

近年来,光子晶体也被应用到THz波的传播研究中^[29-31]。光子晶体的材料对工作波段的光的吸收很小,当在光子晶体中引入缺陷时,就会在原来不导通的带隙中出现共振本征模,在有缺陷的光子晶体中,光子晶体只让具有特定频率的波通过,在直波导中能够实现几乎零反射和零损耗的传输。利用在THz频段吸收很小的材料如聚合物等,可研制低色散、低损耗的光子晶体THz波导。

现在已出现了用于THz波传播的一维和二维光子晶体^[32-33],其中比较常见的是THz二维光子晶体波导,如图9a所示。三维THz光子晶体结构和特性

以文献[34]报道为例,由有序堆叠的介质棒构成,每4层为一个结构周期,结构如图9b所示,光子带隙为0.37~0.52 THz。光子晶体使集成化THz波导及器件成为可能。

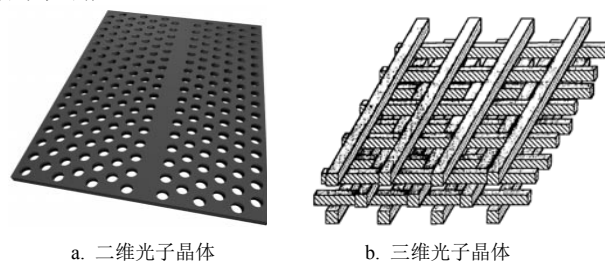


图9 典型光子晶体THz波导结构

此外,光子晶体光纤也成为THz的波导研究的重要方向^[35],按照导光原理可分为带隙波导型光子晶体光纤和全内反射型光子晶体光纤两类;按照包层空气孔的排布结构可分为矩形、正方形、圆形、环形、三角(或六角)、蜂窝及其他结构的光子晶体光纤;按照所用材料可分为石英、塑料及由其他材料组成的光子晶体光纤。

2008年,文献[36]提出一种用聚四氟乙烯管非固定层叠构造的中空(微孔)光纤传输THz波,该光纤能将THz波限定于中小孔内,并能获得小于0.01 cm⁻¹的衰减(包括耦合损耗和传输损耗),最靠近中心一层聚四氟乙烯管对带宽等影响最大,其结构如图10所示。文献[37]采用聚甲基丙烯酸甲酯微结构作为椭圆形空心光纤包层的微结构光纤,其传输损耗低于0.9 dB/cm。蛛网结构等的THz光子晶体光纤如图11所示。

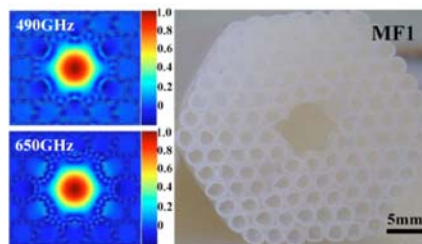


图10 空气孔及外径比为1.68/2.08的微孔结构光纤

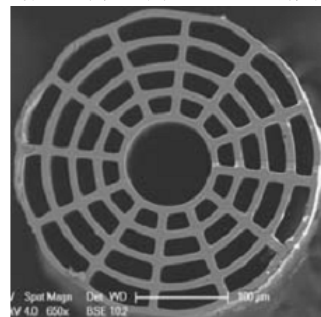


图11 蛛网结构光纤

1.5 其他THz波导

基于波长和亚波长微结构特别是亚波长周期阵列结构的表面等离子体传输和仿表面等离子体传输也成为THz波传输的一种新结构^[38-40], 该结构能有效地将传输能量囿于传输线表面, 不仅可用于THz传输, 还可应用于THz近场成像、光谱和传感等。

还有许多其他新的传输结构尝试, 如图12所示。2006年, 文献[41]提出一种介质波导, 可利用介质空隙中(两方形介质之间空隙或圆柱介质中心的小孔)空气的介电常数与介质介电常数的大反差将传输波约束于空隙中传播, 能获得相对高的模式限制和较低的传输损耗。

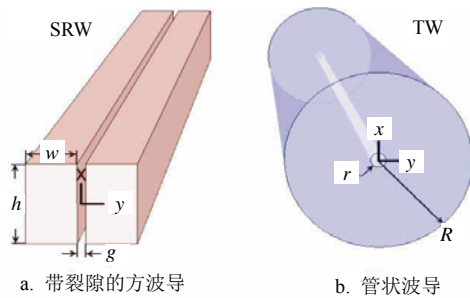


图12 介质波导结构图

2 结束语

THz科学技术的进一步发展以及THz本身具有的丰富科学内涵, 使其应用成为可能和急需。作为THz系统中不可或缺的波导及相关功能器件的研究成为影响其应用发展的关键环节之一。了解各种结构波导特定的优势与缺陷, 根据不同需求选取合适的波导, 将有利于发挥THz科学技术在科学研究、生产、生活中的应用。

参考文献

- [1] GALLOT G, JAMISON S P, MCGOWAN R W, et al. Terahertz waveguides[J]. *J Opt Soc Am B*, 2000, 17(5): 851-863.
- [2] HIDAKA T, MINAMIDE H, ITO H, et al. Ferroelectric PVDF cladding terahertz waveguide[J]. *Proc SPIE in Optical Information, Data Processing and Storage, and Laser Communication Technologies*, 2003, 5135: 70-77.
- [3] MENDIS R, GRISCHKOWSKY D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(11): 846-848.
- [4] MENDIS R, GRISCHKOWSKY D. THz interconnect with low loss and low group velocity dispersion[J]. *IEEE Microwave & Wireless Comp Lett*, 2001, 11(11): 444-446.
- [5] MENDIS R, MITTLEMAN D M. An investigation of the lowest-order transverse-electric (TE₁) mode of the parallel-plate waveguide for THz pulse propagation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(9): A6-A13.
- [6] WANG K, MITTLEMAN D M. Guided propagation of terahertz pulses on metal wires[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, 22(9): 2001-2008.
- [7] WANG K, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432: 376-379.
- [8] ASTLEY V, SCHEIMAN J, MENDIS R, et al. Bending and coupling losses in terahertz wire waveguides[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(4): 553-555.
- [9] CAO Q, JAHNS J. Azimuthally polarized surface plasmons as effective terahertz waveguides[J]. *Opt Exp*, 2005, 13(2): 511-518.
- [10] GONG M, JEON T I, GRISCHKOWSKY D. THz surface wave collapse on coated metal surfaces[J]. *Opt Exp*, 2009, 17(19): 17088-17101.
- [11] SOMMERFELD A. Ueber die fortpflanzung elektrodynamischer wellen längs eines drahtes[J]. *Ann Phys Chem*, 1899, 303(2): 233-290.
- [12] JEON T I, ZHANG J, GRISCHKOWSKY D. THz sommerfeld wave propagation on a single metal wire[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 161904-161906.
- [13] DEIBEL J A, WANG K, ESCARRA M D, et al. Enhanced coupling of terahertz radiation to cylindrical wire waveguides[J]. *Opt Exp*, 2006, 14(1): 279-290.
- [14] CAO H, NAHATA A. Coupling of terahertz pulses onto a single metal waveguide using milled grooves[J]. *Opt Exp*, 2005, 13(18): 7028-7034.
- [15] AGRAWAL A, NAHATA A. Coupling terahertz radiation onto a metal wire using a subwavelength coaxial aperture[J]. *Opt Exp*, 2007, 15(14): 9022-9028.
- [16] MBONYE M K, ASTLEY V, CHAN W L, et al. A terahertz dual wire waveguide[C]//Lasers and Electro-Optics Conference. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- [17] TANNOURI P, PECCIANI M, LAVERTU P L, et al. Quasi-TEM mode propagation in twin-wire THz waveguides[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(11): 110013.
- [18] MBONYE M, MENDIS R, MITTLEMAN D M. A terahertz two-wire waveguide with low bending loss[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(23): 233506.
- [19] ASTLEY V, SCHEIMAN J, MENDIS R, et al. Bending and coupling losses in terahertz wire waveguides[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(4): 553-555.
- [20] ZHONG Ren-bin, ZHOU Jun, LIU Wei-hao, et al. Theoretical investigation of a terahertz transmission line in bipolar coordinate system[J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 55(1): 35-42.
- [21] SKOROBOGATIY M, DUPUIS A. Ferroelectric all-polymer hollow Bragg fibers for terahertz guidance[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(11): 113514.
- [22] LAI C H, HSUEH Y C, CHEN H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3457-3459.
- [23] JAMISON S P, MCGOWAN R W, GRISCHKOWSKY D. Single mode waveguide propagation and reshaping of subps terahertz pulses in sapphire fibers[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(15): 1987-1989.
- [24] TANG X L, SHI Y W, MATSUURA Y, et al. Transmission

- characteristics of terahertz hollow fiber with an absorptive dielectric inner-coating film[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(14): 2231-2233.
- [25] HARRINGTON J A , GEORGE R , MUELLER E, et al. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. *J Opt Exp*, 2004, 12(2): 5263-5368.
- [26] ITO T , MATSUURA Y , ITO H, et al. Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses[J]. *Opt Soc Am B*, 2007, 24(5): 1230-1235.
- [27] BOWDEN B , HARRINGTON J A , MITROFANOV O. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmiss of terahertz radiation[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(20): 2945-2947.
- [28] 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.
- [29] LI Shu-guang, LIU Xiao-dong, HOU Lan-tian. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(11): 2811-2817.
- [30] LOU Shu-qin, FANG Hong, JIAN Shui-sheng. Polyethylene photonic crystal fibers as terahertz waveguides[J]. *Proc of SPIE*, 2005, 6019: 601941.
- [31] GOTO M, QUEMA A, TAKAHASHI H, et al. Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. *Jpn J Appl Lett*, 2004, 43(2B): 317-319.
- [32] NEMEC H, DUVILLARET L, GARET F, et al. Thermally tunable filter for terahertz range based on a one-dimensional photonic crystal with a defect[J]. *J Appl Phys*, 2004, 96(8): 4072-4075.
- [33] IMADA M, NODA S, CHUTINAN A, et al. Channel drop filter using a single defect in a 2-D photonic crystal slab waveguide[J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(5): 873-878.
- [34] OZBAY E, MICHEL E, TUTTLE G, et al. Terahertz spectroscopy of three-dimensional photonic band-gap crystals[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(15): 1155.
- [35] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [36] LU Ja-Yu, YU Chin-ping, CHANG Hung-chung, et al. Terahertz air-core microstructure fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(16): 064105.
- [37] PONSECA C S, POBRE R, ELMER E, et al. Transmission of terahertz radiation using a microstructured polymer[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(9): 902-904.
- [38] MAIER S A, ANDREWS S R, MORENOL M, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires[J]. *Phys Rev Let*, 2006, 97(17): 176805 .
- [39] MORENO E, RODRIGO S G, BOZHEVOLNYI S I, et al. Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons[J]. *Phys Rev Let*, 2008 , 100(2): 023901.
- [40] LYSENKO S I , SNOPOK B A , STERLIGOV V A. Scattering of surface plasmon polaritons and volume waves by thin gold films[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2010, 108(4): 581-590.
- [41] NAGEL M, MARCHEWKA A, KURZ H. Low-index discontinuity terahertz waveguides[J]. *Opt Exp*, 2006, 14(21): 9944-9954.

编辑 黄 莘