

## 柔性介质金属膜太赫兹波导的传输特性与应用

赵本磊<sup>1</sup>, 裴鑫<sup>1</sup>, 蒋佳辰<sup>1</sup>, 何猛辉<sup>1</sup>, 朱晓松<sup>1</sup>, 石艺尉<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>复旦大学信息科学与工程学院, 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433;<sup>2</sup>中山复旦联合创新中心, 广东 中山 528437

**摘要** 太赫兹 (THz) 波在通信、成像、安全监测、生物医学等领域有着广阔的应用前景。随着 THz 技术的飞速发展, 对其传输波导, 特别是低损耗、单模、柔性传输等高性能 THz 波导的需求日益增长, 这将为提高 THz 系统的灵活性及推动其实用化发展提供重要支撑。综述了金属膜波导和介质金属膜波导的设计和制备工艺, 在 0.1~0.3 THz 和 2.0~5.0 THz 频段的损耗和单偏振单模传输等特性, 以及在通信和成像等方面的应用。着重介绍了本课题组近年来在波导的设计、特性仿真、制备、测试和应用方面的研究结果。也对 THz 波导研制中存在的难点和发展前景进行了初步探讨。

**关键词** 太赫兹; 毫米波; 介质金属膜波导; 柔性; 单模单偏振

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231393

## Transmission Properties and Applications of Flexible Dielectric Metallic Hollow Terahertz Waveguide

Zhao Benlei<sup>1</sup>, Pei Xin<sup>1</sup>, Jiang Jiachen<sup>1</sup>, He Menghui<sup>1</sup>, Zhu Xiaosong<sup>1</sup>, Shi Yiwei<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Electromagnetic Wave of Information Science and Technology, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;<sup>2</sup>Zhongshan-Fudan Joint Innovation Center, Zhongshan 528437, Guangdong, China

**Abstract** Terahertz (THz) waves have broad application prospects in fields such as communication, imaging, safety monitoring and biomedicine. With the rapid development of THz technology, the demands for its transmission waveguides, especially high-performance THz waveguides with low loss, single mode delivery and flexible transmission are increasing. This will provide important support for improving the flexibility of THz systems and promoting their practical development. We review the design and fabrication process of metallic waveguides and dielectric metallic waveguides, their characteristics of loss and single-polarization single-mode transmission in the frequency bands of 0.1–0.3 THz and 2.0–5.0 THz, as well as their applications in communication and imaging. We mainly focus on the research results of our research group in the design, characteristic simulation, fabrication, evaluation, and related applications of waveguides in recent years. And preliminary exploration is conducted on the difficulties and prospects in the development of THz waveguides.

**Key words** terahertz; millimeter wave; dielectric metallic hollow waveguide; flexible; single-polarization single-mode

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波通常指频率在 0.1~10.0 THz 范围内的电磁辐射, 其波长介于红外光和毫米波之间<sup>[1-3]</sup>, 具有比微波高几个数量级的宽带特性, 同时其较强的穿透性和非电离特性<sup>[4-5]</sup>使其具有特殊的应用优势。随着 THz 辐射源和探测器研究的不断发展, THz 在物理、化学、天文学、材料科学和生物等领域展

现了广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。THz 技术在通信<sup>[7-10]</sup>、检测<sup>[11-14]</sup>、传感<sup>[15-18]</sup>、成像<sup>[19-22]</sup>等领域的应用愈加被重视。由于环境吸收等因素的影响, 亟须 THz 波的导波技术。各种结构的 THz 波导, 如平行板金属波导<sup>[23-25]</sup>、金属管波导<sup>[26-28]</sup>、介质波导<sup>[29-31]</sup>、聚合物布拉格波导<sup>[32-34]</sup>、聚合物微结构波导<sup>[35-37]</sup>等, 得到了广泛的研究和探索。其中: THz 光子晶体光纤的设计自由度高且容易实现单模传输, 但受限于目前的制备工艺, 还是主要以理论

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-07-01; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-10

通信作者: \*ywshi@fudan.edu.cn

仿真等研究成果为主<sup>[38-40]</sup>;基于反谐振导光机理的反谐振 THz 光纤,大多采用 3D 打印技术制备,光纤截面尺寸较大,难以实现柔性传输,且受限于打印精度、可打印的材料以及材料的吸收等,其损耗通常在 6 dB/m 以上<sup>[41-42]</sup>;介质金属膜空芯光纤中的金属薄膜替代了金属管,实现了柔韧性,金属膜结合介质薄膜的较强光场束缚特性,将绝大部分能量束缚在空气芯中传输,相对损耗较低,制备得到的 0.1 THz 的单模单偏振光纤损耗为 2.58 dB/m<sup>[19]</sup>,但其制备工艺比较复杂,难以实现数米以上长度光纤的制备,因此局限于短距离传输。

与通用的近红外石英通信光纤相比,THz 光纤的研究发展和现状除了受到 THz 光源和检测器性能的制约和影响外,制备难度大也限制了它的发展,因此,未见类似石英光纤的低成本、大批量制备技术的报道。THz 光纤在低损耗特性、单模传输、柔性传输等方面均存在不足。其相关材料,如二维超材料、聚合物和金属等不断发展,其新工艺也不断被开发,但还需要大量的研究和开发工作。除了实现高性能传输外,在光纤型功能器件方面的研究也有待进一步展开。

本课题组将拉制的柔韧性优良的聚碳酸酯管作为基管,对其内壁镀制金属膜制备了金属膜波导<sup>[43]</sup>。用经典电磁场理论来分析其导波模式,金属膜波导利用金属材料的高反射性将 THz 波限制在空气纤芯中传输,具备优良的传输性能,如良好的柔韧性、较高的功率阈值、较低的插入损耗以及较小的光束发散角的特点<sup>[44-46]</sup>。基于这些特性,柔性 THz 金属膜波导可用于 THz 低频段的低损保偏传输<sup>[47-50]</sup>和亚波长成像<sup>[19-20,51]</sup>。理论和实验研究表明,在金属层上镀制介质膜,可以提高反射率,使得光场被进一步限制在空气纤芯中,有效降低损耗<sup>[52-53]</sup>。目前使用较多的介质膜包括在 THz 波段吸收较低、耐高温且柔韧性较好的环烯树脂(COP)<sup>[54]</sup>、聚苯乙烯(PS)<sup>[55-57]</sup>等聚合物。介质膜的镀制使得介质金属膜波导在 THz 的高频段获得了低损耗特性,而高频低损耗 THz 波导有望为生物大分子的探测<sup>[58-60]</sup>及其功能调控<sup>[61-65]</sup>等提供手段。

## 2 柔性 THz 波导

### 2.1 介质金属薄膜结构的 THz 波导

常用金属膜波导传输 0.1~0.3 THz 的低频段 THz 波,该频段实际为传统的微波或毫米波段,可沿用微波波导的传输原理和波导结构,即不同波段对应不同长宽尺寸的标准矩形金属波导。具有良好柔韧性的金属膜波导,其截面形状可以为圆形或椭圆形。圆形波导中电磁波传输存在模式兼并现象,一般难以实现单模传输。适当扩大圆形波导内径(即增加传输模式数量)可以实现低损、随机偏振的多模传输。该波导可用于注重传输损耗且对输出光斑质量要求不高的应用系统。通过严格设计截面尺寸,金属膜椭圆

圆波导(HEW)可以实现 THz 波的单偏振单模(SPSM)传输<sup>[47]</sup>。在满足波导单模传输的条件下,通过适当增大椭圆截面尺寸可以尽可能地降低基模的传输损耗。实验测量结果<sup>[19]</sup>显示,得益于 HEW 的单模和柔韧特性,波导的弯曲、扭曲,甚至盘绕对其传输损耗和偏振特性的影响很小。在 THz 高频段,可以利用介质金属膜波导传输 THz 波,该频段波长较小,所论述的波导结构一般只能用于多模传输。对于不同的工作波长,介质金属膜波导的结构参数中存在最佳介质膜厚以使波导在目标波长的损耗达到最低值。理论和实验研究结果表明,当传输波长远小于波导内径时,介质金属膜波导获得最低损耗的介质膜最佳膜厚<sup>[48]</sup>为

$$d = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_d^2 - 1}} \tan^{-1}\left(\frac{n_d}{\sqrt{n_d^2 - 1}}\right), \quad (1)$$

式中: $n_d$ 为介质膜材料折射率; $\lambda$ 为传输波长。从式(1)可以看出,最佳膜厚随工作波长的增大而增大。对于高频段短波长频带,介质膜厚较小,制备可行,而且介质的吸收造成的附加损耗可以忍受;而在 0.1~0.3 THz 的 THz 低频段,根据最优介质膜厚理论,介质膜将达到数百  $\mu\text{m}$ ,导致介质表面粗糙度过大,介质材料吸收使损耗显著增大。如果在保证空气芯大小的条件下增加波导外径,则会影响波导的柔韧性。因此低频长波长电磁波(接近毫米波段)一般采用金属膜波导;高频短波长 THz 波则采用介质金属膜波导。在 4.3 THz 频点,如果介质折射率  $n_d = 1.53$ ,按照最佳膜厚理论,最佳膜厚为 9.18  $\mu\text{m}$ ,该厚度远小于波导的内径。考虑到介质膜的吸收系数以及膜表面的粗糙度,最佳膜厚值有所减小<sup>[61]</sup>。另外,受波导制备工艺的限制,厚膜的表面粗糙度更大,因此在样品制备时选择的膜厚一般略小于理论最佳值。

金属膜波导主要用于低频 THz 的传输及其功能应用,如 6G 通信、毫米波通信、传感、成像探针等。介质金属膜波导主要用于高频 THz 的传输及其功能应用,如生物大分子的探测及调控。这是因为许多和生命活动有关的生物大分子的共振吸收峰位于该频段。

### 2.2 波导的制备

波导的制备过程可分为基管拉制、金属膜镀制和介质膜镀制三个阶段:

1) 基管拉制。基管材料采用具有优越柔韧性的聚碳酸酯(PC),拉制 PC 基管只需 300 °C 左右的温度。使用实验室搭建的简易拉管系统可以实现圆形空芯基管、内径渐变基管和椭圆基管的拉制。在拉制 PC 基管前,首先对 PC 预制管进行加热预处理以去除内部的水分;送料机构将 PC 管垂直向下送入加热圈中加热,PC 管熔融变细并受自然重力作用向下掉落;测径仪实时反馈基管的外径;集中控制系统通过控制收纤轮拉拽的速度和 PC 预制管的下降速度,控制拉制的

基管内径;通过协调控制送料、拉丝的速度,以及采用偏心加热等方法,可以实现恒径基管、渐变基管以及椭圆

圆截面基管的拉制。图 1(a)为基管控制系统的原理框图,图 1(b)为实验室使用的基管控制系统照片。

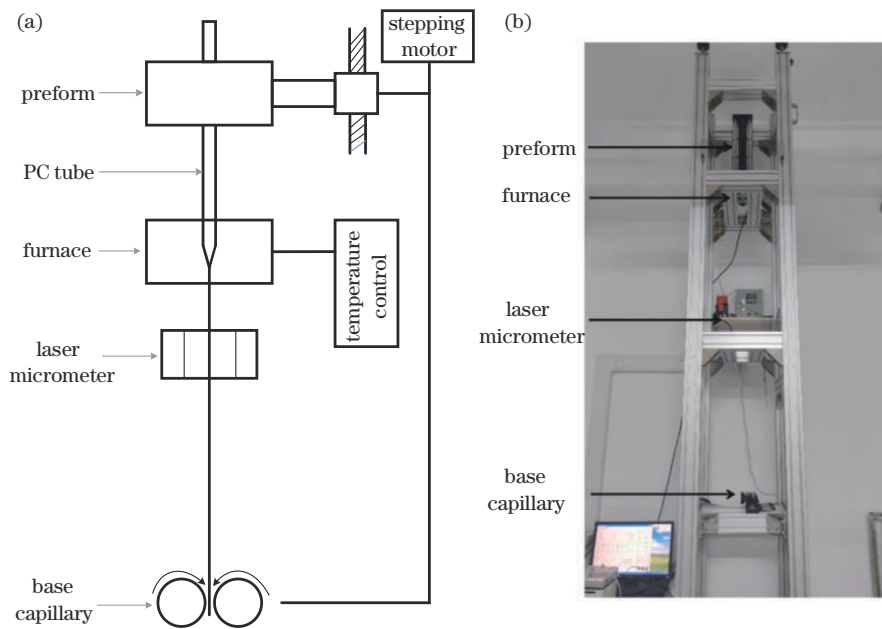


图 1 波导基管控制系统。(a)系统原理框图;(b)系统照片

Fig. 1 Drawing system of waveguide tube. (a) Schematic diagram of the system; (b) picture of the system

2) 金属膜的镀制。采用液相镀膜法在基管内壁镀制银膜<sup>[66]</sup>。真空泵将银氨溶液和葡萄糖酒精混合液抽入 PC 基管中,两种溶液充分混合后快速均匀地流过基管,在基管内表面发生还原反应,并生成银膜沉积在基管内表面。通过控制反应时间和温度等可以得到不同厚度的银膜<sup>[67]</sup>。波导制备中的银膜厚度约为 300~400 nm,远大于传输电磁波的趋肤深度。

3) 介质膜镀制。首先根据目标传输波长确定介质膜的厚度。对于单层介质金属膜空芯波导,介质层厚度是决定其传输特性的重要参数。一般使用工作波长上吸收系数小,工艺上易于成膜且薄膜光学质量高的介质。介质材料的选择有无机物和有机物,常用的有机膜介质材料有 COP<sup>[68-70]</sup>、环烯烃共聚物(COC)<sup>[71-72]</sup>、泡沫铜/酚醛树脂(FCP)<sup>[73-75]</sup>、聚酰亚胺(PI)<sup>[76]</sup>、乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)<sup>[77]</sup>等有机树脂材料;无机膜有 AgI<sup>[46,54]</sup>、ZnS<sup>[45]</sup>、ZnSe<sup>[53]</sup>等。有机膜的镀制为送液法,即溶有介质材料的溶液流过金属膜波导后残存一定厚度的液相薄膜,随后以加热、化学反应等方法去除液相薄膜中的溶剂,得到含溶质的薄膜;无机膜的镀制一般采用化学反应或沉积等方法。

无论是金属膜还是介质膜的成膜,其表面粗糙度和沿波导长度方向的膜厚均匀性等都是重要的成膜质量指标。光纤的金属膜和介质膜成膜均采用液相镀膜法,因此光纤存在液体输入端和输出端的区别。在光纤的液体输入端,金属和介质的膜厚略小于液体输出端,输入端薄膜的质量也优于输出端。这是因为输入端镀膜的反应液体纯净度高,形成的金属粒子较小,所

以金属表面光滑且膜厚略薄。当光纤介质镀膜时,基管处于垂直悬挂状态,重力的作用导致输出端膜厚增加。另外液体流经基管的过程中,温度逐渐上升,也会导致输出端膜厚较大。改善表面粗糙度和均匀度的方法相似,即加速反应液体的流动以及降低制备温度,但两者都会增加制备成本和难度。因此在金属和介质镀膜的工艺流程中,严格控制相关制备参数以获得表面光滑且均匀的光学薄膜是制备波导的关键。

利用原子力显微镜(FAM)表征了金属和介质膜的表面粗糙度,其均方根(RMS)值分别为 15 nm 和数 nm。借助傅里叶红外光谱仪(FTIR)测量光纤在中红外波段的损耗谱特性,可以定性判定金属和介质膜的成膜质量。损耗谱特性中介质薄膜的干涉峰位置及尖锐程度与成膜的厚度及均匀性相关。光纤被切断后,根据各段的损耗谱干涉峰位置可以估算该段的平均介质膜厚。测试表征的数据显示,介质膜的厚度沿长度为 1 m 的光纤有 10~20 nm 的浮动。

### 3 波导传输特性

接下来介绍不同类型波导在 0.1~0.3 THz 低频段、2.0~5.0 THz 高频段的传输特性以及在 0.1~0.3 THz 低频段的 SPSM 传输特性。

#### 3.1 渐变波导(GTMW)与恒径波导(CBMW)

相对于常见的内径不变的 CBMW,也可以选择 GTMW 来优化波导输入输出端口与光源检测器的耦合,并调控波导的传输特性。GTMW 大口径的输入端与激光源的对准容差较大,且其高效地收集光源发



出的光,大大提高了波导的耦合效率。且 GTMW 利用内面低损耗反射的原理逐渐缩小光斑,把光斑缩小至检测器的光敏面范围内。图 2(a)为 GTMW 和 CBMW 的示意图,图 2(b)为实际制备的 GTMW 的照片。可以看到,波导输入输出端口的内径不同,且内径沿波导长度方向逐渐变化。实验制备了几种不同几何尺寸的金属膜波导并测量了其损耗特性<sup>[20]</sup>。

图 3 为波导传输特性的实验测量系统,其中,  $P_1 \sim P_3$

分别为耦合波导的输入功率、待测波导的输入功率和输出功率。THz 源 (IMPATT-300, TeraSense, 美国) 发射出 0.3 THz 的 THz 波<sup>[78]</sup> 经焦距为 32 mm 的 THz 透镜 (TPX 透镜) 耦合进入波导中。在测量波导损耗时, THz 波经过耦合波导进入待测波导。耦合波导是一段长为 10 cm 的 CBMW, 其孔径  $R$  和待测波导的输入端大小相同, 这样可以消除耦合损耗的影响, 提高波导损耗测量值的准确性。

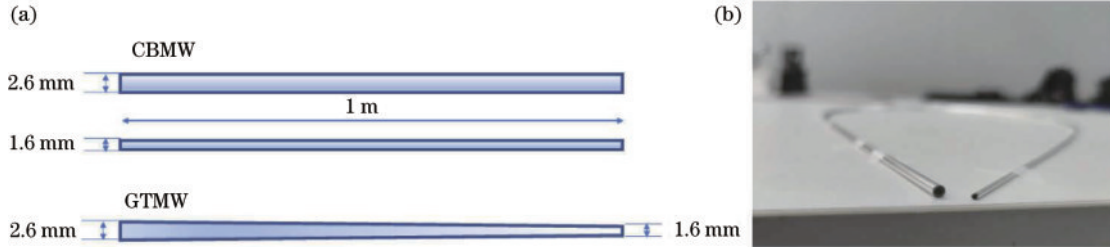


图 2 GTMW 和 CBMW。(a) GTMW 和 CBMW 的示意图, (b) GTMW 样品照片<sup>[20]</sup>

Fig. 2 GTMW and CBMW. (a) Schematic diagram of GTMW and CBMW; (b) picture of GTMW sample<sup>[20]</sup>

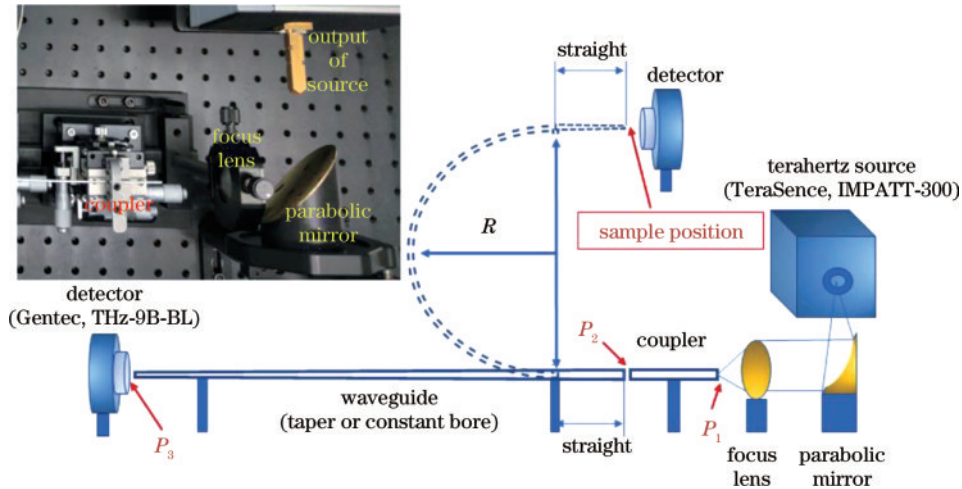


图 3 波导传输特性及成像测试系统

Fig. 3 Waveguide transmission characteristics and imaging test system

图 4 为 5 种波导样品的弯曲测量损耗, 其中, 拟合曲线的斜率显示了传输损耗对弯曲曲率的敏感性。表 1 是实际测量结果和理论仿真结果的总结。可以看出, 波导的弯曲损耗基本遵从与  $1/R$  成正比的规律, 这是由于波导弯曲后, 激发了高阶模式从而产生附加损耗。从图 4 中可以看出, 孔径较大的波导具有较低的直线传输损耗, 而 GTMW 的损耗介于与 GTMW 输入端和输出端相同孔径的 CBMW 之间, 同时 GTMW 的传输损耗随着波导锥度的增大而增大。此外, 弯曲对 GTMW 的损耗的影响比小孔径的 CBMW 低, 这个可以通过比较表 1 中  $TE_{11}$  模式的理论损耗和测量损耗来解释。在 GTMW 中,  $TE_{11}$  模式的理论损耗与波导的测量损耗较为接近, 意味着在 GTMW 中, 大部分 THz 波的能量以  $TE_{11}$  模式传输。然而, 测得 1.4 (内直径)

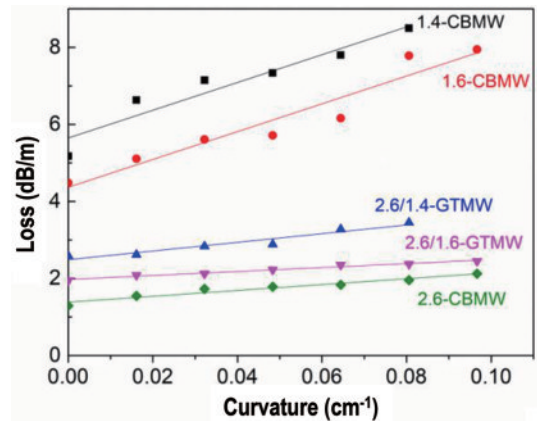


图 4 频率为 0.3 THz 处各种波导的弯曲损耗特性测量结果<sup>[20]</sup>  
Fig. 4 Measured results of bending loss characteristic of different waveguides at a frequency of 0.3 THz<sup>[20]</sup>

表 1 频率为 0.3 THz 处各波导的理论及测量结果<sup>[20]</sup>

Table 1 Theoretical and measured results of different waveguides at a frequency of 0.3 THz<sup>[20]</sup>

| Waveguide | Internal diameter / mm | Theoretical straight loss of TE <sub>11</sub> mode / (dB/m) | Measured straight loss / (dB/m) | Measured 180° bending loss / (dB/m) | Slope of fitting line |
|-----------|------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| GTMW      | 2.6/1.4                | 1.85  | 2.54                            | 2.84                                | 0.11                  |
|           | 2.6/1.6                | 1.59  | 1.95                            | 2.23                                | 0.05                  |
|           | 1.4                    | 2.90  | 5.16                            | 7.33                                | 0.36                  |
| CBMW      | 1.6                    | 2.31  | 4.48                            | 5.71                                | 0.35                  |
|           | 2.6                    | 1.19  | 1.29                            | 1.78                                | 0.08                  |

-CBMW 和 1.6-CBMW 的损耗远大于其 TE<sub>11</sub> 模式的理论损耗,这意味着在这两个波导中,相当大一部分能量以高阶模式传输,如 TM<sub>21</sub> 和 TM<sub>11</sub> 模式。在样品弯曲时,高阶模式耦合到低阶模式,或者高阶模式之间相互耦合,进而使弯曲损耗更大。

### 3.2 SPSM THz 波导

减小波导的截面尺寸可以截止高阶模的传输,只保留基模,实现波导的单模传输。进一步将截面形状变为椭圆,可以实现偏振保持,进而实现波导的 SPSM 传输。金属波导的基模为 TE<sub>11</sub> 模式,该模式具有偏振特性。对于截面形状为圆形的波导,由于截面的圆对称性,存在 X 方向偏振的 TE<sub>11X</sub> 模式和 Y 方向偏振的 TE<sub>11Y</sub> 模式。即使实现 TE<sub>11</sub> 单模传输,TE<sub>11X</sub> 和 TE<sub>11Y</sub> 模式的简并现象也会导致波导无法实现偏振保持。因为实际应用中的制备不均匀、弯曲、应力扰动等因素,截面会发生形变,这破坏了两个偏振模式的简并现象导致偏振串扰。椭圆截面的波导在 X 和 Y 方向不对称,TE<sub>11X</sub> 和 TE<sub>11Y</sub> 模式就成为了两个传输特性不同的模式。通过合理地设计波导,可以有效地截止 TE<sub>11X</sub> 模式并实现 TE<sub>11Y</sub> 模式的单模传输,使波导具有偏振保持特性。

图 5 为 HEW 的截面示意图以及其中三个最低阶模式 TE<sub>11X</sub>、TE<sub>11Y</sub> 和 TE<sub>21Y</sub> 的模场图,其中:红色箭头表示偏振方向;X 和 Y 偏振根据偏振方向定义。

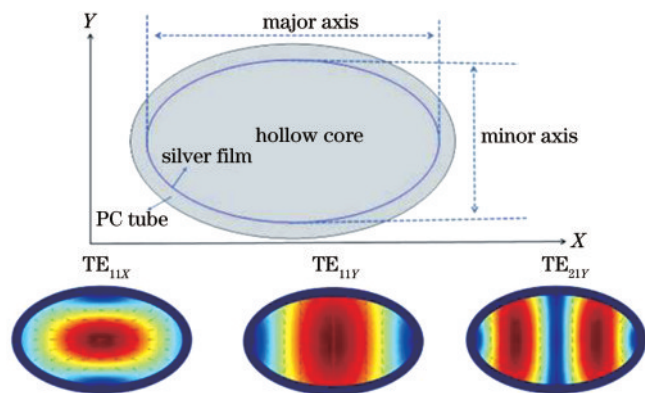


图 5 HEW 的截面示意图及 TE<sub>11X</sub>、TE<sub>11Y</sub> 和 TE<sub>21Y</sub> 模式的模场图

Fig. 5 Cross-section diagram of HEW and mode field diagrams of TE<sub>11X</sub>, TE<sub>11Y</sub> and TE<sub>21Y</sub> modes

分析归一化截止波长  $\lambda_{NC}$  ( $\lambda_{NC} = \lambda_c/a$ , 其中:  $\lambda_c$  为截止波长;  $a$  为椭圆的长半轴长度) 来讨论椭圆率对各个模式截止波长的影响。图 6(a) 为三个最低模式的  $\lambda_{NC}$ ; 图 6(b) 是图 6(a) 中横坐标椭圆率从 1 到 3 的局部放大图。当椭圆率为 1, 即为圆形芯波导时, 模式 TE<sub>11X</sub> 和 TE<sub>11Y</sub> 的  $\lambda_{NC}$  相等。模式 TE<sub>11X</sub> 的  $\lambda_{NC}$  随着椭圆率的增大而迅速减小, 最终所有模式都会被截止。从图 6 中可以看出, 在任何条件下, TE<sub>11Y</sub> 都是第一阶模式。图 6(b) 显示, 随着椭圆率增大, HEW 中的第二阶模式会发生变化。当椭圆率为 1.95 时, 模式 TE<sub>11X</sub> 和 TE<sub>21Y</sub> 的  $\lambda_{NC}$  相同; 当椭圆率小于 1.95 时, TE<sub>11X</sub> 为第二阶模式; 而当椭圆率大于 1.95 时, TE<sub>21Y</sub> 成为第二阶模式。

根据图 6(a)、(b) 的仿真计算结果, 针对 0.1 THz 频点, 制备了 1.5/2.7-HEW (椭圆率为 1.8) 波导。如图 6(b) 中红色实线所示, 1.5/2.7-HEW 的 SPSM 波段对应于  $a$  为 1.95~3.34 mm 的  $\lambda_{NC}$ , 即 2630~4509  $\mu\text{m}$  的波段或 66.5~114.0 GHz 的频段。图 6(c) 显示了 1.5/2.7-HEW 位于损耗小于 3 dB/m 的区域, 其计算损耗为 2.31 dB/m。利用 0.1 THz 源测量了该波导的损耗及偏振保持特性, 该测试系统与图 3 类似。

图 7(a) 展示了波导的弯曲性能。波导在直线情况下的实测损耗为 2.58 dB/m, 当弯曲到 360° 时, 弯曲损耗从 2.58 dB/m 增加到 2.78 dB/m, 即弯曲附加损耗仅为 0.20 dB/m。图 7(b) 横坐标中正/负角度分别代表顺时针和逆时针扭曲的情况, 当波导扭曲  $\pm 180^\circ$  时, 附加损耗也低于 0.20 dB/m。无论是弯曲还是扭曲, 波导输出光的偏振度几乎恒定。实验结果表明, 当 1.5/2.7-HEW 在传输 0.1 THz 的 THz 波时, 对弯曲和扭曲情况具有较高的鲁棒性。图 7(a) 和图 7(b) 中的插图分别为弯曲 360° 的波导照片和波导的扭曲模型。

图 8 为 150 GHz 频率处 HEW 的损耗随结构参数变化的仿真计算结果。这里主要考虑 HEW 的 TE<sub>11Y</sub> 模式的损耗。只有当长轴长度为 1.19~2.18 mm 时, HEW 才能在 150 GHz 频率处实现 SPSM 传输。图 8 中左侧虚线表示当长轴长度小于 1.19 mm 时, TE<sub>11Y</sub> 模式会截止; 右侧虚线表示当长轴大于 2.18 mm 时, TE<sub>21Y</sub> 模式会被激发, 即不能实现单模传输。图 8 中实线“single-mode line”显示 HEW TE<sub>11Y</sub> 模式的损耗随着椭圆率的增大而增大。此外, 还标注了 10 dB/m 和

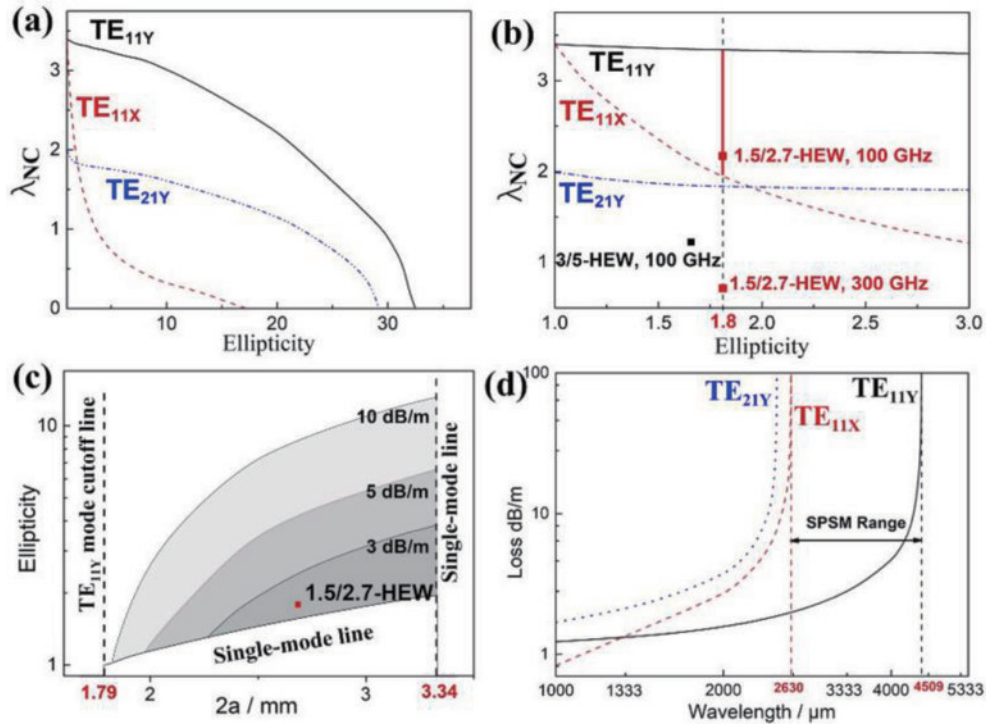


图 6 HEW 模式特性和损耗特性<sup>[47]</sup>。(a)(b)归一化截止波长  $\lambda_{NC}$  与波导椭圆率的关系；(c) 0.1 THz 处, HEW 的结构参数与损耗的关系；(d) 1.5/2.7-HEW 的三个最低阶模式的损耗特性

Fig. 6 Mode and loss characteristics of HEW<sup>[47]</sup>. (a) (b) Relationship between the normalized cutoff wavelength  $\lambda_{NC}$  and the ellipticity of the waveguide; (c) relationship between the structural parameters of HEW and the loss at 0.1 THz; (d) loss characteristic for three lowest order modes of 1.5/2.7-HEW

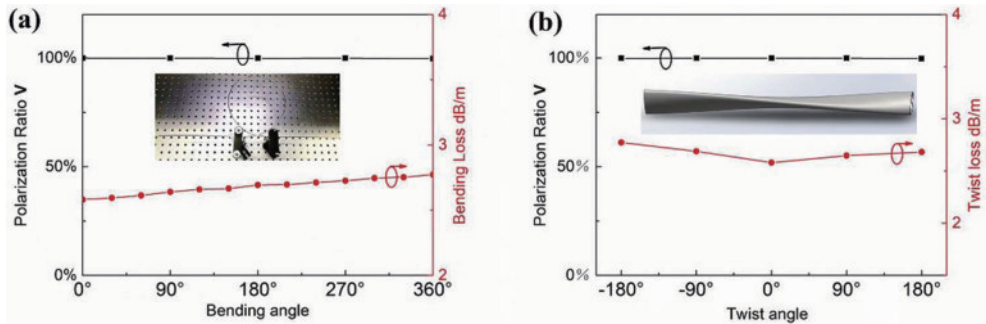


图 7 弯曲和扭曲情况下, 1.5/2.7-HEW 的损耗和输出光的偏振度<sup>[47]</sup>。(a) 弯曲情况；(b) 扭曲情况

Fig. 7 Loss and polarization of the output light of 1.5/2.7-HEW in the case of bending and twisting<sup>[47]</sup>. (a) Bending case; (b) twisting case

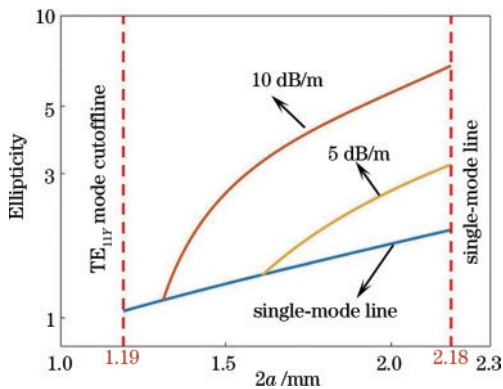


图 8 频率 150 GHz 处 HEW 的结构参数与波导损耗的关系  
Fig. 8 Relationship between structural parameters of HEW and waveguide loss at 150 GHz

5 dB/m 的损耗容限曲线, 在波导参数和该曲线下单模线合围的区域, 波导损耗相对较低。计算发现, 当 HEW 长/短轴长度为 1.31/0.80 mm 时, 仿真损耗为 10 dB/m; 当长/短轴长度为 1.62/1.15 mm 时, 仿真损耗为 5 dB/m; 当长/短轴长度为 2.00/1.14 mm 时, 仿真损耗为 3.40 dB/m; 当长/短轴长度为 2.18/1.12 mm 时, 仿真损耗为 3.14 dB/m。同样, 在 300 GHz 频点, 要实现 SPSM 传输, 需要进一步缩小椭圆的截面尺寸, 其损耗增加至 8~9 dB/m。

### 3.3 波导在 THz 高频段的损耗特性

通过在金属膜波导内面镀制介质薄膜制备了介质金属膜波导样品, 并测量了波导在 THz 高频段的损耗特性。制备条件所限, 测试的波导介质膜厚度为 0.8~



1.5 μm, 以此验证介质膜在降低传输损耗中的作用。测量系统的光源采用 THz QCL (quantum cascade laser), 在 2.5、2.9、4.3 THz 频点测量了波导的损耗, 测量结果表明, 波导在三个频点具有基本相同的损耗值和弯曲损耗特性。

图 9 是在 4.3 THz 频点处不同介质膜厚的介质金属膜波导在不同弯曲角度下的损耗。其中: 波导 1 为金属膜波导; 波导 2 和 3 为介质金属膜波导, 对应的内面介质膜厚分别约为 0.8 μm 和 1.3 μm<sup>[79]</sup>。从图 9 中可以看出: 介质金属膜波导在 4.3 THz 的直线传输损耗随着膜厚的增加而减小, 分别为 4.79、4.19、2.84 dB/m; 损耗随波导弯曲角度的增大而增大。尽管介质膜厚远小于式(1)的最佳膜厚, 但随着介质膜厚度的增加, 弯曲带来的附加损耗曲线的斜率下降, 即弯

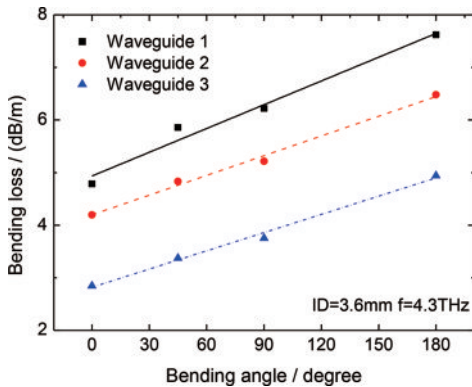


图 9 4.3 THz 频点处不同介质膜厚的介质金属膜波导在不同弯曲角度下的损耗<sup>[79]</sup>

Fig. 9 Loss of dielectric metal film waveguides with different dielectric film thicknesses under different bending angles at 4.3 THz<sup>[79]</sup>

曲附加损耗的增长速度减缓, 这表明, 介质膜对于降低波导的弯曲附加损耗是有明显效果的。

## 4 应用

### 4.1 透射成像

利用图 3 中的实验测量系统研究了不同波导的透射成像性能。图 10 是将 2.6/1.6-GTMW 作为探头, 对隐藏在两张纸之间的刀片的成像结果, 刀片长约为 4 cm, 宽约为 2 cm。成像扫描时波导探头以半径为 20 cm 弯曲 180°, 显示了成像系统的灵活性。从图 10(b) 中可以看出, 刀片、刀片中心的椭圆形孔、刀片两侧的两个内凹槽等在成像图中清晰可见。沿水平和垂直两条白线上的信号功率强度如图 10(b) 底部和右侧所示, 可以发现, 孔洞区域的信号强度明显增加。由此可见, 利用此柔性 GTMW 探头在狭小空间内引导 THz 波进行成像是可行的<sup>[19-20]</sup>。

多种波导的成像特性和分辨率对比研究表明, 柔性波导可以实现在狭小空间的 THz 成像, 且弯曲对 GTMW 成像质量的影响远小于 CBMW。利用细径的 SPSM 波导可以实现更高的图像分辨率, 但由于波导损耗的增加, 也会使某些穿透损耗较大的物体失去成像所需的透过功率。因此可以根据成像的指标要求, 在分辨率和波导的损耗之间适当地作一定的平衡选择。

### 4.2 数据传输

波导在 THz 通信, 特别是短距离 THz 通信中也有重要的应用场景和前景。以金属空芯波导为传输介质, 实现了 THz 信号的超高频传输, 实验装置如图 11 所示, 探索了金属空芯波导传输系统在 300~380 GHz

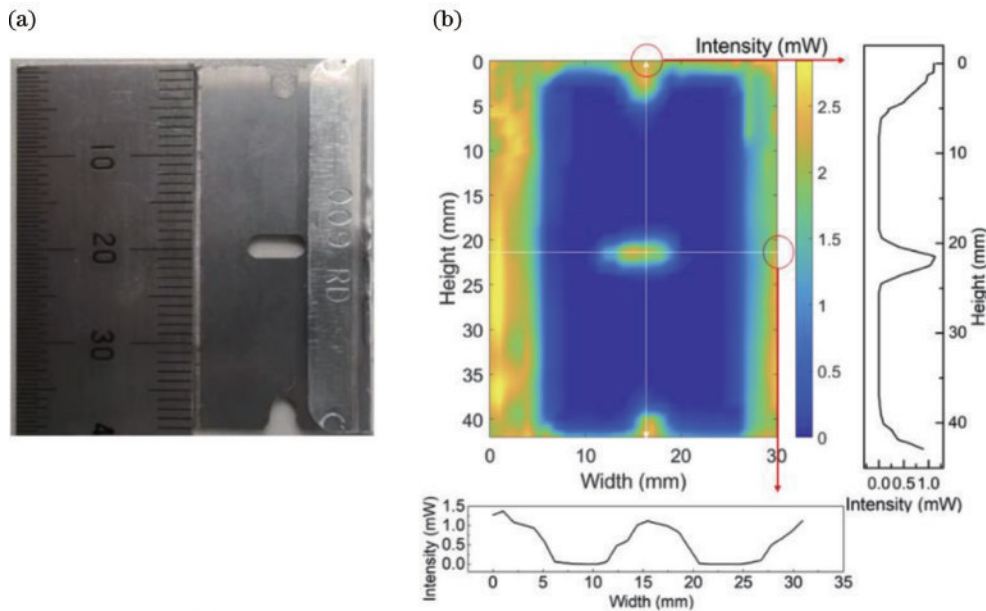


图 10 刀片成像结果<sup>[20]</sup>。(a)刀片照片;(b)0.3 THz 扫描成像图

Fig. 10 Blade imaging results<sup>[20]</sup>. (a) Picture of the blade; (b) scanning image by 0.3 THz

频率下的性能<sup>[80]</sup>。300 GHz 的 64 QAM (quadrature amplitude modulation) 信号在长度为 1 m 的金属空芯波导中实现了 140.625 Gbit/s 的最高净传输速率以及低于 SC-LDPC (spatially coupled low density parity

check) 的阈值的误码率 (BER,  $5.2 \times 10^{-2}$ )。实验结果表明,空芯波导利用 THz 波段中最透明的干燥空气作为传输 THz 信号的介质,实现了高速、高频、低损耗传输。

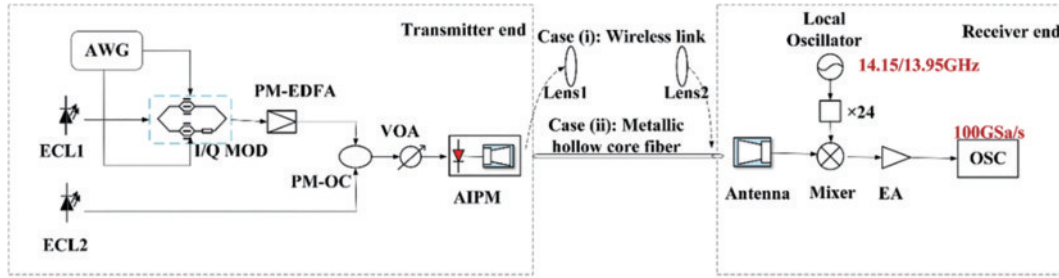


图 11 THz 高频传输系统示意图<sup>[80]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of THz high frequency transmission system<sup>[80]</sup>

同样,也通过实验研究了波导在 W 波段的数据传输特性。使用长度为 1.5 m 的波导在 W 波段实现了传输速率为 48 Gbit/s 的单偏振正交相移键控信号和传输速率为 80 Gbit/s 的单偏振 16 进制正交调幅信号,它们的 BER 小于  $3.8 \times 10^{-3}$ <sup>[81]</sup>。图 12 是长度为 1.5 m 的波导在 W 波段的损耗特性,可以看出,在 95 GHz 频点处的损耗值为 1 dB。研究还发现,对于介质金属膜空芯波导,介质膜能够减小波导的模间与模内色散,甚至使波导出现负色散与零色散区间<sup>[82]</sup>,这对于需要色散补偿的应用系统很有意义。

介质膜的镀制可以使介质金属膜波导在 THz 的高频段获得低损耗特性。除了多模低损耗传输外,波导的空芯结构可以为大分子的高精度传感和检测提供重要的部件,如利用光谱吸收的检测中,低损耗柔性空芯波导可以用作长光程的吸收腔,提高检测精度。

仿真和初步的实验研究结果表明,介质膜的镀制可以降低金属波导的色散,甚至能够在特定频段实现负色散特性。负色散特性的获得以损耗增加为代价,模场的部分能量在介质膜中传输,模场形状的畸变会导致负色散特性的出现。对于严格的色散限制系统,可以利用低色散波导或负色散波导实现色散补偿。

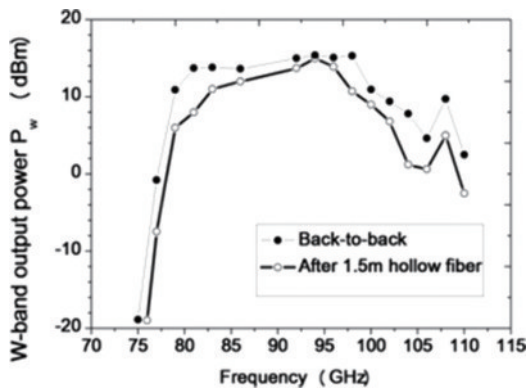


图 12 波导在 W 波段的传输损耗特性<sup>[81]</sup>

Fig. 12 Transmission loss characteristic of waveguide in W band<sup>[81]</sup>

## 5 结束语

金属膜波导和介质金属膜波导在 THz 的低频段和高频段均具有优良的传输特性。金属膜波导的传输原理和性能与常用的金属波导相同,但由于采用了金属薄膜和塑料基管,波导具有很好的柔韧特性,可实现柔性传输。利用椭圆截面的金属波导可以实现 SPSM 传输,其在 0.1 THz 频段的损耗小于 3 dB/m。由于其内径较小可以实现 360° 以上的盘绕柔性传输,且对损耗和偏振特性影响极小。

## 参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [3] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7): S266-S280.
- [5] Redo-Sanchez A, Zhang X C. Terahertz science and technology trends[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(2): 260-269.
- [6] Liu S G, Zhong R B. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.
- [7] Ghasempour Y, Shrestha R, Charous A, et al. Single-shot link discovery for terahertz wireless networks[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2017.
- [8] Harter T, Füllner C, Kemal J N, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications [J]. Nature Photonics, 2020, 14(10): 601-606.
- [9] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz



- communications research[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(2): 143-171.
- [10] Yang Y H, Yamagami Y, Yu X B, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 446-451.
- [11] Zhang X C, Shkurinov A, Zhang Y. Extreme terahertz science[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 16-18.
- [12] Chen S C, Feng Z, Li J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-array microscope[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 99.
- [13] Ma J J, Shrestha R, Adelberg J, et al. Security and eavesdropping in terahertz wireless links[J]. *Nature*, 2018, 563(7729): 89-93.
- [14] Woodward R M. Terahertz technology in global homeland security[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5781: 22-31.
- [15] Fang W H, Lv X Q, Ma Z T, et al. A flexible terahertz metamaterial biosensor for cancer cell growth and migration detection[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 631.
- [16] Yan X, Yang M S, Zhang Z, et al. The terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterials for sensitive biosensors in the detection of cancer cells[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 126: 485-492.
- [17] Zhang C B, Xue T J, Zhang J, et al. Terahertz meta-biosensor based on high-Q electrical resonance enhanced by the interference of toroidal dipole[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 214: 114493.
- [18] Zhang C B, Xue T J, Zhang J, et al. Terahertz toroidal metasurface biosensor for sensitive distinction of lung cancer cells[J]. *Nanophotonics*, 2021, 11(1): 101-109.
- [19] He M H, Zeng J F, Chen Z X, et al. Low-loss flexible polarization-maintaining hollow waveguide for linearly polarized 100 GHz radiation transmission and subwavelength imaging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(20): 6712-6718.
- [20] He M H, Zeng J F, Zhang X A, et al. Transmission and imaging characteristics of flexible gradually tapered waveguide at 0.3 THz[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8430-8440.
- [21] Stantchev R I, Li K D, Pickwell-MacPherson E. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[C]//2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 21-25, 2021, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2021.
- [22] Zheng S, Li C, Li S C, et al. Realizing frequency controlled wide-angle beam scanning with an artificial electromagnetic structure in the terahertz band[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18532-18544.
- [23] Laman N, Harsha S S, Grischkowsky D. Narrow-line waveguide terahertz time-domain spectroscopy of aspirin and aspirin precursors[J]. *Applied Spectroscopy*, 2008, 62(3): 319-326.
- [24] Mendis R, Grischkowsky D. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(11): 846-848.
- [25] Mendis R, Grischkowsky D. THz interconnect with low-loss and low-group velocity dispersion[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, 11(11): 444-446.
- [26] 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.
- [27] Gallot G, Jamison S P, McGowan R W, et al. Terahertz waveguides[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 851-863.
- [28] Harrington J A, Pedersen P, Bowden B F, et al. Hollow CU-coated plastic waveguides for the delivery of THz radiation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5727: 143-150.
- [29] Lai C H, Hsueh Y C, Chen H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3457-3459.
- [30] Liu J, Xiao M F, Shen J L, et al. Flexible PMMA pipe for terahertz propagation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8562: 85620R.
- [31] Lu J T, Hsueh Y C, Huang Y R, et al. Bending loss of terahertz pipe waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26332-26338.
- [32] Hong B B, Swithenbank M, Greenall N, et al. Low-loss asymptotically single-mode THz Bragg fiber fabricated by digital light processing rapid prototyping[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(1): 90-99.
- [33] Li J W, Ma T, Nallapan K, et al. 3D printed hollow core terahertz Bragg waveguides with defect layers for surface sensing applications[C]//2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), August 27-September 1, 2017, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2017.
- [34] Cruz A L S, Argyros A, Tang X L, et al. 3D-printed terahertz Bragg fiber[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), August 23-28, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [35] Goto M, Quema A, Takahashi H, et al. Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(2B): L317-L319.
- [36] Hasan M R, Anower M S, Hasan M I, et al. Polarization maintaining low-loss slotted core kagome lattice THz fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1751-1754.
- [37] Ren G B, Gong Y D, Shum P, et al. Polarization maintaining air-core bandgap fibers for terahertz wave guiding[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(5): 506-513.
- [38] Habib M A, Reza M S, Abdulrazak L F, et al. Extremely high birefringent and low loss microstructure optical waveguide: design and analysis[J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 93-99.
- [39] Hossain M S, Kamruzzaman M M, Sen S, et al. Hexahedron core with sensor based photonic crystal fiber: an approach of design and performance analysis[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2021, 32: 100426.

- [40] Luo J F, Chen S S, Qu H K, et al. Highly birefringent single-mode suspended-core fiber in terahertz regime[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3242-3248.
- [41] Xu G F, Skorobogatiy M. Continuous fabrication of polarization maintaining fibers via an annealing improved infinity additive manufacturing technique for THz communications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 12894-12911.
- [42] Yang S, Sheng X Z, Zhao G Z, et al. Novel pentagram THz hollow core anti-resonant fiber using a 3D printer[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(7): 720-730.
- [43] Rabii C D, Gibson D J, Harrington J A. Processing and characterization of silver films used to fabricate hollow glass waveguides[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4486-4493.
- [44] Matsuura Y, Hanamoto K, Sato S, et al. Hollow-fiber delivery of high-power pulsed Nd: YAG laser light[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(23): 1858-1860.
- [45] Matsuura Y, Miyagi M. Er: YAG, CO, and CO<sub>2</sub> laser delivery by ZnS-coated Ag hollow waveguides[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(33): 6598-6601.
- [46] Zeng X, Liu B H, He Y J, et al. Fabrication and characterization of AgI/Ag hollow fibers for near-infrared lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 209-212.
- [47] He M H, Chen Z X, Zeng J F, et al. Design, fabrication, and characterization of a single-polarization single-mode flexible hollow waveguide for low loss millimeter wave propagation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 10178-10186.
- [48] Liu S, Xie G X, Li G S, et al. A robust PEEK/silver-coated hollow waveguide for terahertz bendable transmission in hot and cold environments[J]. *Results in Physics*, 2022, 35: 105395.
- [49] Liu S, Hou G N, Wu Y, et al. Copper coated PEEK hollow waveguide and durability investigations for low-loss and bendable transmission of low-frequency terahertz wave[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104674.
- [50] Tang X L, Sun B S, Shi Y W. Design and optimization of low-loss high-birefringence hollow fiber at terahertz frequency[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 24967-24979.
- [51] Liu S, Xie G X, Li G S, et al. Transmission and confocal imaging characteristics of bendable ABS/Ag-coated hollow waveguide at low THz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2023, 13(3): 193-199.
- [52] Abe S, Miyagi M. Transmission and attenuation of the dominant mode in uniformly bent circular hollow waveguides for the infrared: scalar analysis[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1991, 39(2): 230-238.
- [53] Miyagi M, Harada K, Aizawa Y, et al. Transmission properties of circular dielectric-coated metallic waveguides for infrared transmission[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 0484: 117-123.
- [54] Shi Y W, Ito K, Matsuura Y, et al. Multiwavelength laser light transmission of hollow optical fiber from the visible to the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2867-2869.
- [55] Aming A, Rahman B M A. Design and characterization low-loss modes in dielectric-coated hollow-core waveguides at THz frequency[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2716-2722.
- [56] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2945-2947.
- [57] Doradla P, Joseph C S, Kumar J, et al. Characterization of bending loss in hollow flexible terahertz waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19176-19184.
- [58] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(10): 2438-2447.
- [59] Wu K J, Qi C H, Zhu Z, et al. Terahertz wave accelerates DNA unwinding: a molecular dynamics simulation study[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(17): 7002-7008.
- [60] Yang X, Yang K, Luo Y, et al. Terahertz spectroscopy for bacterial detection: opportunities and challenges[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(12): 5289-5299.
- [61] Liu X, Qiao Z, Chai Y M, et al. Nonthermal and reversible control of neuronal signaling and behavior by midinfrared stimulation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(10): 2015685118.
- [62] Smye S W, Chamberlain J M, Fitzgerald A J, et al. The interaction between Terahertz radiation and biological tissue[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2001, 46(9): R101-R112.
- [63] Zhang J X, He Y, Liang S S, et al. Non-invasive, opsin-free mid-infrared modulation activates cortical neurons and accelerates associative learning[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2730.
- [64] Sun L, Zhao L, Peng R Y. Research progress in the effects of terahertz waves on biomacromolecules[J]. *Military Medical Research*, 2021, 8(1): 28.
- [65] Zhao L, Hao Y H, Peng R Y. Advances in the biological effects of terahertz wave radiation[J]. *Military Medical Research*, 2014, 1: 26.
- [66] Ito T, Matsuura Y, Miyagi M, et al. Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(5): 1230-1235.
- [67] Matsuura Y, Abel T, Harrington J A. Optical properties of small-bore hollow glass waveguides[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6842-6847.
- [68] Matsuura Y, Takeda E. Hollow optical fibers loaded with an inner dielectric film for terahertz broadband spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of*

- America B, 2008, 25(12): 1949-1954.
- [69] Sengupta A, Bandyopadhyay A, Bowden B F, et al. Characterisation of olefin copolymers using terahertz spectroscopy[J]. Electronics Letters, 2006, 42(25): 1477-1479.
- [70] Shi Y W, Ito K, Ma L, et al. Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance [J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6736-6740.
- [71] Melzer J E, Harrington J A. Silver/cyclic olefin copolymer hollow glass waveguides for infrared laser delivery[J]. Applied Optics, 2015, 54(32): 9548-9553.
- [72] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J, et al. Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [73] Jelinkova H, Miyagi M, Sulc J, et al. Delivery of high-powered picosecond pulses in near-IR region by special silver hollow-glass waveguides[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3596: 32-42.
- [74] Wang Y, Hiraga H, Matsuura Y, et al. Fabrication of robust hollow waveguide devices for Er: YAG laser light [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2977: 36-40.
- [75] Wang Y, Hongo A, Kato Y, et al. Thickness and uniformity of fluorocarbon polymer film dynamically coated inside silver hollow glass waveguides[J]. Applied Optics, 1997, 36(13): 2886-2892.
- [76] Kyaw C, Yahiaoui R, Chase Z A, et al. Guided-mode resonances in flexible 2D terahertz photonic crystals[J]. Optica, 2020, 7(5): 537-541.
- [77] Zhang X, Zhu X S, Shi Y W. Fabrication and performance investigation of the EVA/Ag coated hollow fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 802-809.
- [78] Xie G X, Zhong Y, Li G S, et al. 300GHz bending transmission of silver/polypropylene hollow terahertz waveguide[J]. Results in Physics, 2020, 19: 103534.
- [79] 张学文, 谭智勇, 陈可旺, 等. 介质金属膜波导在 G 波段和 4.3 THz 的传输特性[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(2): 215-222.  
Zhang X W, Tan Z Y, Chen K W, et al. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguides in G band and 4.3 THz[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(2): 215-222.
- [80] Tan Y X, Zhao F, He M H, et al. Transmission of high-frequency terahertz band signal beyond 300 GHz over metallic hollow core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 700-707.
- [81] Yu J J, Li X Y, Tang X L, et al. High-speed signal transmission at W-band over dielectric-coated metallic hollow fiber[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(6): 1836-1842.
- [82] 俞舒元, 朱晓松, 石艺尉. W 波段介质金属膜空芯波导的传输特性[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0306001.  
Yu S Y, Zhu X S, Shi Y W. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic hollow waveguide at W-band[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0306001.