

# 大口径柔性介质金属膜太赫兹波导的制作与特性

李怡卿<sup>1</sup> 谭智勇<sup>2</sup> 曹俊诚<sup>2</sup> 汤晓黎<sup>1</sup> 石艺尉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433

<sup>2</sup>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** 基于介质/金属膜结构空芯波导的原理, 制作了用于太赫兹波传输的大口径柔性介质/金属膜波导。针对大口径的特点, 设计改良了液相镀膜法并制作了具有不同介质膜厚的柔韧波导。对制作波导的介质膜厚和损耗谱等进行了理论分析和实验验证。采用发射频率为 2.5 THz 的量子级联激光器, 对介质/金属膜结构太赫兹空芯波导的传输损耗、弯曲附加损耗以及光斑能量分布特性等进行了实验研究。结果表明, 传输损耗及弯曲附加损耗均随介质膜厚的增加而减小, 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; 空芯波导; 太赫兹; 大口径柔性波导

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0106003

## Fabrication and Characterization of Big-Bore Flexible Dielectric-Coated Metallic Terahertz Waveguides

Li Yiqing<sup>1</sup> Tan Zhiyong<sup>2</sup> Cao Juncheng<sup>2</sup> Tang Xiaoli<sup>1</sup> Shi Yiwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

<sup>2</sup>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 waveguides are fabricated for Terahertz wave transmission based on the structure of dielectric-coated metallic hollow waveguides. The liquid-phase coating technique for the dielectric film inner-coating is modified and improved for the large-bore waveguides. The dielectric film thickness and the loss spectrum are theoretically and experimentally discussed. The experimental system is established to evaluate the transmission loss, additional bending attenuation, and output beam profile of the Terahertz (THz) waveguides at the frequency of 2.5 THz. According to the measured results, the transmission loss and additional bending attenuation are both decreased as the dielectric film thickness increases in the THz waveguides, while the energy distribution of beam profiles tends to focus on lower transmission modes.

**Key words** fiber optics; hollow waveguide; terahertz; big-bore flexible waveguide

**OCIS codes** 060.2310; 060.2280; 060.2300

## 1 引 言

太赫兹波(THz wave)通常是指频率在 0.1~10 THz(波长为 3000~30  $\mu\text{m}$ )范围的电磁波,属于亚毫米波、远红外波范畴。与微波、毫米波相比,THz探测系统具有更高的分辨率、抗干扰能力与反隐身能力;而与激光相比,THz系统又具有搜索能力强、视场范围宽且适用于恶劣气象条件等优点。THz波所具有的这些优越特性使其在传感、检测和成像等众多方面具有重要的学术与应用价值,是当前备受瞩目的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。在THz系统的组成中,THz传输波导如同THz源与检测系统一样,是其中关键的组成部分,承担着作为THz波

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(61201062)

作者简介: 李怡卿(1991—),女,硕士研究生,主要从事空芯波导的制作与测量方面的研究。

E-mail: 13210720100@fudan.edu.cn

导师简介: 石艺尉(1963—),男,教授,主要从事光波导方面的研究。E-mail: ywshi@fudan.edu.cn(通信联系人)

传输媒介的职责。

在早期的 THz 波导研究中,人们沿用了微波波导与近红外光纤的理念,提出的波导结构有共面传输线(Coplanar Strip Transmission Line)<sup>[3]</sup>、微波传输带(Microstrip Line)<sup>[4]</sup>和蓝宝石光纤(Sapphire Fiber)<sup>[5]</sup>等经典结构。因为空气尤其是干燥空气相较于其他材料对于 THz 波的吸收较小,研究者在之后的研究中采用提高 THz 波在空气中的传输比例以降低传输损耗。其中一种方法就是增加纤芯的空气比例,此种方法又包含许多重要的 THz 光纤种类。比如光子晶体波导,采用全内反射或者光子带隙导光,被报道的光纤介质材料包括聚四氟乙烯(PTFE)<sup>[6]</sup>、环烯烃类聚合物(COC)<sup>[7]</sup>等聚合物。聚合物管波导,在聚合物管类别的介质管材料外壁镀银构成波导,管材的壁厚即为介质/金属膜波导的介质膜厚,可以实现较大的介质膜厚,适于 THz 波的传输需求<sup>[8]</sup>。金属空芯波导,采用金属材料制作或者基管内壁镀金属膜得到,在导光传输之外小尺寸的该种光纤还可用于 THz 光源的整形<sup>[9]</sup>。介质/金属膜结构空芯波导,在基管内壁镀制金属膜与介质膜,这种在中红外光传输和传感系统<sup>[10-11]</sup>中常用的波导结构对 THz 波传输同样有效。被报道用于 THz 传输的波导介质材料包括金属盐(如 Ag<sup>[12]</sup>)与聚合物(如聚苯乙烯 PS<sup>[13]</sup>)等,其中 1 mm 内径的镀银聚苯乙烯空芯波导在 2.3 THz 频率已可实现低至 4~5 dB/m 的传输损耗及对于 HE<sub>11</sub> 模式 6 ps/(THz·m) 的色散。该结构波导是 THz 光传输波导领域的重要方向之一,也是本文的研究重点。

## 2 THz 空芯波导的制备与分析

### 2.1 THz 空芯波导

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,利用多层膜实现高反射率从而降低传输损耗,其具体截面结构如图 1 所示。该结构的空芯波导对镀膜基管要求表面光滑、均一性好,基管材料可以选择玻璃、金属或高分子聚合材料。为了获得低损耗及与 THz 光源较好的耦合,通常需要选取的空芯波导孔径远大于红外波段波导,因此实验选用的基管内径为 4 mm;同时为了使制作波导具有较好的柔韧性,以便于系统中 THz 波传输方向的调节,基管材料也选用柔韧性较好的聚合物。

与基管材料的选择类似,空芯波导的金属层与介质层材料也有多种选择。在常见的几种金属材料中,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>。除此之外,聚合物材料(Polymer)的成膜过程通常采用物理方法,形成的介质膜粗糙度较金属盐更低,且膜厚均匀,也是一种理想的备选材料。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烃树脂(COP)<sup>[15]</sup>、聚苯乙烯(PS)<sup>[13]</sup>等聚合物材料。实验中,THz 空芯波导的基管使用长度为 1 m、内径为 4 mm 的聚碳酸酯(PC)管,内壁镀制银膜与 COP 介质膜。

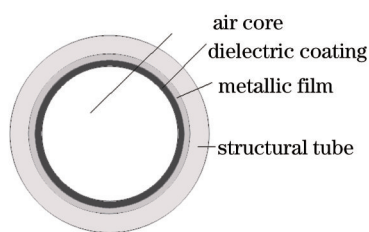


图 1 介质/金属膜结构空芯波导截面结构示意图

Fig.1 Cross-section of dielectric-coated metallic hollow waveguides

### 2.2 THz 空芯波导的制作

在制作 Ag/COP 结构的 THz 空芯波导时,首先在基管内壁镀制一层银膜。镀制银膜的方法采用银镜反应法。使用真空泵抽取硝酸银溶液和还原液,混合溶液通过基管时发生银镜反应,使银膜附着在基管内壁上<sup>[16-17]</sup>。在银膜镀制工艺完成后,再于银膜上加镀 COP 介质膜。配制不同浓度的 COP/环己烷溶液,利用蠕动泵使 COP 溶液以均匀流速通过已镀银的空芯波导,如图 2 所示。在银膜表面残留一层液态 COP/环己烷薄膜,环己烷溶剂通过加热等方式挥发,最后留下均匀的 COP 介质膜。

该介质膜镀制系统与传统的液相镀膜系统<sup>[18]</sup>有所不同。传统的液相镀膜采用柱状溶液在镀银波导中以缓慢匀速通过的方式,在银膜表面残留液态膜。柱状溶液在镀银波导中的通过速度由蠕动泵的转动速度控制。

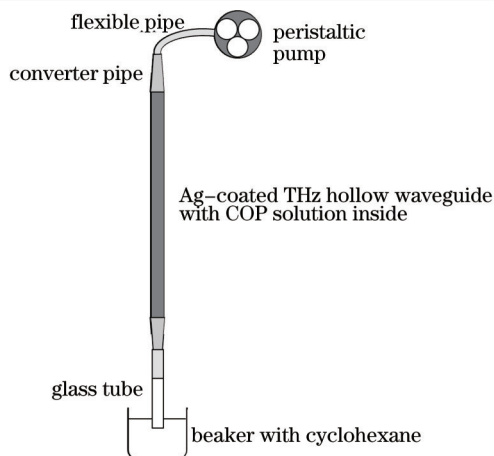


图2 THz空芯波导COP介质膜镀制系统示意图

Fig.2 Schematic diagram for the coating system of COP film in THz hollow waveguides

由于实验采用了内径4 mm的大口径波导基管,液体的表面张力难以将柱状溶液维持在4 mm内径的波导之中,因此传统工艺中的送液方法无法保持溶液在波导中匀速通过。

为使配制溶液能够以匀速通过波导内部,首先将待镀制的镀银空芯波导内注满COP环己烷溶液,之后使用蠕动泵将COP溶液以匀速释放出波导,并用烧杯内的环己烷溶剂不断稀释流出的COP以防止管口堵塞,从而达到镀制均匀COP介质膜的目的。

通过调节蠕动泵的转速,可以控制溶液的流速,从而改变镀制的COP介质膜厚度。另外,COP溶液的浓度也会对介质膜厚度产生直接的影响。溶液流速和溶质浓度均与镀制的介质膜厚度呈正相关关系。实验中,COP溶液的质量分数分别为12%与18%,溶液流速维持在0.55 cm/min左右,以进行后续的控制变量比较。在COP溶液流出波导后,立即向波导中通入氮气,帮助已镀介质膜中的溶剂环己烷挥发,必要时还可进行加热以使溶剂挥发完全。制备过程结束后,对仅镀有银膜、使用质量分数为12%的COP溶液进行镀制以及使用质量分数为18%的COP溶液进行镀制的空芯波导分别编号为波导1、波导2与波导3。

### 2.3 损耗谱的测量与分析

空芯波导制作完成后,使用傅里叶红外光谱分析仪(FIR)测量了3种THz空芯波导在中远红外波段的光传输损耗谱特性。图3为3种波导在实验中测量得到的损耗谱,根据制作条件计算预测COP介质膜厚,得到波导传输损耗谱的仿真图如图4所示,其中 $\lambda$ 代表波长, $A$ 代表传输损耗。

通常空芯波导中介质膜的厚度可以根据其测量的损耗谱中干涉峰的位置计算得到:<sup>[19-20]</sup>

$$d = \frac{1}{4\sqrt{n_d^2 - 1}} \times \left( \frac{1}{\lambda_{m+1}} - \frac{1}{\lambda_m} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中 $d$ 为介质膜厚, $n_d$ 为介质层折射率, $\lambda_m$ 和 $\lambda_{m+1}$ 为损耗谱中第 $m$ 和第 $m+1$ 个干涉峰的波长。

由图3可以看出,内壁镀有COP介质膜的空芯波导2和3比仅镀有Ag膜的空芯波导1具有较小的传输

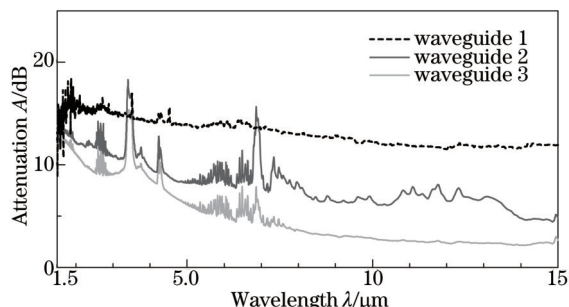


图3 THz空芯波导光传输损耗谱测量图

Fig.3 Measured transmission spectra of the THz hollow waveguides

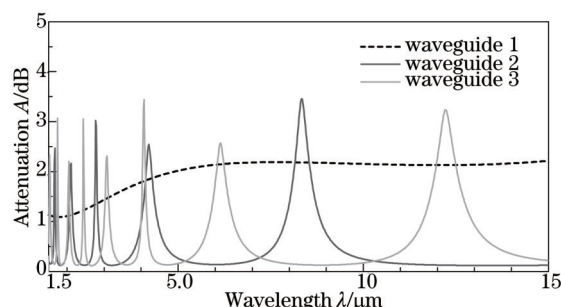


图4 THz空芯波导光传输损耗谱仿真图

Fig.4 Simulation of transmission spectra of the THz hollow waveguides

损耗;然而在波导 2 和 3 的损耗谱中除了 COP 材料在 3.5  $\mu\text{m}$  和 5~7  $\mu\text{m}$  波长的特征吸收峰之外,并没有出现仿真图 4 中出现的干涉峰。对此推断,由于介质膜厚较厚等原因造成 COP 介质膜表面粗糙度较大,从而在很大程度上平滑了本应出现的干涉峰。为了验证此推断,使用 Matlab 程序仿真了空芯波导 3 在成膜表面粗糙度分别为 0.2、0.5、0.8  $\mu\text{m}$  时的传输损耗谱,如图 5 所示。从图 5 的仿真结果可以看出,当介质膜粗糙度增加时,损耗谱中干涉峰逐渐被平滑,此即说明了介质膜表面粗糙度影响干涉峰的辨识度。同时,当仿真中的成膜表面粗糙度为 0.8  $\mu\text{m}$  时,仿真损耗谱的曲线与图 3 中的测量谱最为相似,据此可推断波导的实际成膜表面粗糙度约为 0.8  $\mu\text{m}$ 。

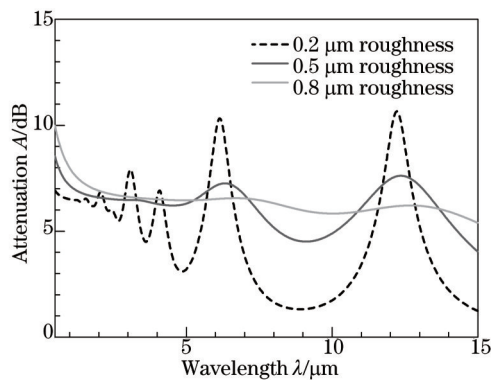


图 5 不同介质膜粗糙度条件下空芯波导传输损耗谱仿真图

Fig.5 Simulation of transmission spectra of hollow waveguides with rough COP film

#### 2.4 介质膜厚的测量与验证

由于无法从测量损耗谱中获取干涉峰信息以计算介质膜厚,因此采用取出介质膜测量的方式进行膜厚确定。这里以波导 3 为例,实验中截取该空芯波导的一段样品,将其纵向剖开,剥下波导内壁最上层的 COP 介质膜,将其置于傅里叶红外光谱分析仪 (FTIR) 的内光路中进行 COP 薄膜的光透射谱测量,测量结果如图 6 所示。从图中可以观察到由薄膜干涉效应造成的 3 处明显干涉峰位于 a、b、c, 3.5  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$  处分别为 COP 材料和空气中  $\text{CO}_2$  的吸收峰。薄膜干涉的波长-膜厚关系可以表示为

$$\frac{1}{\lambda_{k+1}} - \frac{1}{\lambda_k} = \frac{1}{2d \times n_d}, \quad (2)$$

式中  $\lambda_k$  和  $\lambda_{k+1}$  为第  $k$  和  $k+1$  个干涉峰的波长。根据 3 处干涉峰的波长位置,代入(2)式可以估算得到 COP 介质膜厚度  $d$  为 2.6  $\mu\text{m}$ 。

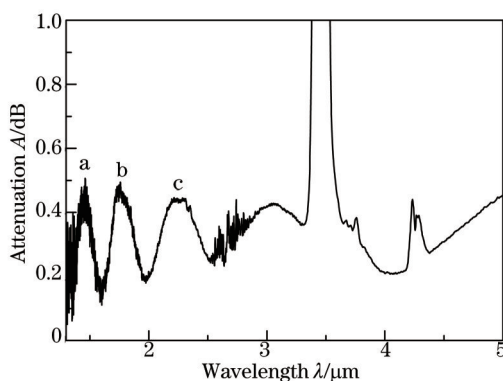


图 6 COP 介质膜光透射谱测量图

Fig.6 Measured transmission spectrum of COP film

对于波导中 COP 介质膜的厚度,可以采用空芯波导介质膜镀制的经验公式计算<sup>[21]</sup>:

$$d = \left( \frac{ac}{200} \right) \sqrt{\frac{V\eta}{\gamma}}, \quad (3)$$

式中  $d$  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(3)式,可以得到内径为 4 mm、溶液流速为 0.55 cm/min 的条件下,介质膜厚  $d$  与溶液质量分数  $c$  及溶液流速  $V$  的关系:

$$d = 18.64 \times c \times \sqrt{V} . \quad (4)$$

将波导 3 质量分数为 18% 的 COP 溶液浓度代入(3)式,可以计算出在此镀制条件下的 COP 介质膜厚  $d$  为 2.5  $\mu\text{m}$ 。此理论计算值与实测值 2.6  $\mu\text{m}$  基本符合,因此认为经验计算得到的 COP 膜厚数据可以提供比较可靠的膜厚参考。

理论上,在目标频率为 2.5 THz 处使  $\text{HE}_{11}$  模传输损耗最小的 COP 介质最佳膜厚可表示为

$$d_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_d^2 - 1}} \tan^{-1} \left[ \frac{n_d}{(n_d^2 - 1)^{\frac{1}{4}}} \right], \quad (5)$$

式中  $\lambda$  为目标频率对应波长<sup>[22]</sup>。将  $n_d$  代入(5)式,可以计算得出 COP 介质最佳膜厚为 15.1  $\mu\text{m}$ 。实际上该理论值没有考虑介质膜的表面粗糙度、多模传输特性以及膜材料在目标波长的吸收。这几项因素将会导致波导的传输损耗变大,因此实际的最佳介质膜厚远小于该理论计算的最佳值<sup>[23]</sup>。另外,15.1  $\mu\text{m}$  的介质膜厚度在液相镀膜法中也难以实现,随着溶液浓度的增大而带来的膜厚增加,会使介质膜粗糙度也明显变大。实验中通过改变实验参数以尽量提高镀制膜厚和质量,采用质量分数为 18% 的 COP 溶液以及在 4 mm 内径条件下 0.55 cm/min 的溶液流速,可以得到现有工艺下具有最大介质膜厚的波导。后续 THz 系统的传输实验使用本次制作的 THz 波导作为传输介质,对其传输特性进行测量与评价。制备完成的 3 种波导的具体实验和膜厚等参数如表 1 所示。

表 1 制备太赫兹空芯波导相关参数

Table 1 Summary of parameters for the THz hollow waveguides

Waveguide number	COP film coating	Solution concentration	COP film thickness / $\mu\text{m}$
1	No	N/A	0
2	Yes	12%	1.7
3	Yes	18%	2.5

### 3 THz 空芯波导特性

#### 3.1 THz 空芯波导测量系统

THz 空芯波导特性测试在中国科学院微系统与信息技术研究所太赫兹实验室实施,测量系统如图 7 所示。系统采用 2.5 THz 量子级联激光器(QCL)、Ophir 3A-P-THz 光功率计以及 NEC T0831C THz 阵列探测器搭建而成。实验中使用的 THz 光源通过 5.2 V、1.3 A 直流电源驱动,输出功率为 1.376 mW。实验测试使用两面离轴抛物面镜(OAP)调整光路方向,并使聚焦光斑尺寸相对较小,以提高 THz 波被耦合进空芯波导的耦合效率;另外分别使用 THz 光功率计与 THz 阵列探测器测量输出功率和光强分布。图 8 为测量波导弯曲特性时的系统照片。

对实验制作的波导 1-3 分别进行了弯曲传输特性测试。在实验中,空芯波导分别弯曲至不同角度,进行弯曲附加损耗的测量与弯曲状态下输出光斑形状的观察。其中波导弯曲角度分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  与  $180^\circ$ , 3 根波导的有效弯曲长度均为 55 cm, 两端各留等长的一段保持为直线状态。

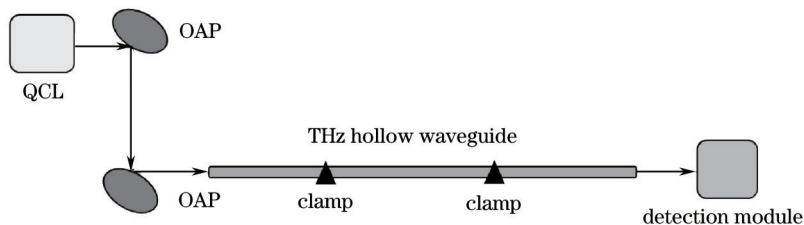


图 7 THz 空芯波导测量系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of the measuring system of THz hollow waveguides

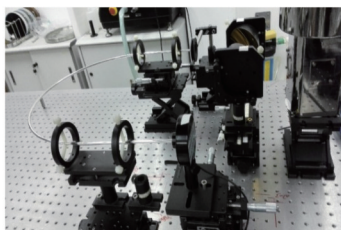


图8 THz空芯波导测量系统实地照片

Fig.8 Picture of the measuring system of bent THz hollow waveguides

### 3.2 THz空芯波导测量结果

#### 3.2.1 损耗特性测量结果

由于空气中的水汽对 2.5 THz 频点太赫兹光存在较大吸收,实验首先测量了空芯波导在通入干燥氮气除湿前后的输出功率。空芯波导 2 通氮气前后的输出光功率以及空气的吸收测量参数如表 2 所示。由表 2 中可以看出,通氮气前后的损耗差值约为 1.48 dB/m,推算可得空气在 2.5 THz 频点的吸收比率约为 28.8%;波导长度为 1 m 时,在该频点每米的吸收比率也约为 28.8%,与太赫兹波在空气中传输时每米的吸收比率 30% 相近,因而可被作为通用标准用于下一步的损耗数据调整。

表 2 THz空芯波导内空气吸收测量参数表

Table 2 Measured results of air absorption in THz hollow waveguides

Before N <sub>2</sub> purge /mW	After N <sub>2</sub> purge /mW	Air absorption <i>l</i> /(dB/m)	Absorption percentage /%
0.425	0.597	1.48	28.8

将实验测量所得的空芯波导损耗数据减去空气吸收带来的影响,可以得到实际的波导损耗值。图 9 为 3 种空芯波导在不同弯曲角度下的损耗测量结果,图中 $\theta$ 代表弯曲角度。波导 3 由于有最厚的介质膜厚而呈现出最小的波导传输损耗,仅镀有银膜的波导 1 则呈现出明显大于介质膜/银膜结构波导的损耗数据。由此可见 THz 空芯波导内介质膜的存在对于降低其传输损耗有着显著的作用,在增加了波导 3 的介质膜后,波导不弯曲时,损耗由 4.56 dB 降低至 3.30 dB,降低比率达到 27%;波导 90° 弯曲时,损耗由 5.81 dB 降低至 3.57 dB,降低比率达到 39%。这是由于相比仅镀有金属膜的空芯波导,介质膜的存在导致了反射率的增加,当介质膜的吸收作用较小时,波导的传输损耗就可以因介质膜而得到减小。

除此之外,还发现空芯波导 3 的弯曲附加损耗最小,仅镀有银膜的空芯波导 1 为最大,而介质膜厚处于中间的空芯波导 2 弯曲损耗数据则介于两者之间。因此,空芯波导内的介质膜对于降低 THz 波导的弯曲附加损耗也有明显的效果,弯曲角度的加大导致 THz 波导弯曲附加损耗的增加,但波导内介质膜的存在可以抑制这一增加量,从而提升 THz 波导在弯曲状态下的光传输性能。

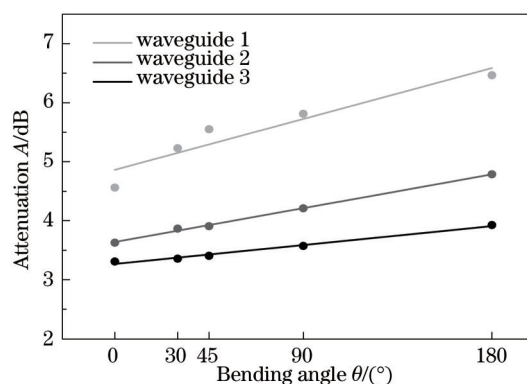


图9 空芯波导传输损耗与弯曲角度的关系

Fig.9 Relationship between transmission losses and bending angles of hollow waveguides

从理论上分析,介质膜的存在对于空芯波导传输损耗的减小源于 p 光反射率的增加。基于射线模型,利用 Matlab 程序仿真得到在不考虑粗糙度的情况下,空芯波导内 COP 介质膜厚度分别为 0、1.7、2.5  $\mu\text{m}$  时,波导在某波长(以 $\lambda=5 \mu\text{m}$  为例)处的 s 光、p 光以及总体输出光的损耗值,分别以  $L_{Rs}$ 、 $L_{Rp}$  以及  $L_{Rsp}$  代表,不同介质

膜厚条件下空芯波导内s光与p光传输损耗仿的真值如表3所示。从表3可以看出,在波导内仅镀有银膜时,p光衰减严重,s光则损耗较小,出射光中由s光占据主导;而当波导内加镀介质膜后,介质膜带来的干涉效应增加了p光的反射率,大大降低了p光的衰减,s光的损耗情况则变化不大,因而整体的光传输损耗也呈降低趋势;并且在介质膜厚越大时,损耗降低的趋势越为明显。

表3 不同介质膜厚条件下空芯波导内s光与p光传输损耗仿真值对照表

Table 3 Comparison of transmission losses of s- and p-polarized radiation lights in hollow waveguides under different dielectric film thicknesses

Thickness $d/\mu\text{m}$	Loss $L_{R_s}$ /dB	Loss $L_{R_p}$ /dB	Loss $L_{R_{sp}}$ /dB
0.0	0.03	3.90	2.02
1.7	0.04	0.47	0.26
2.5	0.05	0.27	0.16

### 3.2.2 光斑特性测量结果

使用THz阵列探测器测量了系统输出端的二维光斑图像,从而可以观察输出光的空间强度分布的变化。THz光源的输出能量分布近似为图10所示的高斯分布。

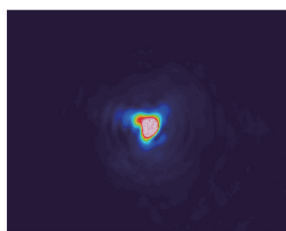


图10 2.5 THz QCL光源输出光斑测量图

Fig.10 Measured output beam profile of 2.5 THz QCL

图11为测量所得的3种波导在直线和弯曲角度为90°的2种情况下的输出光斑图像。从图11可以看出,图10中准单模的光源输出在经过THz空芯波导的传输后形成了多种传输模式的混合。由于波导为4 mm的大孔径,大量高次模式被激励,使得光强分布相对分散;并且在进行90°的弯曲之后,不仅THz波导的传输损耗有所增加,输出光斑的强度分布也更加分散,高次模式的比率增大。另外,空芯波导内介质膜厚度也对输出光斑的形状有所影响,当介质膜厚增大时,输出光斑的强度分布趋于集中。这是由于介质膜的存在导致p光衰减减小,使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,从而使输出光内的高次模式的比率减少,光斑光强变得更为集中。

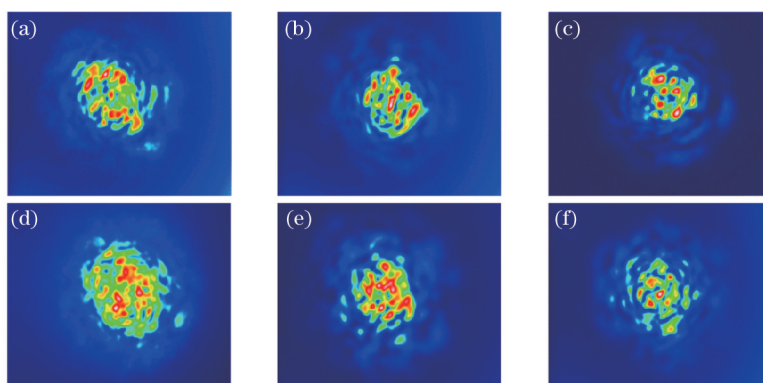


图11 空芯波导输出光斑示意图。(a)波导1,直线;(b)波导2,直线;(c)波导3,直线;(d)波导1,90°弯曲;(e)波导2,90°弯曲;(f)波导3,90°弯曲

Fig.11 Measured output beam profiles at straight and 90° bending configuration. (a) Waveguide 1, straight; (b) waveguide 2, straight; (c) waveguide 3, straight; (d) waveguide 1, 90° bent; (e) waveguide 2, 90° bent; (f) waveguide 3, 90° bent

## 4 结 论

基于THz介质/金属膜结构的空芯波导,采用改良优化的液相镀膜法完成了4 mm内径Ag/COP空芯波导

的制作。使用经验公式与薄膜干涉效应从理论与实际分析和测量验证了制作波导的介质膜厚,并利用介质膜粗糙度理论说明了测得波导的传输损耗谱特性。镀制成功的THz空芯波导与QCL光源、光功率计、阵列探测器等设备结合搭建为THz光传输系统。测量了空芯波导的传输损耗与弯曲附加损耗在不同介质膜厚下的变化曲线以及系统输出端的二维光斑图像。实验结果表明,当介质膜厚增加时,由于p光在波导内的传输衰减得到减小,s光与p光在输出中趋于平衡,因而波导的传输损耗与弯曲附加损耗均显著降低,同时输出光斑的能量分布也更为集中,从而提高了空芯波导在THz系统中的传输性能。这种光波导具有口径大、易于与不同THz源耦合、损耗较小和柔韧性较好等特点,在THz波的传输、短距离通信、测量和传感等系统中有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 P H Siegel. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928.
- 2 M Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97–105.
- 3 M Y Frankel, S Gupta, J Valdmanis, *et al.*. Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1991, 39(6): 910–916.
- 4 H M Heiliger, M Nagel, H G Roskos, *et al.*. Low-dispersion thin-film microstrip lines with cyclotene (benzocyclobutene) as dielectric medium[J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(17): 2233–2235.
- 5 S P Jamison, R W McGowan, D Grischkowsky. Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fibers[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(15): 1987–1989.
- 6 M Goto, A Quema, H Takahashi, *et al.*. Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(2B): L317.
- 7 H Bao, C Markos, K Nielsen, *et al.*. THz waveguides, devices and hybrid polymer-chalcogenide photonic crystal fibers[C]. 35th Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2014: 2047–2051.
- 8 J E Melzer, M Navarro-Cía, O Mitrofanov, *et al.*. Silver-coated Teflon hollow waveguides for the delivery of terahertz radiation[C]. SPIE, 2014, 8938: 89380I
- 9 R Degl'Innocenti, Y D Shah, D S Jessop, *et al.*. Hollow metallic waveguides integrated with terahertz quantum cascade lasers[J]. Opt Express, 2014, 22(20): 24439–24449.
- 10 Wei Zhonghan, Sheng Xiaoxia, Liu Binghong, *et al.*. Spectroscopic sensing system for colored solution concentration based on metallic hollow fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706001.  
魏中晗, 盛小夏, 刘炳红, 等. 基于金属膜空芯光纤的有色溶液浓度传感系统[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706001.
- 11 Sheng Xiaoxia, Chen Guoping, Shi Yiwei. Novel chemiluminometric sensing system based on hollow fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0923004.  
盛小夏, 陈国平, 石艺尉. 基于空芯光纤的新型化学发光传感系统[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0923004.
- 12 Zeng Xuan, Liu Binghong, He Yujing, *et al.*. Fabrication of low-loss AgI/Ag hollow fibers for laser light delivery in the near infrared region[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306001.  
曾 旋, 刘炳红, 何宇婧, 等. 近红外低损耗 AgI/Ag 空芯光纤的制作[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306001.
- 13 O Mitrofanov, M Navarro-Cia, M S Vitiello, *et al.*. Terahertz waveguides with low transmission losses: Characterization and applications [C]. SPIE, 2014, 9199: 91990I.
- 14 C D Rabbii, D J Gibson, J A Harrington. Processing and characterization of silver films used to fabricate hollow glass waveguides[J]. Appl Opt, 1999, 38(21): 4486–4493.
- 15 Y W Shi, K Ito, Y Matsuura, *et al.*. Multiwavelength laser light transmission of hollow optical fiber from the visible to the mid-infrared [J]. Opt Lett, 2005, 30(21): 2867–2869.
- 16 N Croitoriu, J Dror, E Goldenberg, *et al.*. Hollow Fiber Waveguide and Method of Making Same: U.S. Patent 4930863[P]. 1990–6–5.
- 17 J A Harrington, T C Abel, J Hirsch. Coherent, Flexible, Coated-Bore Hollow-Fiber Waveguide: U.S. Patent 5440664[P]. 1995–8–8.
- 18 B Bowden, J A Harrington, O Mitrofanov. Fabrication of terahertz hollow-glass metallic waveguides with inner dielectric coatings[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(9): 093110.
- 19 Alaluf M, Dror J, Dahan R, *et al.*. Plastic hollow fibers as a selective infrared radiation transmitting medium[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(9): 3878–3883.



- 20 K R Sui, X S Zhu, X L Tang, *et al.*. Method for evaluating material dispersion of dielectric film in the hollow fiber[J]. Appl Opt, 2008, 47(34): 6340–6344.
- 21 Y Wang, A Hongo, Y Kato, *et al.*. Thickness and uniformity of fluorocarbon polymer film dynamically coated inside silver hollow glass waveguides[J]. Appl Opt, 1997, 36(13): 2886–2892.
- 22 M Miyagi, S Kawakami. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission[J]. J Lightwave Technol, 1984, 2(2): 116–126.
- 23 B S Sun, X L Tang, Y W Shi, *et al.*. Optimal design for hollow fiber inner-coated by dielectric layers with surface roughness[J]. Opt Lett, 2011, 36(1): 1115–1128.

栏目编辑: 王晓琰