

# 介质金属膜波导在 G 波段和 4.3 THz 的传输特性

张学文<sup>1</sup>, 谭智勇<sup>2</sup>, 陈可旺<sup>1</sup>, 李维轩<sup>1</sup>, 赵泽巧<sup>1</sup>, 俞舒元<sup>1</sup>, 朱晓松<sup>1</sup>, 曹俊诚<sup>2</sup>, 石艺尉<sup>1\*</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

**摘要:** 制作了具有不同介质膜厚度的大口径柔性介质金属膜波导, 测试了金属膜波导和介质金属膜波导在 G 波段、4.3 THz 和中远红外等频段的传输特性. 结果表明, 波导的传输损耗在 G 波段随介质膜厚的增加而增加, 孔径 2.6 mm 的金属膜波导在 160 GHz 传输损耗为 2.1 dB/m 且在 G 波段波导的传输损耗对弯曲不敏感. 在 4.3 THz 频点波导的传输损耗随介质膜厚的增加而减小, 镀制介质膜可以大幅减小波导的传输损耗以及弯曲附加损耗, 孔径 3.6 mm 介质膜厚为 1.2  $\mu\text{m}$  的介质金属膜波导的传输损耗为 2.84 dB/m. 光斑能量则随介质膜厚的增加更加集中于低阶传输模式.

**关键词:** 光纤光学; 介质金属膜波导; G 波段; 太赫兹; 传输损耗

**中图分类号:** TN252 **文献标识码:** A

## Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguides in G band and 4.3 THz

ZHANG Xue-Wen<sup>1</sup>, TAN Zhi-Yong<sup>2</sup>, CHEN Ke-Wang<sup>1</sup>, LI Wei-Xuan<sup>1</sup>, ZHAO Ze-Qiao<sup>1</sup>,  
YU Shu-Yuan<sup>1</sup>, ZHU Xiao-Song<sup>1</sup>, CAO Jun-Cheng<sup>2</sup>, SHI Yi-Wei<sup>1\*</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Key Laboratory of EMW Information (MoE),

Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Big-bore and flexible dielectric-coated metallic waveguides were fabricated with various dielectric film thicknesses. Transmission characteristics were measured for the metallic waveguides and dielectric-coated metallic waveguides in G band, 4.3 THz, and mid-infrared regions. Measured results show that waveguide loss in G band increases with the increase of dielectric film thickness. Loss for the 2.6 mm-bore metallic waveguide is 2.1 dB/m at the frequency of 160 GHz and the additional loss caused by bending for the waveguide is small. Waveguide loss at 4.3 THz decreases with the increase of dielectric film thickness. And the additional loss caused by bending for the dielectric-coated metallic waveguide decreases with the increase of dielectric film thickness. Loss for the 3.6 mm-bore dielectric-coated metallic waveguide with 1.2  $\mu\text{m}$  dielectric film thickness is 2.84 dB/m. Measured beam profiles show that energy is more concentrated in the low-order transmission mode as the film thickness increases.

**Key words:** fiber optics, dielectric-coated metallic waveguide, G band, terahertz, transmission loss

**PACS:** 84.40.-x, 84.40.Az

收稿日期:2018-07-27, 修回日期:2018-12-20

Received date:2018-07-27, revised date:2018-12-20

基金项目:国防科技创新特区项目支持

Foundation items: Supported by Science and Technology Commission of the Military Commission

作者简介 (Biography): 张学文 (1994-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究领域为介质金属膜波导的制作与测量. E-mail: 17210720180@fudan.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ywshi@fudan.edu.cn

## 引言

介质金属膜波导一般通过在基管内镀金属膜和介质膜得到<sup>[1-3]</sup>. 与金属膜波导相比, 介质膜增加了波导内表面的反射率, 大大提高了空气芯中传输能量的占比, 而干燥空气是低吸收介质, 从而降低了波导的传输损耗. 这种波导具有柔韧性好、结构简单、损耗低等优点. 对介质金属膜空芯波导的研究始于 20 世纪 50 年代, H. G. Unger 提出在金属空芯波导内面镀介质薄膜可以有效减小弯曲损耗<sup>[1]</sup>. 之后, M. Miyagi 等提出了多层膜结构的介质金属膜波导来降低传输损耗<sup>[2]</sup>, 并利用传输线模型分析了波导的传输模式和损耗特性<sup>[3]</sup>. 由于石英光纤对波长大于  $2\ \mu\text{m}$  的光波有较大的传输损耗, 而介质金属膜波导的突出性能是它对于波长大于  $2\ \mu\text{m}$  的中远红外波的低损耗特性和大功率传输能力<sup>[4]</sup>, 因此介质金属膜波导在中远红外波段得到广泛的应用. 例如文献[5]报道了利用介质金属膜波导传输高达 3 kW 的  $\text{CO}_2$  激光, 传输损耗为 0.1 dB/m.

太赫兹波属于亚毫米波段, 即远红外波段, 其频率覆盖 0.1 ~ 10 THz, 或波长从 3 mm 到 30  $\mu\text{m}$ <sup>[6-7]</sup>. THz 波段由于其本身所具有的高透射性、低能量性、吸水性、瞬态性、相干性和指纹光谱等优良性质有着极大的价值和前景<sup>[8]</sup>. 近年来, 介质金属膜波导在 THz 波段的应用受到广泛关注. 理论和实验研究表明, 介质金属膜波导是有效的 THz 波传输媒介之一. 其中 1 mm 内径的镀银和聚苯乙烯介质金属膜波导在 2.3 THz 频率实现低至 4 ~ 5 dB/m 的传输损耗. 近年来, 有关介质金属膜波导的相关研究多有论述<sup>[9-12]</sup>.

将中红外波段的波导特性和研究结果直接应用在 THz 波段, 还存在一定的局限性和问题, 因为传输波长增大、金属和介质材料本身的特性有所改变, 波导内径接近传输波长甚至亚波长时, 在红外的理论结果不再适用或存在很大的误差. 特别是在毫米波段, 波导的传输特性有别于中红外波导的规律特性. 本文的研究针对 G 波段 (110 ~ 220 GHz) 和 4.3 THz, 比较研究了介质金属膜波导在上述波段的传输特性.

## 1 介质金属膜波导的制备

### 1.1 镀膜工艺

介质/金属膜结构的空芯波导, 是在基管内面镀制金属薄膜后, 再镀制介质层, 利用多层膜实现目标

波长的高反射率从而降低传输损耗. 该结构的空芯波导要求基管内表面光滑均匀<sup>[13]</sup>, 本研究选用柔韧性较好的聚碳酸酯 (Polycarbonate, PC) 材料作为基管. 由于太赫兹波的波长远大于中红外光, 为了与 THz 光源高效耦合, 空芯波导孔径一般远大于红外波段波导. 本文选用的基管有两种规格, 其内径/外径 (inner diameter/outer diameter, ID/OD) 分别为 3.6/4 mm 和 2.6/3 mm, 基管长度均为 1 m.

介质金属膜波导的金属层与介质层材料有多种选择. 在常见的几种金属材料中, 银 (Ag) 具有较高的反射率且制作工艺成熟, 是目前最为常用的空芯波导金属层材料<sup>[14]</sup>. 介质材料的选择则主要考虑材料对 THz 波的吸收以及成膜的难易. 目前使用较多的介质膜包括在 THz 波段吸收较低的环烯树脂 (cyclic olefin polymer, COP)<sup>[15]</sup> 和聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 等聚合物材料. 本研究中, THz 空芯波导内壁镀制银膜与 COP 介质膜, 其中 COP 的折射率为 1.53.

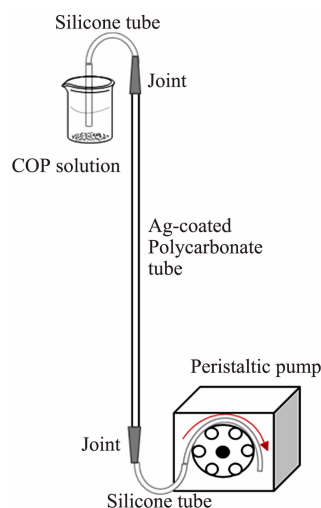


图 1 COP 介质膜镀制系统示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for the coating system of COP film

在制作 Ag/COP 结构的 THz 介质金属膜波导时, 首先在 PC 基管内表面镀制一层银膜. 镀制银膜采用银镜反应法<sup>[16-17]</sup>. 银膜厚度约为  $0.25\ \mu\text{m}$ , 远大于在 THz 频率下的趋肤深度. 然后在银膜上镀制 COP 介质膜. 首先将商用 COP 颗粒溶解在环己烷中制备不同浓度的 COP 溶液, 本研究的 COP 溶液浓度为 10% ~ 13%. 利用精密蠕动泵抽取一段 COP 溶液液柱, 使液柱以均匀流速通过已镀银的空芯波导, 如图 1 所示. 在银膜表面留下液态 COP 介质薄膜,

环己烷溶剂通过吹氮气、加热等方式挥发,最后形成一层均匀的 COP 介质膜.该方法已在中红外光波导的制作工艺上得到广泛应用.

### 1.2 介质膜厚测算与样品制作

实际制作的介质膜厚一般利用介质金属膜波导的损耗谱来判断,根据损耗谱中干涉峰的位置计算其内面 COP 膜的厚度.由于 THz 波导孔径大,膜的均匀度不够,用傅立叶变换红外光谱仪(Fourier Transform infrared spectroscopy, FTIR)测得的损耗谱难以观察到清晰的干涉峰.因此采用称重测量和经验公式计算的方法对 COP 膜厚进行估算.以孔径 2.6 mm,13% 浓度 COP 溶液制作的介质金属膜波导为例,首先对镀银后的空芯波导样品称重,重量为 2.046 g,再对镀制 COP 介质膜后的波导称重,重量为 2.055 g.固体 COP 密度为  $1 \text{ g/cm}^3$ ,由此可得 COP 介质膜的体积,再根据波导孔径和长度可以得到波导的内表面积,最终由 COP 膜的体积和表面积估算介质膜的厚度约为  $1.15 \text{ }\mu\text{m}$ .

COP 介质膜厚度也采用空芯波导介质膜镀膜的经验式(1)<sup>[18]</sup>进行估算,

$$d = \left(\frac{ac}{200}\right) \sqrt{\frac{V\eta}{\gamma}}, \quad (1)$$

其中  $d$  为介质膜厚, $a$  为波导的内半径, $c$  为溶液浓度, $V$  为溶液流速, $\eta$  为溶液黏度, $\gamma$  为溶液的表面张力.将关于 COP 材料的经验参数代入式(1),得到 COP 介质膜厚  $d$  与波导的内半径  $a$ 、溶液百分浓度  $c$  及溶液流速  $V$  的经验式(2),

$$d = 2.97 \times a \times c \times \sqrt{V}. \quad (2)$$

将 COP 溶液浓度和送液速度等工艺参数和波导几何参数等代入式(2),可得在对应工艺条件下的 COP 介质膜厚.上述实例的计算膜厚为  $1.14 \text{ }\mu\text{m}$ ,与实测值  $1.15 \text{ }\mu\text{m}$  基本符合.

采用上述工艺制作了 6 种具有不同内径和 COP 膜厚的波导样品,COP 膜厚为 0 的波导没有实施镀介质膜工艺,为金属膜波导.样品长度均为 1 m,内径分别为 2.6 mm 和 3.6 mm,外径分别为 3 mm 和 4 mm,COP 介质膜膜厚参数如表 1 所示.

## 2 传输特性测试系统与方法

### 2.1 波导中红外波段损耗谱测量

波导在中红外波段的损耗谱测量系统如图 2 所示.系统采用 BRUKER 公司的 VERTEX 70 红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR).FTIR 光谱仪发射的宽谱光经过耦合波导和待测波

表 1 金属和介质金属膜波导样品

Table 1 Summary of the Ag and COP/Ag waveguide samples

波导样品	ID/OD	COP 溶液浓度	COP 膜厚
1	3.6/4 mm	0%	0 $\mu\text{m}$
2	3.6/4 mm	10%	0.92 $\mu\text{m}$
3	3.6/4 mm	13%	1.20 $\mu\text{m}$
4	2.6/3 mm	0%	0 $\mu\text{m}$
5	2.6/3 mm	10%	0.88 $\mu\text{m}$
6	2.6/3 mm	13%	1.15 $\mu\text{m}$

导到达检测器,首先测量耦合波导的输出功率作为背景,根据待测波导的输出功率和背景功率计算波导的损耗谱.通过测得的损耗谱可以初步判断制备的 Ag 和 Ag/COP 波导样品中的银膜和介质膜的成膜质量.



图 2 波导中红外波段损耗测量系统

Fig. 2 The FTIR system of mid-infrared region for the dielectric-coated metallic waveguides

### 2.2 波导 G 波段损耗谱测量

波导在 G 波段的损耗测量系统如图 3 所示,系统采用 Erzia 公司的 CSS-UI20 高频信号发生器和 VDI 公司的 12 倍频器产生高频信号.高频信号通过 WR5 标准波导直接耦合进入待测波导样品.检测端采用 WR5 波导直接耦合,通过检波器进入功率计测量输出功率,功率计采用 VDI 公司的 PM5 功率计.该功率计工作频率  $75 \text{ GHz} \sim 3 \text{ THz}$ ,功率测量范围  $1 \text{ }\mu\text{W} \sim 200 \text{ mW}$ .



图 3 波导 G 波段损耗测量系统

Fig. 3 Measuring system for the dielectric-coated metallic waveguides in G band

信号源输出 WR5 波导和检测器输入 WR5 波导直接耦合,测量值作为系统的背景功率值记录.其后待测波导的输入输出端直接与信号源和检测器的 WR5 波导耦合,采用微调架仔细调节波导输入输出端与 WR5 波导的相对位置,获得的最大功率值作为

计算损耗的依据. 实际测量中, 背景功率采用功率计的不同测量档位多次测量, 取其平均值作为背景. 相同波导多次测量取平均值计算损耗. G 波段损耗测量系统图片如图 4 所示. 图 4(a) 为检波器和 PM5 功率计, 图 4(b) 为高频信号发生器和 12 倍频器.

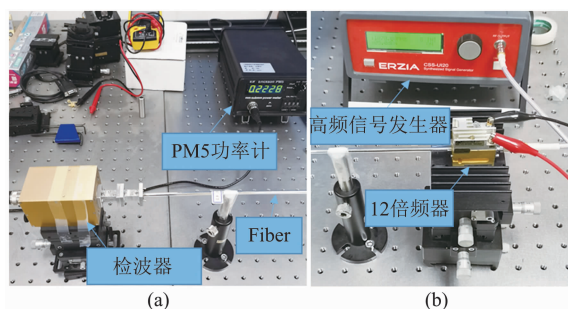


图 4 G 波段损耗测量系统照片 (a) 检波器和 PM5 功率计, (b) 高频信号发生器和 12 倍频器

Fig. 4 Photo of the measuring system in G band (a) Detector and PM5 power meter, (b) high frequency signal generator and 12 frequencies multiplier

### 2.3 波导 4.3 THz 频点损耗测量

波导在 4.3 THz 频点的损耗测量系统如图 5 所示. 信号源采用 4.3 THz 量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL), QCL 由液氮冷却, 在专用激光器电源的驱动下发射频率 4.3 THz 激光. 激光经由高阻硅透镜聚焦, 通过光圈缩小光斑后, 耦合进入待测波导. Ophir 3A-P-THz 光功率计, 以及 NEC T0831C THz 阵列探测器用来测量输入/输出信号功率及光斑形状.

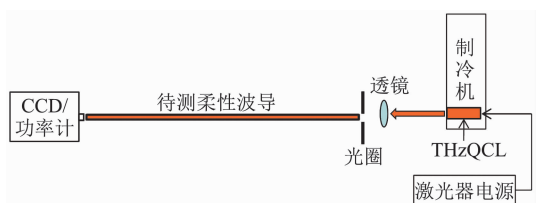


图 5 波导 4.3 THz 频点损耗测量系统

Fig. 5 The measuring system for the dielectric-coated metallic hollow waveguides at 4.3 THz

由于空气中的水汽对 4.3 THz 波存在较大吸收, 每次测量前向待测波导中吹干燥氮气进行除湿. 首先测量 QCL 信号源在光圈后的输出功率作为光波导的输入功率. 光波导的输入端与光圈直接耦合, 测量波导输出端的功率作为输出功率. 然后将长波导切下 10 cm, 测量 10 cm 短波导的输出功率, 根据短波导的输出功率和长波导的输出功率的比值计算波导的损耗. 该损耗值去除了光圈与波导的耦合损

耗. 对样品波导进行了弯曲传输特性的测试, 在实验中, 波导进行了  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  与  $180^\circ$  的弯曲测试, 波导的有效弯曲长度均为 80 cm, 波导两端各留 10 cm 保持为直线状态. 进行上述测量的同时还对波导的输出光斑特性进行了测量记录. 频点 4.3 THz 损耗测量系统图片如图 6 所示.

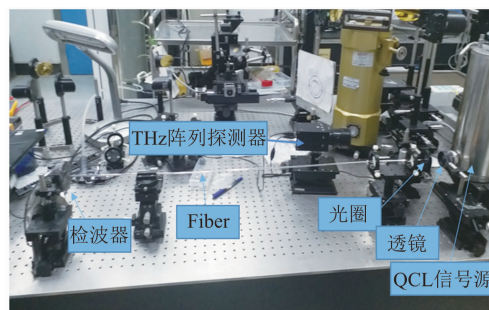


图 6 频点 4.3 THz 损耗测量测试系统图片

Fig. 6 Photo of the measuring system at 4.3 THz

## 3 介质金属膜波导测量结果

### 3.1 中红外波段损耗谱特性

图 7 为不同介质膜厚的介质金属膜波导在中红外波段的实测损耗谱. 从图 7 中可知, 随着介质膜厚度的增加, 波导在中红外波段的损耗逐渐下降, 波导 2 损耗最低为 1.18 dB/m, 波导 3 损耗最低为 1.31 dB/m; 金属膜波导 1 在中红外波段具有较平坦的损耗特性, 损耗在 5 dB/m 左右. 介质金属膜波导在波长  $3.5 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$  处的峰值分别为 COP 薄膜材料和空气中  $\text{CO}_2$  气体的吸收峰. 银膜的镀膜质量在前期实验中做过原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 表征, 银膜表面的粗糙度 (均方根值) 约为  $10 \text{ nm}$ <sup>[20]</sup>. 介质膜的质量通常采用 FTIR 测量的损耗谱表征. 损耗谱有明显的干涉峰, 则表明 Ag 表面的 COP 膜具有较好的均匀性. 本文中采用内径约 4 mm 的基管, 介质膜镀膜难度较大. COP 膜在光纤的轴向和横向的均匀性均有所下降, 因而干涉峰的质量较差, 如图 7 所示. 图 7 波导损耗谱中 Waveguide 2# 和 3# 的损耗谱分别在  $2.5 \mu\text{m}$  和  $4 \mu\text{m}$  有不清晰的干涉峰, 说明 COP 在波导内面成膜, 但是膜厚沿周边和轴向均匀性有所下降. 理论上均匀干涉峰应该具有较高的峰值和较小的宽度. 实验结果与中红外波导的研究结果基本相似, 由此可以认为在柔性大口径基管中, 银膜与介质膜均成膜正常.

### 3.2 波导 G 波段损耗特性

图 8 为不同介质膜厚的波导在 G 波段的损耗

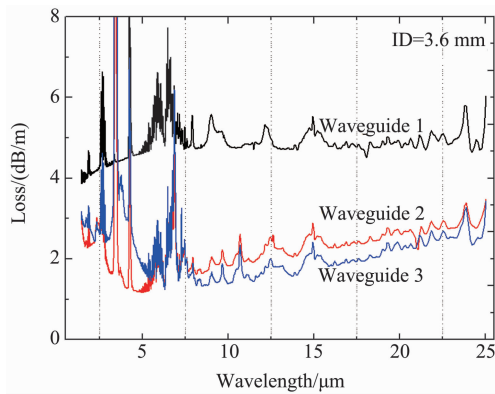


图7 不同介质膜厚的介质金属膜波导在中红外波段的实测损耗谱  
 Fig.7 Measured loss spectra of COP-coated metallic waveguides with different COP thickness in mid-infrared region

谱,图中散布点为实测值,曲线为基模损耗的仿真结果.从基模损耗可以看到金属膜波导的损耗随频率的增大而减小,介质金属膜波导的损耗先随着频率的增大而减小,至最小值后又随着频率的增大而增大.随着介质膜厚度的增加,以上趋势会越来越明显,损耗最低点会向低频率方向移动.从图8可得实测与理论仿真结果基本相符.金属膜波导1最低损耗对应的频率为200 GHz,实测损耗值为3.02 dB/m.实测与理论仿真结果均表明,在G波段镀制介质膜不能降低波导损耗且介质金属膜波导的损耗随介质膜厚度的增大而单调增大.但通过镀制介质膜,可以观察到波导的基模损耗随着频率减小而增大的速度减缓.无论是金属膜波导还是介质金属膜波导,在G波段波导的基模损耗都不足以完整描述波导的损耗特性:由于光源近似为高斯光,且基模耦合效率远高于其他模式,所以可以用基模损耗近似分析波导损耗,因为有高次模的存在,实测损耗值高于理论仿真

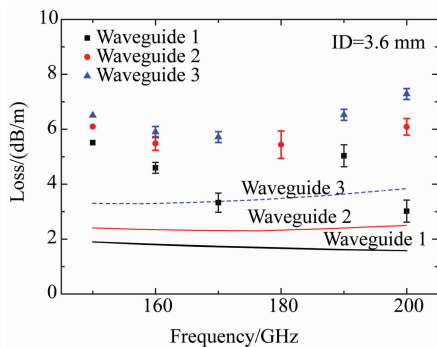


图8 不同介质膜厚的介质金属膜波导在G波段的损耗谱  
 Fig.8 Loss spectra of the COP-coated metallic waveguides with different COP thicknesses in G band

值.实验所得结果也与文献<sup>[8]</sup>的结论相同:在G波段,金属波导的基模传输损耗是随频率增大而减小的,介质金属膜波导的损耗随介质膜厚度的增加而单调增加,介质膜难以改善波导的损耗特性.

图9为不同介质膜厚波导在G波段的基模耦合效率的仿真结果.由图7可得随着频率的增加,金属膜波导在G波段的耦合效率增大,而介质金属膜波导的耦合效率则先增大再减小<sup>[8]</sup>,且拐点会随膜厚增加而向低频率方向移动,由于实验波导样品中的介质膜较薄,对耦合效率的影响较小.仿真结果显示,COP膜厚增加到100 μm,耦合效率没有很大变化.

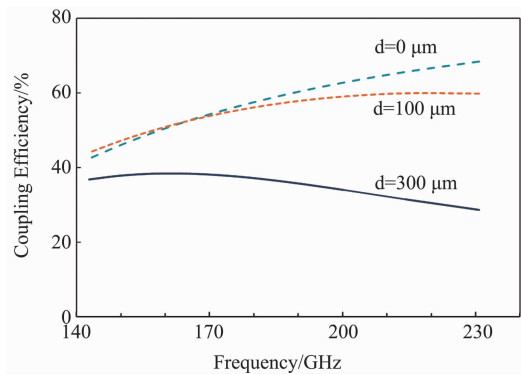


图9 不同介质膜厚的介质金属膜波导在G波段的基模耦合效率  
 Fig.9 Coupling efficiency of the COP-coated metallic waveguides with different COP thickness in G band

图10是金属(Ag)膜波导在G波段不同弯曲角度下的损耗.从图10可以看出,金属膜波导的损耗随波导弯曲角度的增大有所增加,数据计算可得45°弯曲的波导附加损耗在0.02~1.59 dB/m之间,90°弯曲的波导附加损耗在0.3~1.62 dB/m之间.图中显示0°、45°和90°三条曲线基本接近,说明金属膜波导损耗对弯曲不敏感.从趋势来看,金属膜样

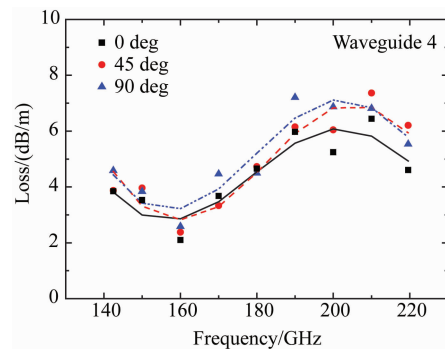


图10 金属(Ag)膜波导在G波段不同弯曲角度下的损耗  
 Fig.10 Loss of the Ag waveguides with different bending angles in G band

品波导 4 的损耗在 G 波段呈现先下降再上升再下降的趋势,在频率为 160 GHz 处金属膜波导的损耗达到最低,直线损耗为 2.10 dB/m,45°弯曲的波导损耗为 2.38 dB/m,90°弯曲的波导损耗 2.59 dB/m. 这些特性使得金属膜波导适用于需要弯曲的应用场景.

### 3.3 波导 4.3 THz 频点损耗特性

图 11 是在 4.3 THz 频点附近不同介质膜厚的介质金属膜波导的仿真损耗谱,从仿真结果可以看出随着介质膜厚度的增加波导损耗逐渐下降,而且相比于金属膜波导,波导损耗大幅下降. 图 12 是在 4.3 THz 频点不同介质膜厚的介质金属膜波导在不同弯曲角度下的实测损耗. 可以看出在该频点介质金属膜波导的损耗随波导弯曲角度的增大而增大;介质膜可以显著降低波导的传输损耗. 直线波导随着膜厚的增加,传输损耗分别为 4.79 dB/m、4.19 dB/m、2.84 dB/m,波导 3 由于介质膜厚最大,波导传输损耗最小,与理论结果吻合.

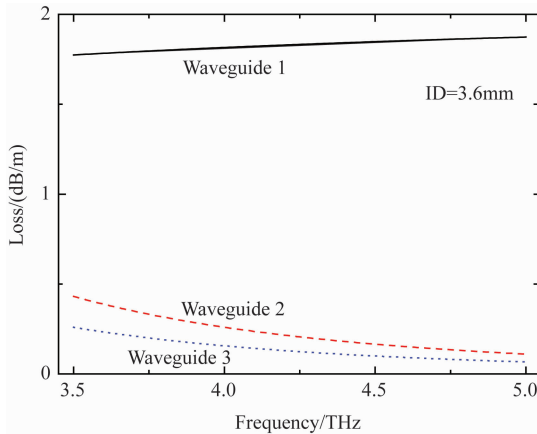


图 11 在 4.3 THz 频点附近不同介质膜厚的介质金属膜波导的仿真损耗谱

Fig. 11 Simulated loss spectra of the COP-coated metallic waveguides with different COP thicknesses near 4.3 THz

根据文献[3]报道,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为,

$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_d^2 - 1}} \tan^{-1} \left( \frac{n_d}{\sqrt{n_d^2 - 1}} \right), \quad (3)$$

其中  $n_d$  为介质膜材料折射率,  $\lambda$  为传输波长. 考虑介质膜的吸收系数以及膜表面的粗糙度时,最佳膜厚值有所减小<sup>[19]</sup>. 在 4.3 THz 频点,介质折射率为  $n_d = 1.53$ ,按照最佳膜厚理论<sup>[3]</sup>,可得最佳膜厚为 9.18  $\mu\text{m}$ . 当介质膜厚度小于 9.18  $\mu\text{m}$  时,波导传输损耗随着介质膜厚的增大而减小. 制作条件所限,测

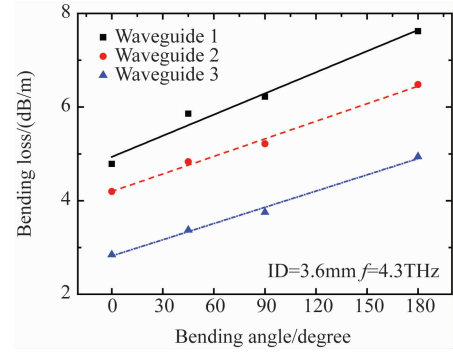


图 12 在 4.3 THz 频点不同介质膜厚的介质金属膜波导在不同弯曲角度的损耗

Fig. 12 Bending loss of the COP-coated metallic waveguides with different bending angles at 4.3 THz

试的波导介质膜厚度在 1  $\mu\text{m}$  左右(参见表 2),因此膜厚增大向最佳膜厚靠拢时,波导损耗下降.

从图 12 损耗测量结果中计算波导的弯曲附加损耗,如图 13 所示. 从图中可见,在 4.3 THz 频点处,介质膜对于降低波导的弯曲附加损耗有明显的效果. 例如,当波导 90°弯曲时,对应不同 COP 膜厚的波导的弯曲附加损耗分别为 1.62 dB/m、1.01 dB/m、0.90 dB/m,相比于金属波导降幅为 38% 和 44%;另外,随着介质膜厚度的增加,弯曲带来的附加损耗的曲线的斜率下降,即弯曲损耗的增长速度减缓. 这些特性有利于介质金属膜波导在弯曲等复杂状态下的应用.

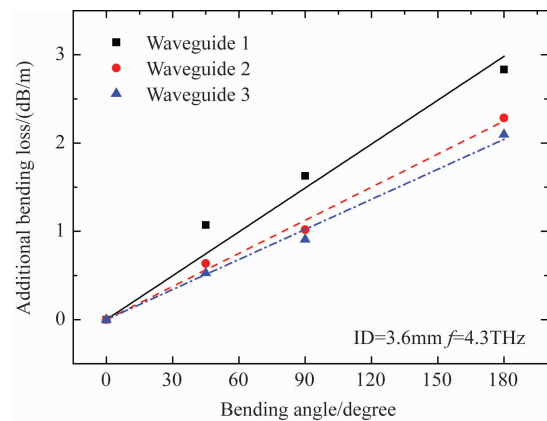


图 13 在 4.3 THz 频点不同介质膜厚的波导在不同弯曲角度的弯曲附加损耗

Fig. 13 Additional loss of bending of the COP-coated metallic waveguides with different bending angles at 4.3 THz

实验中使用 THz 阵列探测器测量了介质金属膜波导输出端的光斑图像,以观察输出光在空间中的强度分布及变化. THz 光源输出光斑如图 14 所示. 光斑的对称性不够好,但光强近似为高斯分布.

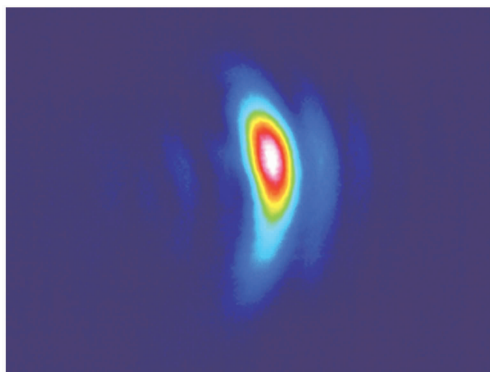


图 14 在 4.3 THz 频点 QCL 光源输出光斑测量图  
Fig. 14 Measured output beam profile for the 4.3 THz QCL

图 15 为在 4.3 THz 频点介质金属膜波导在不同膜厚、不同弯曲角度下输出的光斑图像。可以看出,图 14 中准单模的光源输出经过样品波导的传输后形成了多种传输模式的混合;相同介质膜厚度的情况下,弯曲角度越大,光斑能量趋于分散,激起的高阶模式越多;当介质膜厚增大时,输出光斑的强度分布趋于集中,光波能量在低阶模中的比例增加。这是由于弯曲之后,激发出的高次模比率增大,波导的传输损耗增加,输出光斑的强度分布也更加分散。而介质膜的存在使 p 光衰减减小,输出光中的低次模由 s 光占优的  $TE_{01}$  模式逐渐向 s 光与 p 光相对平衡的基模  $HE_{11}$  等低阶模式转变<sup>[13]</sup>,从而使得输出光内的高次模的能量的比率减少,光斑光强变得更为集中。

#### 4 结论

利用液相沉积法成功制作了孔径分别为 3.6/4 mm 和 2.6/3 mm 两种不同介质膜厚度的大口径柔性介质金属膜空芯波导,金属膜采用银 (Ag),介质膜采用环烯树脂 (COP)。分别在中红外、G 波段和 4.3 THz 等不同频段对波导的传输特性进行测试研究。针对不同波段搭建了三套测试系统,获得了金属膜波导和介质金属膜波导在不同频率下的传输特性。

通过 FTIR 光谱仪测得的中红外损耗谱可以判断金属和介质膜成膜良好;在 G 波段,测量了波导的传输损耗以及不同弯曲角度下的弯曲附加损耗。实测与理论仿真结果证明了在 G 波段为金属膜波导镀制介质膜不能降低波导损耗且介质金属膜波导的损耗随介质膜厚度的增大而单调增大;在 4.3

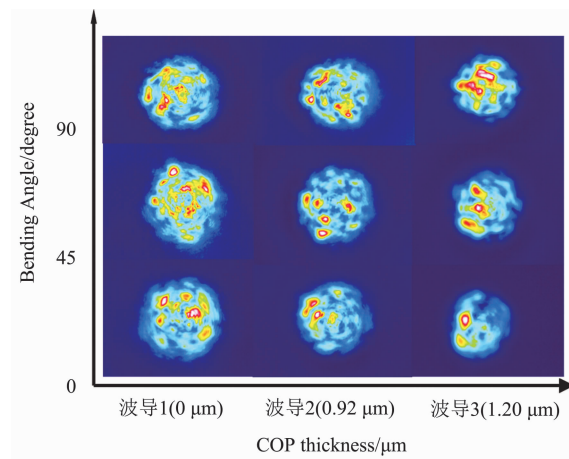


图 15 频点 4.3 THz 处介质金属膜波导在不同膜厚和弯曲角度输出的光斑图

Fig. 15 Measured output beam profile of the COP-coated metallic waveguides with different COP thicknesses and different bending angles at 4.3 THz

THz 频点,测量了波导在不同弯曲角度下的传输损耗和弯曲附加损耗。在该频点介质金属膜波导的损耗随波导弯曲角度的增大而增大。介质膜可以大幅减小波导的传输损耗和弯曲附加损耗。COP 介质膜厚度为 1.2  $\mu\text{m}$  的介质金属膜波导的传输损耗可以达到 2.84 dB/m,弯曲附加损耗相比于金属膜波导降幅达 40%。光斑能量则随介质膜厚的增加和弯曲角度的减小,更加集中于低阶传输模式。

介质金属膜波导具有口径大、柔韧性好、易与光源耦合等特点,并且在中红外、毫米波段和 THz 波段损耗较小,在短距离通信、测量和传感等领域中有着广阔的应用前景。

#### References

- [1] Unger H G. Circular electric wave transmission in a dielectric-coated waveguide [J]. Bell System Technical Journal, 1957, **36**(5): 1253 - 1278.
- [2] Miyagi M, Hongo A, Kawakami S. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguide for infrared transmission: slab waveguide model [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, **19**(2): 136 - 145.
- [3] Miyagi M, Kawakami S. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, **2**(2): 116 - 126.
- [4] Harrington J A. Infrared fiber optics and their applications [M]. SPIE Press, 2004.
- [5] Hongo A, Morosawa K, Matsumoto K, et al. Transmission of kilowatt-class  $\text{CO}_2$ -laser light through dielectric-coated metallic hollow waveguides for material processing [J]. Applied Optics, 1992, **31**(24): 5114 - 5120.
- [6] Beckman J E, Harries J E. Submillimeter-wave atmospheric and astrophysical spectroscopy [J]. Applied Optics, 1975,

- 14:470–485.
- [7] Salomonovich A. Extra-atmospheric submillimeter astronomy [J]. *Phys. Uspekhi*, 1970, **12**:731–742.
- [8] YU Shu-Yuan, ZHU Xiao-Song, SHI Yi-Wei. The transmission characteristics of dielectric-coated metallic hollow waveguide at W-band [J]. *Acta Optica Sinica* (俞舒元, 朱晓松, 石艺尉. W 波段介质金属膜空心波导的传输特性. *光学学报*), 2018, **38**(3):0306001.
- [9] 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.
- [10] Aming A, Rahman M A. Design and characterization low-loss modes in dielectric-coated hollow-core waveguides at THz [J]. *Frequency Journal of lightwave technology*, 2018, **36**(13):2716–2722.
- [11] 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.
- [12] Carlos M B, Jeffrey E M., Harrington J A. Fabrication and characterization of improved Ag/PS hollow-glass waveguides for THz transmission [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(27): 6703–6709.
- [13] LI Yi-Qing, TAN Zhi-Yong, CAO Jun-Cheng et al. Fabrication and characterization of big-bore flexible dielectric-coated metallic terahertz waveguides [J]. *Acta Optica Sinica* (李怡卿, 谭智勇, 曹俊诚, 等. 大口径柔性介质金属膜太赫兹波导的制作与特性. *光学学报*), 2016, **36**(1): 0106003.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Croitoriu N, Dror J, Goldenberg E, et al. Hollow fiber waveguide and method of making same; U. S. Patent 4930863 [P]. 1990-6-5.
- [17] Harrington J A, Abel T C, Hirsch J. Coherent, flexible, coated-bore hollow-fiber waveguide; U. S. Patent 5440664 [P]. 1995-8-8.
- [18] 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.
- [19] Sun B S, Tang X L, Shi Y W, et al. Optimal design for hollow fiber inner-coated by dielectric layers with surface roughness [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3461–3463.
- [20] 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):6736–3670.