

利用3D打印技术制备太赫兹器件

杨晶, 龚诚, 赵佳宇, 田浩琳, 孙陆, 陈平, 林列, 刘伟伟*
(南开大学现代光学研究所 光信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要:高性能的太赫兹器件在控制太赫兹波方面起到重要的作用,因此寻求一种简单有效的太赫兹器件加工方案非常必要。本文以太赫兹波导和太赫兹滤波器为例,分别选用 Kagome 型光子晶体结构的波导和一维光子晶体结构的滤波器,运用商用的3D打印机加工样品,并采用透射式太赫兹时域光谱系统对样品的参数进行测量。实验结果表明:加工的波导在 0.2 ~ 1.0 THz 范围内传输损耗平均值约为 0.02 cm^{-1} ,最小值可达到 0.002 cm^{-1} ,且可运用机械拼接的方式将多个波导进行简单的连接从而获得更长的波导而不引起严重的损耗;滤波器的透射谱在 0.1 ~ 0.5 THz 之间有两个明显高损耗带;这两组实验结果均与理论预计非常接近。本文运用太赫兹波导和滤波器的实例证实了3D打印技术加工太赫兹器件的可行性,将会成为获取性能可控、价格低廉的太赫兹器件的有效途径。

关键词:3D打印;太赫兹波导;太赫兹滤波器;太赫兹光谱

中图分类号:TP305;O441 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20171001.0077

Fabrication of terahertz device by 3D printing technology

YANG Jing, GONG Cheng, ZHAO Jia-yu, TIAN Hao-lin, SUN Lu, CHEN Ping, LIN Lie, LIU Wei-wei*

(*Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300350, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liuweimei@nankai.edu.cn*

Abstract: High performance terahertz devices play an essential role in controlling terahertz waves to realize diverse applications. Here we report our work on the design of THz devices manufactured by a commercially available 3D printer, and the parameters of samples are measured by transmission terahertz time-domain spectroscopy system. Taking terahertz waveguide and terahertz filter as examples, Kagome photonic crystal waveguide and one-dimensional photonic crystal structure filter are chosen respectively, and we experimentally demonstrate that the obtained waveguide features average power propagation loss of 0.02 cm^{-1} (the minimum is

收稿日期:2016-09-12;修订日期:2016-10-11

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(No. 2014CB339802);国家自然科学基金资助项目(No. 11574160);天津市应用基础与前沿科技研究计划资助项目(No. 15JCZDJC31700);国家青年科学基金资助项目(No. 61505087)

Supported by National Basic Research Program of China(No. 2014CB339802); National Natural Science Foundation of China(No. 11574160); Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (No. 15JCZDJC31700); National Science Foundation for Young Scientists of China(No. 61505087)

about 0.002 cm^{-1}) in the range of $0.2 - 1.0 \text{ THz}$. More interesting, it could be simply mechanically spliced to obtain longer waveguides without causing serious loss. Besides, Terahertz filter features two apparent high loss bands between $0.1 - 0.5 \text{ THz}$. The transmission characteristics of both the waveguide and the filter are well predicted by the corresponding numerical simulation. The fabricated approach of THz devices based on the 3D printing technique will be a promising solution to fabricate terahertz device with well controllable characteristics and low cost.

Key words: 3D printing; terahertz waveguide; terahertz filter; terahertz spectroscopy

1 引言

近年来,太赫兹(THz)信号的产生技术^[1-3]与探测技术^[4-5]已取得很大的进步。太赫兹波的优势在宽带通信、生物成像、医学诊断和国土安全测量等领域显示出巨大的应用前景^[6-7]。太赫兹波的应用离不开太赫兹器件的支撑,因此,发展一种简单有效的 THz 器件加工技术是非常必要的。

3D 打印是一项正在制造业领域迅速发展的新兴技术,被称为“具有工业革命意义的制造技术”^[8]。3D 打印是一个从电脑模型直接到制造成型的过程,它以数字模型文件为基础,通过连接电脑与 3D 打印设备从而将数字模型直接输入到 3D 打印设备中,打印机运用粉末状金属或者塑料等材料,通过逐层打印的方法来构造 3D 实体,这给样品的快速成型带来无限可能^[9-11]。

目前,使用 3D 打印技术加工太赫兹器件已经得到关注^[12-17],包括透镜^[12-13]、相位板^[14]波导^[14-18]等。本文以太赫兹波导和太赫兹滤波器为例来验证 3D 打印技术加工太赫兹器件的可行性。2011 年,Z. Wu 等研究人员通过聚合物喷射快速成型法加工而得的太赫兹电磁晶体波导^[18]。2014 年,N. Yudasari 等研究人员在 3D 打印机加工的空芯波导的基础上,添加了金属线从而获得一种混合波导结构^[16]。本文选用的波导是 Kagome 型光子晶体结构,由于微结构光纤纤芯和包层的可控性使其在光纤化学和生物化学传感应用方面具有较大的潜力^[19-22],因此,这种微结构的太赫兹波导拥有很大的吸引力。常见的加工方案,包括微加工^[23-25]、高温拉制^[26-27]、手工配装^[28-29]等,但其制备过程往往费时且价格昂贵,

是太赫兹波导发展所需克服的主要困难之一。滤波器选用的是简单的一维光子晶体结构^[30-31]。这种简单的滤波器结构仍需要仔细的拼装过程^[32-33]。W. Withayachumnankul^[32]和 J. Xu^[33]等研究人员分别在 2008 年和 2013 年制作了由硅片和空气层交替放置组合而成滤波器。研究人员分别使用开口圆环^[32]和不锈钢的垫片^[33]来构造空气层,此外,为了保证样品的稳定性,研究人员还使用高密度聚乙烯订制的支架^[32]和实验样品夹^[33]来将样品固定住。因此,寻求一种简单的滤波器制造方式仍需不断探索。

本文选用 3D 打印机来加工太赫兹波导和太赫兹滤波器样品,并采用透射式太赫兹时域光谱(Terahertz-Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)系统对样品的参数进行测量。实验结果进一步证实了 3D 打印技术是一种加工太赫兹器件的有效途径。这种打印与加工的结合有助于将长期处于实验室阶段的 3D 打印拓展到大规模的工业生产。在实际应用中,它可为特殊类产品进行订单化生产,改善传统的以开模具为主的生产方式,实现降低制造成本、缩短研发周期、提高市场竞争力的目的^[34]。

2 材料参数的实验表征

本文选用 Objet30 prime 公司的 3D 打印机来制备实验样品,该打印机在 x 和 y 方向的分辨率为 600 dpi,在 z 方向的分辨率为 900 dpi,原料为 Vero White Plus 聚合物。

大多数固体材料在太赫兹波段表现出 cm^{-1} 量级的较大损耗^[35],材料本身的特性非常重要。本文采用了图 1 所示的透射式 THz-TDS 系统^[36]

测量了聚合物材料块状样品(厚度 ~ 1 mm)的 THz 脉冲信号,并使用快速傅里叶变换将原始数据转换为频域数据,进而计算出聚合物材料在太赫兹频段下的折射率和吸收系数。

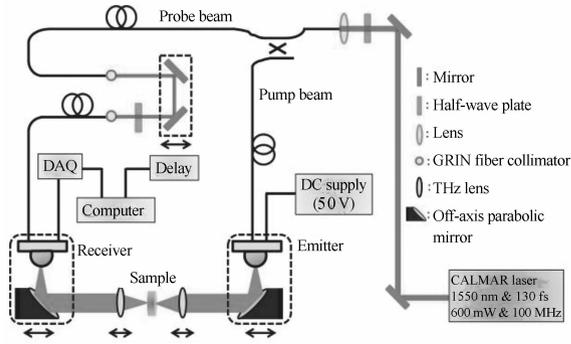
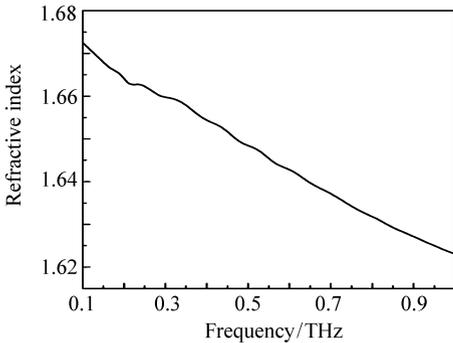


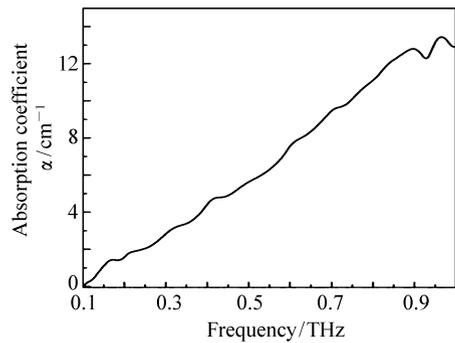
图 1 太赫兹时域光谱系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic of THz-TDS setup

材料的折射率和吸收系数可由下述公式计算



(a) 材料的折射率
(a) Refractive index for polymer



(b) 材料的吸收系数
(b) Absorption coefficient for polymer material recorded at room temperature

图 2 3D 打印所用聚合物的材料参数

Fig. 2 Characteristics of polymer used in 3D printing

3 太赫兹波导

3.1 波导样品制备

本文制作的是 Kagome 型光子晶体结构的波导^[39-40]。图 3(a)是理想波导横截面的结构示意图,纤芯为直径约为 9 mm 的空芯,包层为两层空气孔,如图 3(a)插图所示,空气孔的直径为 3 mm,壁厚为 0.35 mm。利用 3D 打印机加工的产品截面图,如图 3(b)所示,图 3(c)是长度分别

得到^[37-38]:

$$n_{\text{sam}}(\omega) = \frac{\Delta\varphi(\omega)c}{\omega l} + n_{\text{ref}}, \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{\text{sam}} - \varphi_{\text{ref}}$ 为实验测得的样品和参考的相位差, $l = 1$ mm, $n_{\text{ref}} = n_{\text{air}} = 1$ 。

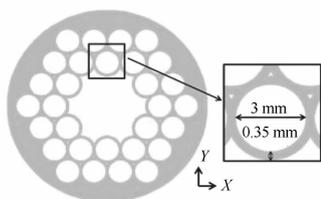
$$\alpha(\omega) = \frac{1}{l} \ln \left[\frac{I_{\text{ref}}(\omega)}{I_{\text{sam}}(\omega)} \right] + \frac{2}{l} \ln \left\{ \frac{4n_{\text{sam}}(\omega)}{[n_{\text{sam}}(\omega) + n_{\text{ref}}]^2} \right\}, \quad (2)$$

式中, $I_{\text{sam}}(\omega)$ 和 $I_{\text{ref}}(\omega)$ 分别为检测到的通过样品和通过空气的太赫兹强度大小,右边的第二项代表样品的表面反射。

材料的折射率和吸收系数计算结果如图 2(a)和 2(b)所示。从图 2(a)可以看出,在 0.1 ~ 1 THz 范围内折射率变化很小,与实验测得误差 (~ 0.02) 相当,因此在这种情况下实验所用材料的折射率可近似取一个固定值 1.65。

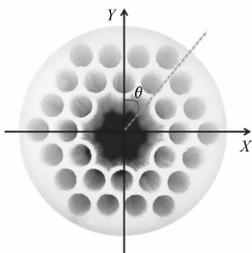
为 10 cm、20 cm 和 30 cm 的 3 个波导样品。

由于我们选用的 3D 打印机所能加工的样品最大尺寸为 30 cm,因此如何获得更长的样品是值得考虑的问题。本文采取了一种简单的方案,即通过机械方式连接波导,这种方式相对较快且不需要像熔接机这种昂贵的专用设备^[41]。如图 3(d)所示,我们将 10 cm 和 20 cm 的两个波导对接并插入一个塑料管中,该塑料管也是由 3D 打印机制备的,它的内径略大于波导的外径,使得拼接波导能被很好地固定。



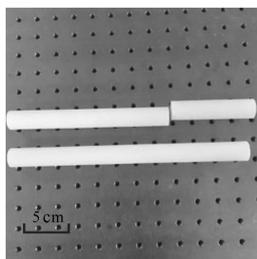
(a) 理想波导横截面结构示意图

(a) Cross section of the ideal waveguide design



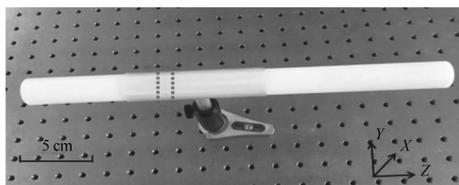
(b) 波导样品的截面图

(b) Photograph of cross sectional view of a fabrication THz waveguide



(c) 长度分别为 10 cm、20 cm 和 30 cm 的波导样品

(c) Photograph of full view of three waveguides with length of 10 cm, 20 cm and 30 cm, respectively



(d) 拼接波导

(d) Photograph of concatenated waveguide

图 3 太赫兹波导的设计和制备测量系统原理图

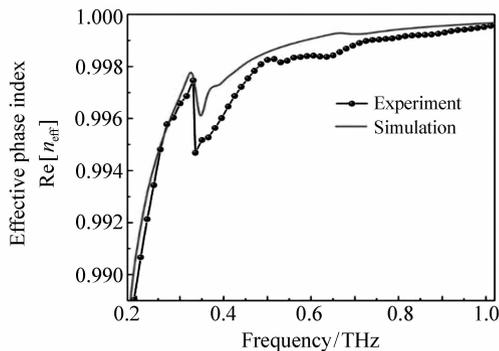
Fig. 3 Principle diagram of THz waveguide design and fabrication

3.2 波导样品特性研究

本实验使用的 THz-TDS 的装置是可重构的, 它的 THz 光路长度可以调整, 以插入不同长度的波导。如图 1 所示, 太赫兹发射器、接收器和两个太赫兹透镜均安装在可在导轨上移动的滑动座上。太赫兹透镜将平行的太赫兹光束聚焦到波导上, 这样输入耦合平面可保持固定, 波导的输出端

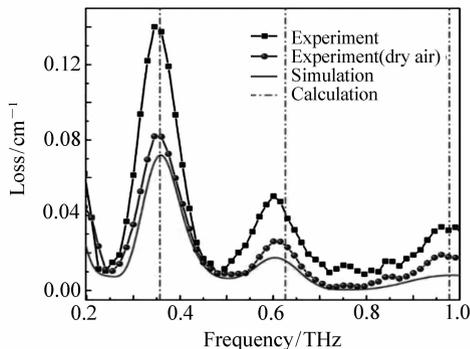
固定在另一个太赫兹透镜的焦点上, 这一端可以根据波导长度的不同适当平移。实验中, 为了获取波导的折射率信息, 需保持太赫兹发射器和探测器的位置不变并固定聚焦透镜, 测量不同长度的波导时, 可根据波导末端调整准直透镜位置, 但在测量波导传输损耗过程中, 还需调节太赫兹探测器的位置使其与准直透镜之间的距离保持不变。计算时分别将 10 cm 和 30 cm 的波导作为参考和样品。波导的有效折射率和传输损耗可分别由式(1)和式(2)计算, 在计算波导传输损耗时可忽略式(2)右边的第二项。本文运用基于有限元法的 COMSOL 软件来模拟波导的传输特性。通过模拟计算, 可直接得到纤芯基模的有效复折射率信息, 因此, 可进一步推算出波导有效相位折射率和传输损耗参数。

图 4 为波导的有效折射率和传输损耗曲线。



(a) 波导的有效折射率

(a) Measured and simulated effective refractive index of waveguides



(b) 波导的传输损耗

(b) Loss coefficients for 30 cm waveguide(using 10 cm waveguide as reference)

图 4 太赫兹波导的性能

Fig. 4 Characteristics of THz waveguide

如图4(a)所示,在0.2 THz到1.0 THz范围内,波导的有效折射率从0.99过渡到0.999,且在0.35 THz附近出现明显的下降,这与图4(b)中传输损耗曲线的高损耗峰的位置一致。在图4(b)中有3个明显的透射窗,分析干燥环境下的实验结果可得,3个透射窗的中心频率为:0.25 THz、0.51 THz和0.75 THz,对应的损耗值分别为 0.010 cm^{-1} 、 0.008 cm^{-1} 和 0.002 cm^{-1} 。值得一提的是,聚合物材料本身在这3个频率处的损耗分别为 2.080 cm^{-1} 、 5.754 cm^{-1} 和 10.114 cm^{-1} (见图2(b)),因此波导的传输损耗要远低于材料的吸收损耗,即便图4(b)中最大的两个损耗峰值 0.080 cm^{-1} 和 0.025 cm^{-1} 仍低于材料本身的吸收。上述的讨论都是建立在干燥的空气环境中,当实验室的空气存在一定湿度时,测得的传输损耗曲线将会出现整体上移趋势,当实验环境湿度约为35%时,仍可取得 0.0098 cm^{-1} 的最小损耗(0.486 THz)。

由图4可知,实验结果与理论分析变化一致,因此数值模拟的方法为我们波导的设计和性能预估提供很好的参考。且波导传输损耗曲线的高损耗峰位置(图4(b)3条垂直虚线)可由反谐振波导模型^[42]进行预测:

$$f_m = \frac{mc}{2t\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (3)$$

式中, t 为包层结构壁的厚度, n 为材料折射率, m 取整数, c 代表真空中光速。

为了进一步研究引起波导纤芯基模的损耗机制,我们分别对波导高低损耗区的纤芯基模模场分布进行分析。图5列出了4个不同频率下模拟的纤芯基模模场分布图。图5(b)和5(d)表明在高损耗区对应的频率0.345 THz和0.600 THz处的纤芯基模的部分能量耦合到结构壁中。相反地,图5(a)和5(c)表明在低损耗区对应的频率0.240 THz和0.480 THz处的模场能量主要集中在纤芯中,纤芯基模与包层几乎无耦合。

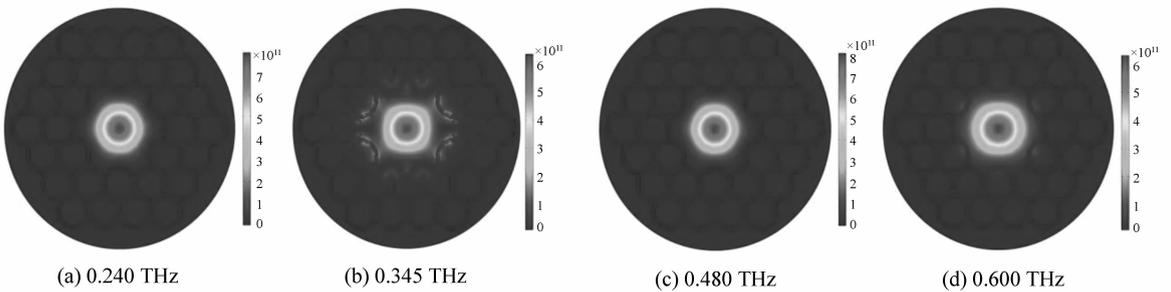


图5 模拟的纤芯基模模场分布

Fig. 5 Simulated core fundamental mode distributions

3.3 波导拼接

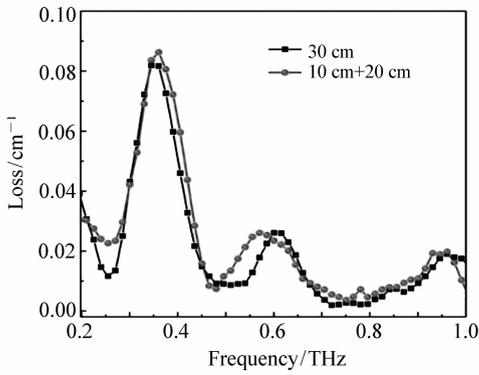
如上文3.1节所述,在不更改加工方案的基础上,可通过多个波导拼接来获得更长的波导样品,拼接效果如图3(d)所示。图6(a)为30 cm波导和由10 cm和20 cm拼接组成的30 cm波导的传输损耗曲线。实验表明,拼接并未引起很大的附加损耗,效果较好。

我们进一步研究了拼接波导的端面对齐情况对损耗曲线的影响,拼接波导的端面对齐情况可由图3(b)中的 θ 表示,当二者对齐时 θ 取 0° ,如图6(b)中所示, $\theta=0^\circ$ 、 20° 和 40° 对应的3条的损

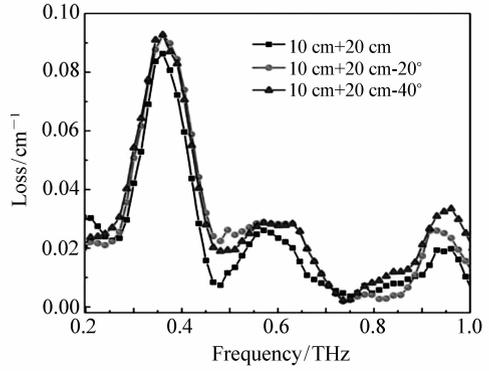
耗曲线趋势相近,只是当 $\theta \neq 0^\circ$ 时,损耗稍大一些,这主要由拼接的两个波导纤芯边界随意的叠加引起的。为了克服这一困难,实际中可以选择六边形作为波导完美匹配层的外边缘形状。

4 太赫兹滤波器

本文制作的另一种样品是太赫兹滤波器,关于一维光子晶体结构太赫兹滤波器的研究已有很多^[31-33]。这些实验表明周期结构的滤波器虽然结构简单,但是样品加工过程比较复杂,因此,本



(a) 相同长度单一波导和拼接波导的传播损耗曲线
(a) Loss coefficients of a single waveguide and a spliced waveguide with the same length



(b) 3 种对齐情况下拼接波导的传输损耗曲线
(b) Loss coefficients of a spliced waveguide with aligned, 20° and 40° misaligned core boundaries

图 6 拼接波导的性能测试

Fig. 6 Spliced waveguide characteristics

文将讨论运用 3D 打印技术加工太赫兹滤波器的方案。如图 7 所示,样品为 8 周期的 AB 型一维光子晶体结构, A 为聚合物材料,厚度为 $l_A = 0.4 \text{ mm}$,折射率 $n_A(\omega)$ 见图 2(a),吸收系数见图 2(b), B 为空气,厚度为 $l_B = 0.3 \text{ mm}$,折射率为 $n_B = 1.0$,每层的面积均为 $2 \times 2 \text{ cm}^2$,图 8 插图为 3D 打印的一个滤波器样品。

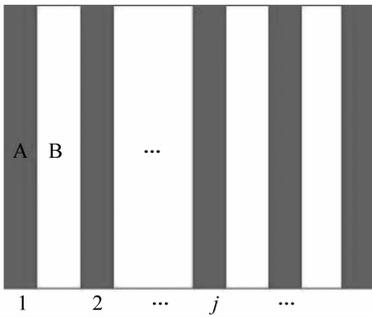


图 7 理想滤波器横截面结构示意图

Fig. 7 Cross section of the ideal filter design

样品的透过率可表示为:

$$T(\omega) = \frac{I_{\text{sam}}(\omega)}{I_{\text{ref}}(\omega)}. \quad (4)$$

实验测得的样品透射曲线如图 8 所示,其中最高和最低透射率分别为 60% 和 1.0%,还可观察到两个中心频率分别为 0.14 THz 和 0.30 THz 低损耗窗。此外,还可运用 FDTD 算法模拟样品透射特性。图 8 中两条垂直的虚线即为光学传输

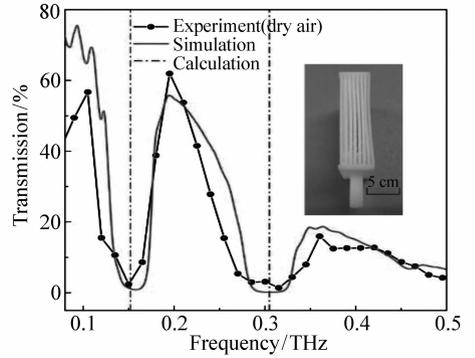


图 8 太赫兹滤波器样品及其透射谱

Fig. 8 THz filter fabrication and characteristics

矩阵的方法^[32]预测的高损耗带的中心位置。

5 结论

本文运用简单的 3D 打印技术加工了 Kagome 型光子晶体结构的波导和一维光子晶体结构的滤波器,并采用透射式太赫兹时域光谱系统对样品的参数进行测量。实验结果表明我们加工的波导在 0.2 ~ 1.0 THz 范围内传输损耗平均值约为 0.02 cm^{-1} ,最小值可达到 0.002 cm^{-1} ,可运用机械拼接的方式将多个波导进行简单的连接从而获得更长的波导且不引起严重的损耗;滤波器的透射谱在 0.1 ~ 0.5 THz 之间有两个明显高损耗带。波导和滤波器的实验测得的性能参数均与理论预

测很好地吻合,进而证实了3D打印加工太赫兹器件的可行性。随着THz技术的发展对高性能太赫兹器件的需求日益剧增,3D打印技术将会给THz器件制备带来技术的革新。

参考文献:

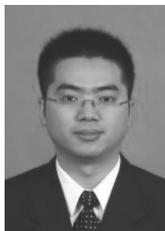
- [1] IMESHEV G,FERMANN M E,VODOPYANOV K L,*et al.*. High-power source of THz radiation based on orientation-patterned GaAs pumped by a fiber laser[J]. *Optics Express*,2006,14(10):4439-4444.
- [2] SHI W,HOU L,LIU Z,*et al.*. Terahertz generation from SI-GaAs stripline antenna with different structural parameters [J]. *J. Optical Society of America B*,2009,26(9):A107-A112.
- [3] TANG M,MINAMIDE M,WANG Y,*et al.*. Dual-wavelength single-crystal double-pass KTP optical parametric oscillator and its application in terahertz wave generation[J]. *Optics Letters*,2010,35(10):1698-1700.
- [4] 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.
- [5] KARPOWICZ N E,CHEN J,TONGUE T,*et al.*. Coherent millimeter wave to mid-infrared measurements with continuous bandwidth reaching 40 THz[J]. *Electronics Letters*,2008,44(8):544-545.
- [6] TONOUCHE M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*,2007,1(2):97-105.
- [7] ABBOTT D,ZHANG X C. Scanning the issue: T-Ray imaging, sensing, and detection[J]. *Proc. IEEE*,2007,95(8):1509-1513
- [8] 于磊,文春华. 基于3D打印的THz波导成型技术研究进展[J]. *微波学报*,2015,3:61-64.
YU L,WEN CH H. Research advance of prototyping of terahertz waveguides based on 3D printing[J]. *J. Microwaves*, 2015,3:61-64. (in Chinese)
- [9] KODAMA H. Automatic method for fabricating a 3-dimensional plastic model with photo-hardening polymer[J]. *Review of Scientific Instruments*,1981,52(11):1770-1773.
- [10] SACHS E,CIMA M,WILLIAMS P,*et al.*. 3-Dimensional printing-rapid tooling and prototypes directly from a CAD model [J]. *ASME J. Engineering for Industry*,1992,114(4):481-488.
- [11] 张敏,刘畅,任博,等. 3D打印激光制备多孔镍合金组织和力学性能研究[J]. *中国光学*,2016,9(3):335-341.
ZHANG M,LIU C,REN B,*et al.*. Microstructure and mechanical properties of porous Ni alloy fabricated by laser 3D printing[J]. *Chinese Optics*,2016,9(3):335-341. (in Chinese)
- [12] BUSCH S,WEIDENBACHE M,FEY M,*et al.*. Optical properties of 3D printable plastics in the THz regime and their application for 3D printed THz optics[J]. *J. Infrared,Millimeter,Terahertz Waves*,2014,35(12):993-997.
- [13] SQUIRES A,CONSTABLE E,LEWIS R. 3D printed terahertz diffraction gratings and lenses[J]. *J. Infrared,Millimeter,Terahertz Waves*,2015,36(1):72-80.
- [14] WEI X,LIU C,ZHANG Z,*et al.*. Orbit angular momentum encoding at 0.3 THz via 3D printed spiral phase plates[J]. *SPIE*,2014,9275:92751P-8.
- [15] PANDEY S,GUPTA B,NAHATA A. Terahertz plasmonic waveguides created via 3D printing[J]. *Optics Express*,2013, 21(21):24422-24430.
- [16] YUDASARI N,ANTHONY J,LEONHARDT R. Terahertz pulse propagation in 3D-printed waveguide with metal wires component[J]. *Optics Express*,2014,22(21):26042-26054.
- [17] VOGT D W,ANTHONY J,LEONHARDT R. Metallic and 3D-printed dielectric helical terahertz waveguides[J]. *Optics Express*,2015,23(26):33359-33369.
- [18] WU Z,NG W,GEHM M,*et al.*. Terahertz electromagnetic crystal waveguide fabricated by polymer jetting rapid prototyping[J]. *Optics Express*,2011,19(5):3962-3972.
- [19] MONRO T M,RICHARDSON D J,BENNETT P J. Developing holey fibers for evanescent field devices[J]. *Electronics Letters*,1999,35(14):1188-1189.
- [20] FINI J M. Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids[J]. *Measurement Science and Technology*,2004,

- 15(6),1120-1128.
- [21] ARGYROS A, VAN EIJKELBORG M A, LARGE M C J, *et al.*. Hollow-core microstructure polymer optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2):172-174.
- [22] COX F M, ARGROS A, LARGE M C J. Liquid-filled hollow core microstructured polymer optical fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9):4135-4140.
- [23] ANTHONY J, LEONHARDT R, LEON-SAVAL S G, *et al.*. THz propagation in Kagome hollow-core microstructured fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19):18470-18478.
- [24] SETTI V, VINCETTI L, ARGYROS A. Flexible tube lattice fibers for terahertz applications[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3):3388-3399.
- [25] LAI C H, YOU B, LU J Y, *et al.*. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. *Optics Express*, 2010, 18(1):309-322.
- [26] WANG K, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015):376-379.
- [27] NORDQUIST C D, WANKE M C, ROWEN A M, *et al.*. Design, fabrication, and characterization of metal micromachined rectangular waveguides at 3 THz[C]. *IEEE AP-S Int. Symp.*, San Diego, CA, USA:2008:1-4.
- [28] GOTO M, QUEMA A, TAKAHASHI H, *et al.*. Teflon photonic crystal fiber as Terahertz waveguide[J]. *Japanese J. Applied Physics*, 2004, 43:L317-L319.
- [29] WU Z, KINAST J, GEHM M E, *et al.*. Rapid and inexpensive fabrication of terahertz electromagnetic bandgap structures [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21):16442-16451.
- [30] HE J, LIU P, HE Y, *et al.*. Narrow bandpass tunable terahertz filter based on photonic crystal cavity[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(6):776-779
- [31] TURCHINOVICH D, KAMMOUN A, KNOBLOCH P, *et al.*. Flexible all-plastic mirrors for the THz range[J]. *Applied Physics A*, 2002, 74(2):291-293.
- [32] WITHAYACHUMNANKUL W, FISCHER B M, ABBOTT D. Quarter-wavelength multilayer interference filter for terahertz waves[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(9):2374-2379.
- [33] XU J, CHEN L, ZANG X, *et al.*. Triple-channel terahertz filter based on mode coupling of cavities resonance system[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(16):161116.
- [34] 董莘, 赵寒梅, 吴冈. “打印-加工”一体式 3D 打印技术的研究[J]. *行业应用与交流*, 2015, 34(12):98-105.
DONG S, ZHAO H M, WU G. Study of 3D print technology in “3D print-cutting process” combining[J]. *Industrial Applications and Communications*, 2015, 34(12):98-105. (in Chinese)
- [35] JIN Y S, KIM G, JEON S G. Terahertz dielectric properties of polymers[J]. *J. Korean Physical Society*, 2006, 49(2):513-517.
- [36] YANG J, HE S, ZHAO J, *et al.*. Polarization-dependent optimization of fiber-coupled terahertz time-domain spectroscopy system[J]. *J. Electronic Science and Technology*, 2015, 13(1):2-5.
- [37] ZHAO J, ZHANG Y, WANG Z, *et al.*. Propagation of terahertz wave inside femtosecond laser filament in air[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(9):095302.
- [38] CHEN J, CHEN Y, ZHAO H, *et al.*. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1 – 2.8 THz[J]. *Optics Express*, 2007, 15(19):12060-12067.
- [39] YANG J, YANG B, WANG Z, *et al.*. Design of the low-loss wide bandwidth hollow-core terahertz inhibited coupling fibers [J]. *Optics Communications*, 2015, 343(15):150-156.
- [40] YANG J, ZHAO J, GONG C, *et al.*. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagome photonic crystal structure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20):22454-22460.
- [41] YABLANS A D. *Optical Fiber Fusion Splicing*[M]. Heidelberg:Springer-Verilog Press, 2005.
- [42] LITCHINITSER N M, ABEELUCK A K, HEADLEY C, *et al.*. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. *Optics Letters*, 2002, 27:1592-1594.

作者简介:



杨晶(1990—),女,江苏淮安人,博士研究生,2012年于南京信息工程大学获得学士学位,主要从事太赫兹光谱分析方面的研究。E-mail: yangjingxqq@126.com



刘伟伟(1976—),男,江苏淮安人,博士,教授,博士生导师,2005年于加拿大拉瓦尔大学获得博士学位,主要从事超快光子与光谱成像方面的研究。E-mail: liuweimei@nankai.edu.cn

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org