

引用格式: MU Qi-yuan, ZHU Yuan-feng, XUE Lu, *et al.* Research on Partial Negative Curvature Terahertz Hollow-core Waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9):0923001

穆启元, 祝远锋, 薛璐, 等. 部分负曲率太赫兹空芯波导研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(9):0923001

## 部分负曲率太赫兹空芯波导研究

穆启元<sup>1,2</sup>, 祝远锋<sup>3</sup>, 薛璐<sup>4</sup>, 张亚妮<sup>4,5</sup>, 孔德鹏<sup>1</sup>, 贺正权<sup>1</sup>, 刘红军<sup>1</sup>, 王丽莉<sup>1</sup>

(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, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

(4 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

(5 陕西科技大学 文理学院, 西安 710021)

**摘要:**提出了一种新型部分负曲率反谐振空芯太赫兹波导, 波导包层包括两部分, 一部分由介质圆管组成, 为纤芯提供部分负曲率边界; 另一部分由多个矩形介质层组成, 多介质层可用来降低限制损耗. 此波导结构在增加反谐振层的同时不引入新的包层节点, 易于实现太赫兹波的宽带低损耗传输. 采用全矢量有限元法对波导进行了数值仿真, 研究了其宽带低损耗特性. 基于此, 利用 3D 打印技术制备了所设计波导, 使用太赫兹时域光谱系统对其传输特性进行测试. 实验结果表明, 该负曲率太赫兹波导在 0.29~0.42 THz 的传输损耗低于 10 dB/m, 与数值仿真结果吻合较好.

**关键词:**太赫兹; 负曲率; 波导; 3D 打印; 太赫兹时域光谱系统

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0923001

## Research on Partial Negative Curvature Terahertz Hollow-core Waveguide

MU Qi-yuan<sup>1,2</sup>, ZHU Yuan-feng<sup>3</sup>, XUE Lu<sup>4</sup>, ZHANG Ya-ni<sup>4,5</sup>, KONG De-peng<sup>1</sup>,  
HE Zheng-quan<sup>1</sup>, LIU Hong-jun<sup>1</sup>, WANG Li-li<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 The School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

(4 School of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts & Science, Baoji, Shaanxi 721016, China)

(5 School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** A novel partial negative curvature anti-resonance hollow-core terahertz waveguide is proposed. The waveguide cladding consists of two parts, one part is composed of a dielectric circular tube, which provides a part of the negative curvature boundary for the core; the other part is composed of a plurality of rectangular dielectric layers, and multiple dielectric layers for reducing confinement loss. This waveguide structure does not introduce a new cladding node while adding anti-resonant layers, and it is easy to achieve broadband low-loss transmission of terahertz waves. The full vector finite element method is used for the numerical simulation of the waveguide, and the broadband low loss characteristic is investigated. Based on the simulation analysis, the designed waveguide is printed via 3D printing technology, and the transmission characteristics are tested using a terahertz time-domain spectroscopy

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.11504416, 11474351, 61275106, 61535015)

第一作者: 穆启元(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为低损耗负曲率空芯太赫兹波导. Email: muqiyuan2017@opt.cn

导师(通讯作者): 孔德鹏(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为特种塑料光纤及器件. Email: kongdp@opt.ac.cn

收稿日期: 2019-12-16; 录用日期: 2020-07-13

system. Experimental results show that the transmission loss of this negative curvature anti-resonance terahertz waveguide is less than 10 dB/m in the range of 0.29~0.42 THz, which is in good agreement with the numerical simulation.

**Key words:** Terahertz; Negative curvature; Waveguide; 3D printing; Terahertz time-domain spectroscopy system

**OCIS Codes:** 230.7370; 040.2235; 060.2280; 120.4820; 130.5460

## 0 引言

太赫兹(THz)波是一种介于微波和远红外波之间(约 0.1~10 THz)的电磁波,在通信、安全、材料表征、成像、医疗等多个领域有其独特的优势和潜在的应用价值<sup>[1]</sup>.然而太赫兹的高效传输一直是一个难题,虽然太赫兹在干燥空气中的传输损耗可以忽略不计,但其在自由空间中传输时易受空气中水分影响<sup>[2]</sup>.相比之下,用波导进行太赫兹波的传输,则具有不受外界环境的影响和可灵活弯曲等优点,但也存在材料的吸收损耗高<sup>[3]</sup>、波导结构复杂不易制作等缺点.为降低材料的吸收损耗,太赫兹波导多设计为纤芯中空或者多孔结构,从而使绝大部分的太赫兹波在纤芯的空气中传输.

负曲率波导是一种新型的波导结构,其具有包层结构简单和传输带宽宽等优点.目前负曲率波导的研究已经取得了很大的进步,SULTANA J<sup>[4]</sup>等设计的单层五管环结构负曲率波导在 0.35~0.53 THz 频段内的损耗低于 0.1 dB/m,HASANUZZAMAN G K M<sup>[5]</sup>等研究了一种嵌套型负曲率波导结构,利用嵌套环来增加对太赫兹波的约束能力,降低限制损耗,在 0.8~1.2 THz 范围内,损耗低于 5 dB/m.北京交通大学的 LU W<sup>[6]</sup>等利用 Zeonex 管制作了纤芯直径分别为 3.3 mm、4 mm 和 3.8 mm,长均为 20 cm 的三个波导,其中纤芯直径为 3.8 mm 的波导在 0.35 THz 附近的损耗低于 5 dB/m.有文献研究表明<sup>[7]</sup>,在一定的范围内,波导中基模的限制损耗随管环直径的增大而减小.但管环直径的增大到与纤芯直径相近时,管环面积接近于纤芯面积,管环中的模式会与纤芯中的模式发生耦合,导致损耗增加.

本文提出了一种新型的部分负曲率反谐振的波导结构,在垂直方向上采用多层等间隔矩形介质层作为反谐振层来降低限制损耗,且多反谐振层之间无连接点,避免了由连接点所引起的包层模的产生,同时也避免了常见负曲率光纤无法通过不断增加管环直径来降低限制损耗的问题,从而确保 THz 波的宽带低损耗传输.矩形层提供无曲率平坦的纤芯边界,介质圆管提供部分负曲率的纤芯边界,多矩形介质层与介质圆管共同组成了波导的包层结构.利用全矢量有限元法结合完美匹配层边界条件,对波导结构进行仿真优化,同时也对所设计的波导进行了 3D 打印制备和实验测试.

## 1 波导的几何形状

波导横截面结构示意图如图 1(a),图中蓝色填充区域是材料,白色区域是空气.在垂直方向上引入六个等间距等厚度的矩形介质层作为反谐振层,利用多层反谐振来降低限制损耗.水平方向上的两个介质圆管增加纤芯与边界的距离,同时提供一个负曲率的反谐振层,来减少纤芯模式的泄露.最外层的介质管起固定波导结构作用,两个介质圆管和多矩形介质层构成了波导的包层,太赫兹波被束缚在中心的空气中进行传输.波导的外径  $D$  为 17.6 mm,介质圆管的外径  $d$  为 3.43 mm,矩形介质层之间的距离  $d_1$  为 1.35 mm,介质圆

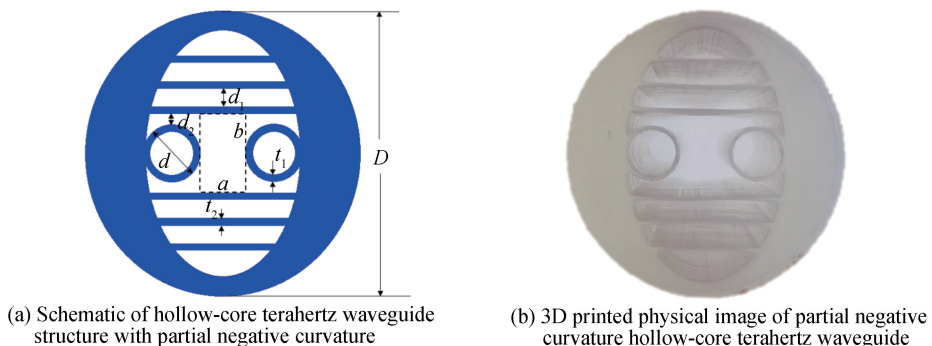


图 1 部分负曲率空芯太赫兹波导结构

Fig.1 Image of hollow-core terahertz waveguide structure with partial negative curvature

管与矩形介质层的距离  $d_2$  为 0.85 mm, 介质圆管的壁厚  $t_1$  为 0.22 mm, 矩形介质层  $t_2$  为 0.24 mm, 纤芯是一个长  $a$  为 3 mm、宽  $b$  为 5.13 mm 的矩形. 图 1(b) 是按照图 1(a) 的尺寸 3D 打印的部分负曲率太赫兹波导的实物图.

## 2 数值仿真

首先利用全矢量有限元法计算所设计波导的模式有效折射率, 结合完美匹配层边界条件降低周围环境和材料对限制损耗的影响, 在数值仿真中整体计算区域划分网格总数为  $\sim 50\ 000$  个单元. 计算 0.35 THz 下的纤芯  $x$  和  $y$  偏振基模模场功率分布分别如图 2(a) 和 (b) 所示, 图 2(a) 中水平箭头代表电场, 竖直箭头代表磁场, 图 2(b) 中竖直箭头代表电场, 水平箭头代表磁场. 可以观察到模场功率很好地束缚在纤芯, 这对于太赫兹波的低损耗传输是非常必要的.

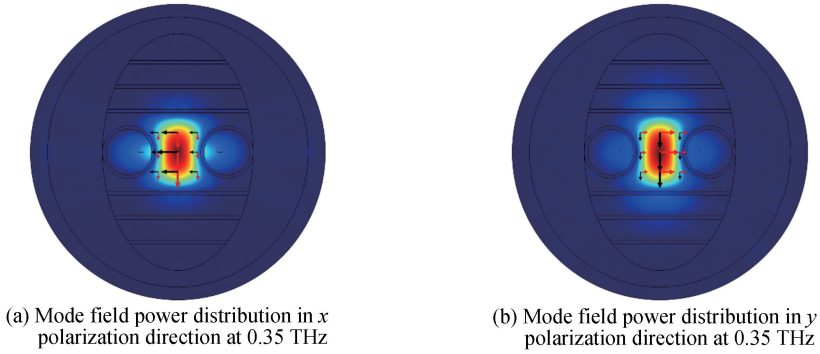


图 2 0.35 THz 下  $x$  和  $y$  偏振方向的模场功率分布

Fig.2 Power distribution of  $x$  and  $y$  polarization modes at 0.35 THz

波导的损耗主要由限制损耗 (Confinement loss,  $\alpha_{CL}$ ) 和有效材料损耗 (Effective material loss,  $\alpha_{EML}$ ) 构成, 限制损耗  $\alpha_{CL}$  可以通过模式有效折射率的虚部计算出来, 其表达式为<sup>[8]</sup>

$$\alpha_{CL} = 8.686 \left( \frac{2\pi f}{c} \right) \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ dB/m} \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速,  $f$  为频率,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  是导模的有效折射率虚部.

波导的有效材料损耗  $\alpha_{EML}$  则是波导材料对 THz 的吸收造成的损耗<sup>[5]</sup>, 模式能量在材料中分布的比例越高,  $\alpha_{EML}$  越大.

$$\alpha_{EML} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\int_{A_{\text{mat}}} n \alpha_{\text{mat}} |E|^2 dA}{2 \int_{A_{\text{all}}} \mathbf{S}_z dA} \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别是真空中的介电常数和磁导率,  $n$  为波导材料的折射率,  $\alpha_{\text{mat}}$  为波导材料的吸收系数,  $\mathbf{S}_z$  是沿传播方向上的坡印廷矢量. 式(2)  $A$  为积分区域, 分母的积分区域是在全部区域  $A_{\text{all}}$  上进行的, 而分子的积分区域只在波导材料  $A_{\text{mat}}$  上.

数值仿真中所用波导材料  $n$  的折射率和吸收系数  $\alpha_{\text{mat}}$  是由实验测试结果拟合所得, 利用 3D 打印机打印厚度分别为 1 mm、2 mm、3 mm 的薄片, 打印所用原料是 Clear V4 型号的树脂. 之后用太赫兹时域光谱系统对其进行表征, 数据处理后得到其折射率和吸收系数随频率变化的曲线, 对曲线进行拟合, 得到 Clear V4 树脂的折射率和吸收系数随频率变化的关系式, 其中频率的单位为 THz.

$$n = 0.0183f^3 - 0.11708f^2 + 0.13297f + 1.536 \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{mat}} = (1.7125f^3 - 2.79618f^2 + 6.12148f - 1.34504) \text{ cm}^{-1} \quad (4)$$

图 3(a) 和 (b) 给出了两偏振态基模的限制损耗和有效材料损耗随频率的变化曲线, 从图 3(a) 中可以看出, 当频率小于 0.35 THz 时, 限制损耗随频率减小而增加, 这是由于频率减小导致波长变长, 波导难以将其束缚住, 使得限制损耗增加. 而当频率大于 0.45 THz 时, 限制损耗呈现随频率增加而增加的趋势, 为分析这一现象, 计算波导的一阶谐振频率  $f_c$ <sup>[9]</sup>.

$$f_c \approx c / (2t \sqrt{n^2 - 1}) \quad (5)$$

式中,  $c$  为光速,  $t$  为反谐振层壁厚,  $n$  为波导材料的折射率. 由式(3)知, 波导材料的折射率是随频率变化的, 0.29~0.52 THz 对应的折射率为 1.563~1.576, 且在 0.49~0.53 THz 范围内折射率近似于 1.576. 取  $n = 1.576$ , 利用式(5)计算  $t = 0.22$  mm(介质圆管壁厚)和  $t = 0.24$  mm(矩形介质层壁厚)时的谐振频率, 分别为 0.56 THz 和 0.51 THz. 由此可知, 高频处限制损耗增加是因为此时的频率接近于波导的一阶谐振频率, 无法满足反谐振条件. 同时由于  $x$  偏振的谐振频率高于  $y$  偏振, 故在 0.45~0.52 THz 频段范围内  $x$  偏振的限制损耗低于  $y$  偏振的限制损耗.

从图 3(b)中可以看出, 两偏振模的有效材料损耗相差不大, 二者有效材料损耗都是随着频率的增加逐渐增加. 一方面是因为频率增加, 模场分布在材料中的比例变高, 导致有效材料损耗增加; 另一方面, 从式(4)可知, 波导材料本身的吸收系数是随频率增加而增加的. 图 3(c)给出总损耗(等于限制损耗和有效材料损耗的和)随频率的变化曲线, 在宽带范围内, 两偏振模都呈现了低损耗的特性. 在 0.3~0.48 THz 范围内, 两偏振模的损耗均低于 5 dB/m,  $x$  偏振模的最小损耗在 0.41 THz 处, 为 1.52 dB/m,  $y$  偏振模的最小损耗在 0.35 THz 处, 为 1.07 dB/m.

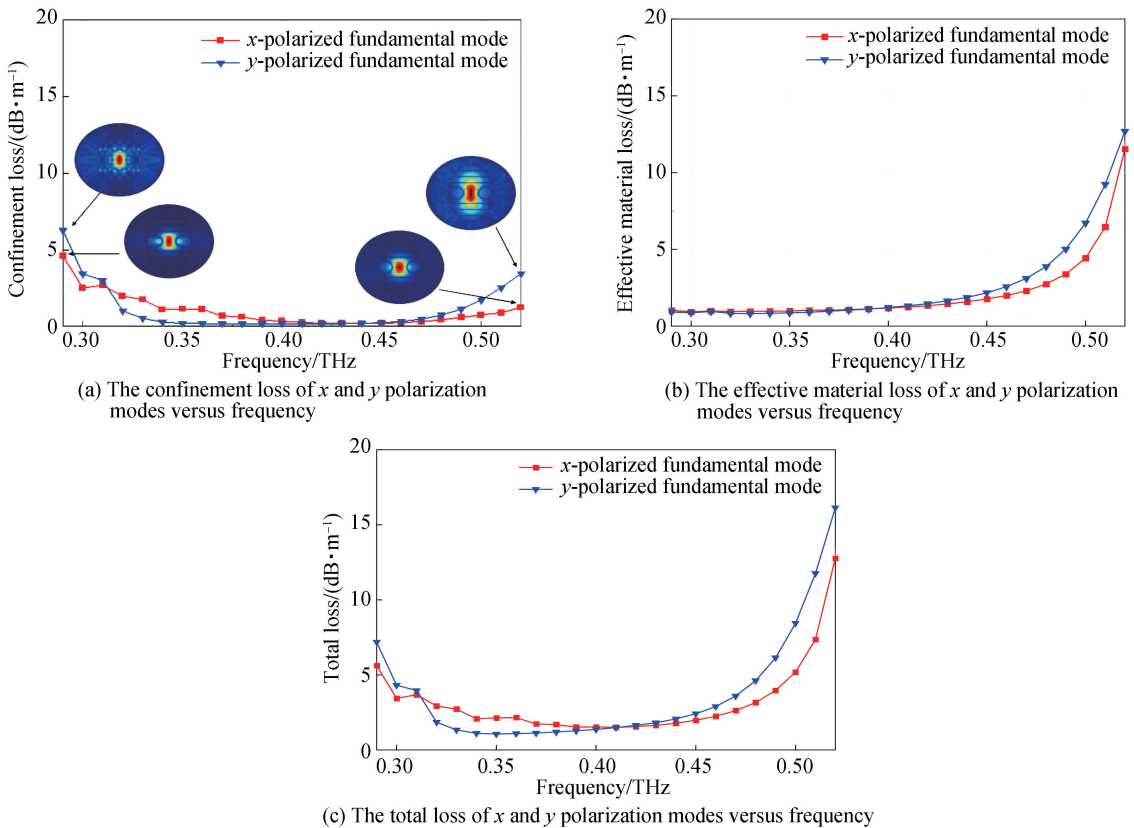
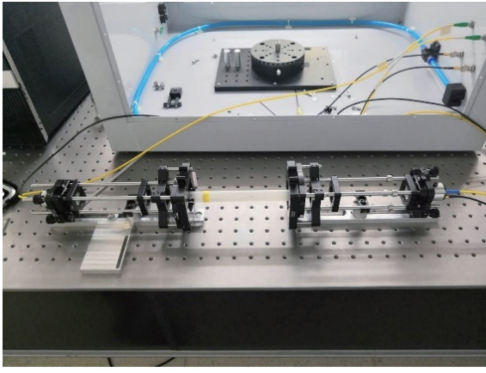


图 3  $x$  和  $y$  偏振态的损耗随频率变化曲线

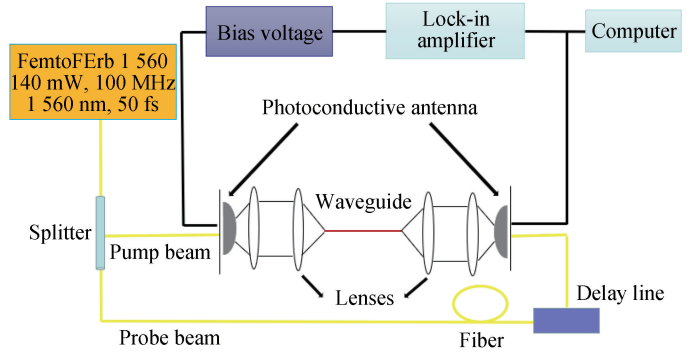
Fig.3 The loss of  $x$  and  $y$  polarization modes versus frequency

### 3 实验结果与分析

在理论分析的基础上, 结合现有的实验制备条件, 使用美国 Formlabs 公司的 Form2 型桌面 3D 打印机制备了长度分别为 14.62 cm 和 3.73 cm 的两段波导, 波导端面如图 1(b)所示. 3D 打印所用材料为透明树脂 Clear V4, 打印所选的精度为层厚 0.025 mm. 采用太赫兹时域光谱系统 (Terahertz Time-domain Spectroscopy System, THz-TDS) 对波导进行传输性能测试, 如图 4(a)所示, 图 4(b)为 THz-TDS 的原理图. 太赫兹波通过 2 个太赫兹透镜组成的  $4f$  系统耦合进入波导, 从波导输出后再通过同样的  $4f$  系统耦合进入探测器, 得到太赫兹波的时域谱, 经过傅里叶变换后可得到频域谱.



(a) Test image of terahertz time-domain spectroscopy system



(b) Schematic diagram of terahertz time-domain spectroscopy system

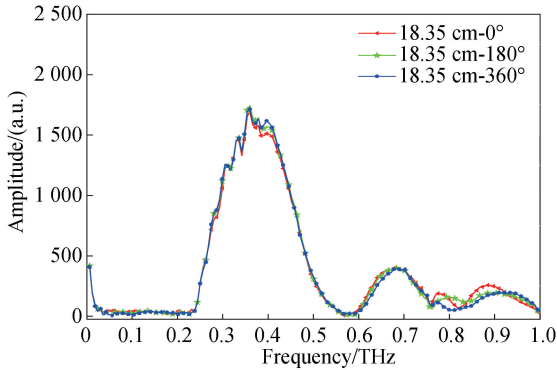
图4 太赫兹时域光谱系统测试及原理图

Fig.4 Test and schematic diagram of terahertz time-domain spectroscopy system

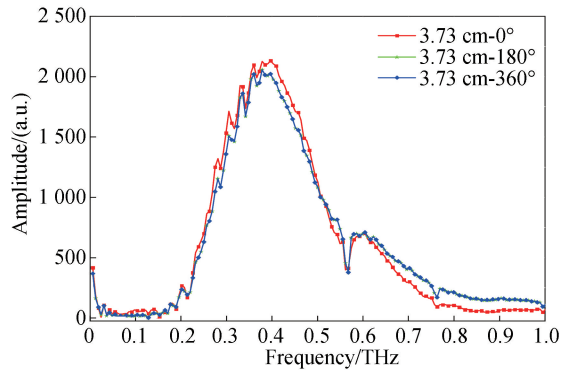
波导的损耗采用截断法测试,损耗  $\alpha$  的计算表达式为<sup>[10]</sup>

$$\alpha = \frac{-10}{L_1 - L_2} \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \text{ dB/m} \quad (6)$$

式中,  $P_1$  和  $P_2$  分别为波导截断前和截断后所对应的输出能量值,  $L_1$  和  $L_2$  则分别为波导截断前和截断后的长度. 然而, 由于 3D 打印的波导直径较粗, 不便于切割, 因此将两个波导按照其结构一致性对接, 并用胶带固定. 将对接后的波导作为截断前的长波导,  $L_1 = 18.35 \text{ cm}$ ; 拆解后的波导作为截断后的短波导,  $L_2 = 3.73 \text{ cm}$ . 所用 THz-TDS 系统的 THz 波是水平偏振的, 为了测试波导的偏振特性, 将波导按图 1 所示的方向固定记为  $0^\circ$ , 之后分别将波导旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $360^\circ$  进行测试, 图 5 和图 6 为实验所测的结果. 图 5(a)、



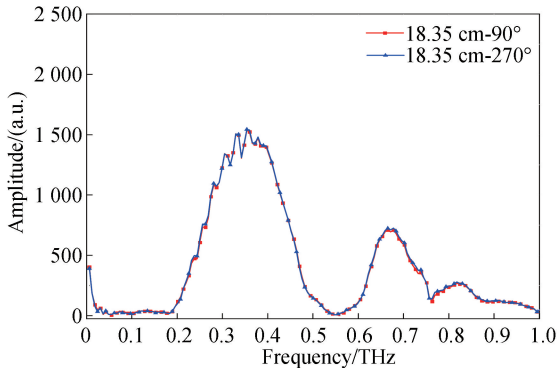
(a) Frequency domain signal with 18.35 cm length waveguide rotating at different angles



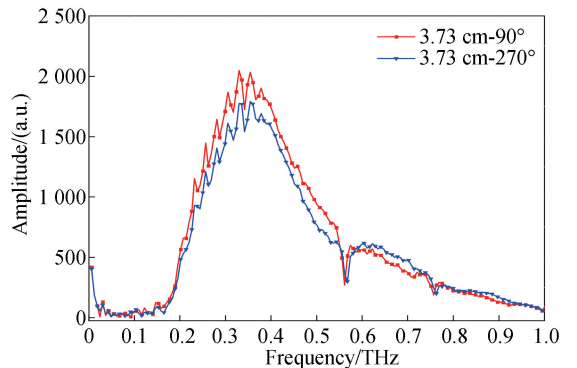
(b) Frequency domain signal with 3.73 cm length waveguide rotating at different angles

图5 两种长度的波导旋转  $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $360^\circ$  的频域信号

Fig.5 Frequency domain signal with two-length waveguide rotating at  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ , and  $360^\circ$



(a) Frequency domain signal with 18.35 cm length waveguide rotating at different angles



(b) Frequency domain signal with 3.73 cm length waveguide rotating at different angles

图6 两种长度的波导旋转  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  的频域信号

Fig.6 Frequency domain signal with two-length waveguide rotating at  $90^\circ$ ,  $270^\circ$

(b)分别为不同长度的波导旋转 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $360^\circ$ 后所得信号的幅值.图6(a)、(b)则分别为不同长度的波导旋转 $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 所得信号的幅值.

从图5和图6中可以看出,同一长度下,旋转不同的角度(相差 $180^\circ$ ),所得信号的幅值基本相同,证明了实验数据的准确性和可重复性.几组实验数据中,0.58 THz附近的幅值急剧降低,导致曲线在0.58 THz附近出现低谷.这是因为0.58 THz是水的吸收峰<sup>[2]</sup>,在0.58 THz这一频率范围附近,由于空气中水分对太赫兹波的吸收增加,导致波导的损耗也急剧上升.同时也可以看出,3.73 cm长的波导在0.58 THz附近有一个频段很窄的低谷,而18.35 cm长度的波导则在0.58 THz附近有一个频段较宽的低谷,这是由于波导的损耗在此频段内急剧增加所致.对比旋转相同角度不同长度的波导,在以0.35 THz为中心的高透频段(约0.25~0.45 THz),同一波导旋转 $90^\circ$ (垂直)时,强度峰值略有下降, $x$ 、 $y$ 方向的幅值变化较小,其双折射效果不明显.

将同一长度的波导旋转 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $360^\circ$ 的频域信号的幅值取平均,记为波导在该长度下 $x$ 方向的幅值,同理可得 $y$ 方向的幅值.利用式(6)分别计算波导在两个偏振方向上的损耗,结果如图7所示.可以看出,实验与仿真的曲线趋势基本相同,两个偏振态在0.29~0.42 THz的损耗均低于10 dB/m. $x$ 偏振的最低损耗为5 dB/m@0.35 THz, $y$ 偏振的最低损耗为5.5 dB/m@0.4 THz.

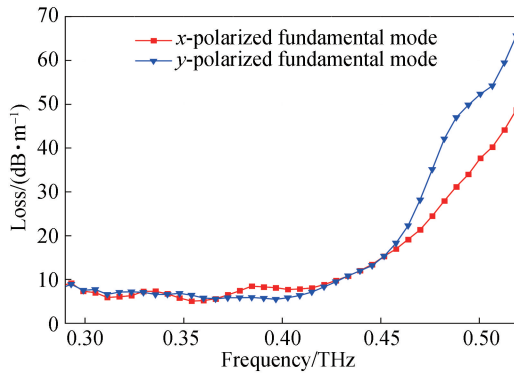


图7 实验测得 $x$ 和 $y$ 偏振方向的损耗曲线

Fig.7 The experimentally measured loss of  $x$  and  $y$  polarization modes

## 4 结论

本文提出了一种新型的部分负曲率空芯太赫兹波导,通过引入矩形介质层作为反谐振层来降低波导的限制损耗,避免了一般负曲率反谐振波导不能通过不断增加管环直径来降低限制损耗的问题,为负曲率波导的设计提供了一种新的思路.利用有限元法对所设计波导的限制损耗和有效材料损耗特性进行了数值分析.在理论分析的基础上,采用3D打印的方法制备波导,用THz-TDS系统实验测量其传输特性,在0.29~0.42 THz范围内, $x$ 、 $y$ 两个偏振态的损耗均低于10 dB/m.实验结果与仿真结果吻合较好,证明了波导结构设计思路的可行性.但是受限于负曲率空芯太赫兹波导的制备工艺,目前只能用3D打印的方式制备,这样制备的波导短且粗,极大地限制了其使用价值.后期将继续优化波导结构参数,同时探索新的制备工艺,以求制备出长而细、更具有实用价值的负曲率空芯太赫兹波导.

## 参考文献

- [1] ALICE C, CRISTIANO C, MARCOS F. 3Dprinted hollow-core terahertz fibers[J]. *Fibers*, 2018, **6**(3): 43.
- [2] ZHANG Xue-wu, SHAO Zheng-zheng, CHANG Sheng-li, et al. Measurement of water vapor absorption spectrum using terahertz time domain spectroscopy[J]. *Physical Experiment of College*, 2009, **22**(3): 16-19.  
张学鹭,邵铮铮,常胜利,等.利用太赫兹时域光谱技术测量水汽的吸收谱[J]. *大学物理实验*, 2009, **22**(3): 16-19.
- [3] ARGYROS A. Microstructures in polymer fibres for optical fibres, THz waveguides, and fibre-based metamaterials[J]. *ISRN Optics*, 2013, **2013**: 1-22.
- [4] SULTANA J, SAIFUL M S, HABIB M S, et al. Five-capillary cladding terahertz fiber with low loss and single mode[C]. 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2019: 1-2.
- [5] HASANUZZAMAN G K M, IEZEKIEL S, MARKOS C, et al. Hollow-core fiber with nested anti-resonant tubes for low-loss THz guidance[J]. *Optics Communications*, 2018, **426**: 477-482.

- [6] LU W, LOU S, ARGYROS A. Investigation of flexible low-loss hollow-core fibres with tube-lattice cladding for terahertz radiation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, **22**(2): 214-220.
- [7] CHEN Xiang, HU Xiong-wei, LI Jin-yan. Factors affecting limitation loss of negative curvature hollow fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, **56**(5): 050602.  
陈翔,胡雄伟,李进延. 负曲率空芯光纤限制损耗的影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2019, **56**(5):050602.
- [8] ISLAM M S, SULTANA J, ATAI J, *et al.* Design and characterization of a low-loss, dispersion-flattened photonic crystal fiber for terahertz wave propagation[J]. *Optik*, 2017, **145**: 398-406.
- [9] FRANCESCO P. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(20): 23807.
- [10] WU Liang, LING Fu-ri, LIU Jin-song, *et al.* Application of terahertz spectroscopy in gas detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 29-35.  
吴亮,凌福日,刘劲松,等. 太赫兹光谱技术在气体检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7):29-35.