

# 可弯曲的低损耗太赫兹波导研究进展

高飞<sup>1,2</sup> 陈立群<sup>1,2</sup> 冯广智<sup>1,2</sup> 鲁远甫<sup>1,2</sup> 杨珺<sup>1,2</sup> 龚小竞<sup>1,2</sup> 金雷<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院深圳先进技术研究院生物光子中心, 广东 深圳 518055)  
<sup>2</sup> 中国科学院健康信息学重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要** 近年来,随着太赫兹(THz)时域光谱系统的发展,THz波导作为用于THz波传输的器件一直都是研究的重点,而寻找低损耗的材料和可弯曲的结构一直是研究人员的目标。介绍了THz时域光谱系统的现状,并总结了传统波导技术应用于THz领域时的一些不足之处。重点介绍了基于三种不同工作原理的新型THz波导,并对比了各自的优缺点,这三种原理分别是金属面反射、介质界面全反射以及反共振反射。最后简要介绍了可弯曲低损耗THz波导的应用现状及后续工作方向。

**关键词** 光学器件;波导;太赫兹;亚波长;传输损耗;弯曲损耗

**中图分类号** O451      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/LOP49.050005

## Progress of Flexible and Low-Loss Terahertz Waveguides

Gao Fei<sup>1,2</sup> Chen Liqun<sup>1,2</sup> Feng Guangzhi<sup>1,2</sup> Lu Yuanfu<sup>1,2</sup> Yang Jun<sup>1,2</sup>

Gong Xiaojing<sup>1,2</sup> Jin Lei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Research Centre for Biophotonics, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)  
<sup>2</sup> Key Laboratory for Health Informatics, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract** Since the terahertz time-domain spectroscopy has been developed, there has been great interest in the fabrication of terahertz waveguides, especially flexible and low-loss ones. Firstly, terahertz time-domain systems are introduced, and some shortcomings of conventional waveguides are summarized. Three working mechanisms of novel terahertz waveguides are presented in details, including reflection from metal surface, total reflection from the interface of two dielectric media and anti-resonant reflection. Characteristics of these waveguides are discussed. At last, some applications about flexible and low-loss terahertz waveguides are demonstrated, and continuing research is introduced.

**Key words** optical devices; waveguide; terahertz; sub-wavelength; transmission loss; bending loss

**OCIS codes** 230.7020; 230.7370; 300.6495

## 1 引言

20 世纪的最后 20 年,随着科学技术的不断进步,电磁波谱中的太赫兹(THz)波空白(频率在 0.1~10 THz)也得到了填补。THz 波介于毫米波与红外辐射之间,是宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,也是电子学向光学的过渡区域。由于 THz 波所处的特殊位置,它有很多优越的特性和非常重要的学术研究和应用价值。许多材料分子的振动、转动能级正好位于 THz 波段,因此在材料的指纹分析与本征检测领域,THz 光谱技术就成了一种强有力的工具。尽管 THz 波与 X 射线同属于电磁波辐射,但由于其单光子能量低,因此不会像 X 射线一样对生物体造成电离损伤,所以其在生物体检测和医学成像领域成为了重要关注对象。在 THz 技术迅猛发展的这 20 年间,关于 THz 脉冲的产生、探测、光谱以及成像在科学文献中被广泛报道。100 fs 量级的超快激光技术的发展使得 THz 脉冲在光电导天线<sup>[1~3]</sup>和非线性光学材料中的光整流效应<sup>[4,5]</sup>

**收稿日期:** 2011-10-19; **收到修改稿日期:** 2011-12-20; **网络出版日期:** 2012-03-12

**基金项目:** 深圳市公共科技项目(SY200806300217A)和深圳市科技研发资金项目(JC201005270343A)资助课题。

**作者简介:** 高飞(1986-),男,硕士,助理研究员,主要从事 THz 光谱及成像等方面的研究。E-mail: gaofei@siat.ac.cn

\* **通信联系人。** E-mail: lei.jin@siat.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

中很容易被产生出来。利用光电导天线接收器或者借助电光采样原理<sup>[6]</sup>的电光晶体对 THz 脉冲进行探测,也离不开超快激光技术。随着 THz 脉冲的产生和探测手段变得越来越高效,THz 时域光谱(TDS)和成像系统在对半导体进行表征<sup>[7,8]</sup>、生物医学系统成像<sup>[9,10]</sup>以及痕量气体检测<sup>[11]</sup>等领域也越来越有效。这种光谱、成像系统已经走出了传统的实验室环境,在实际应用领域找到了潜在价值,如安全检查<sup>[12~15]</sup>、工厂质量控制<sup>[16,17]</sup>等。

但是,无论是实验室版本还是商用版本,标准的 THz TDS 和成像系统都是用基于自由空间光学的透镜和反射镜搭建而成。这种 TDS 系统<sup>[18]</sup>体积庞大,需要大量的空间。尽管基于光纤技术的超快激光已经缩小了 TDS 系统的体积,但是要构建一个真正便携式的系统还存在很大挑战<sup>[19]</sup>。另外,基于自由空间光学的 THz 系统,工作时经常需要重新校准,这就需要使用者受过专业训练;除此之外,在测试的时候,还需要保证样品在 THz 光路上。这些原因使得 THz 系统的广泛应用面临很多困难。有效的导波技术和器件的发展将会解决以上的许多问题。本文重点介绍基于金属面反射、介质界面全反射和反共振反射这三种不同原理的 THz 波导,对可弯曲的抵损耗 THz 波导的研究进行总结与展望。

## 2 传统太赫兹波导的瓶颈

不论基于何种物理原理对电磁辐射进行空间限制,对这种导波器件最主要的要求就是低损耗和可以弯曲的灵活性,用于射频和微波波段的空心金属管波导有很好的借鉴意义<sup>[20]</sup>。这种波导是基于低于自由电子等离子体频率的电磁辐射会被金属表面反射的原理,将电磁波限制在波导的空心区域,沿轴向实现了导光作用。基于金属的波导缺点很明显,不易弯曲,灵活性较差,并且较为笨重。Deibel 等<sup>[19]</sup>利用表面等离子激元实现了 THz 波在金属丝表面的传导;尽管这种波导损耗较低,低于  $0.03 \text{ cm}^{-1}$ ,并且可以弯曲,但是由弯曲产生的辐射损耗也随之增加,所以限制了这种波导的应用。

光通信领域的光纤就是一种理想的可弯曲导光器件,这种导光器件是利用光波从高折射率介质射向低折射率介质产生全反射的原理将光波限制在固态芯层。但是用于制作光纤纤芯的玻璃和塑料在 THz 波段吸收损耗太大;而对 THz 辐射透明度较高的高阻硅又易碎且价格较贵;因此这些工艺成熟的材料都不适合用作 THz 导波器件<sup>[20]</sup>。用塑料制作的空心光子晶体光纤可以将模场大量限制于缺陷中实现传输,但是其工艺较为复杂,成本比较高,均匀性难以保证,限制了其广泛应用。

从上可以看出,空心波导是一种理想的传播 THz 辐射的低损耗结构;而玻璃或者塑料材料的优良弯曲能力也是不可放弃的一个优点。因此,研究人员就试图寻找新的方案来整合这两种波导的优点,从而设计出适用于 THz 波段的高性能、低成本波导。

## 3 基于金属面反射的塑料管波导

2004 年, Harrington 等<sup>[21]</sup>报道了一种基于聚碳酸酯塑料的柔性、低损耗 THz 波导,横截面如图 1(a)所示。他们采用一种无电镀的液相化学方法在聚碳酸酯塑料内壁沉积了一层 Cu 薄膜。沉积过程所花费时间为 30~45 min, Cu 膜厚度为  $0.5\sim 0.7 \mu\text{m}$ ,远大于 Cu 在 THz 波段的趋肤深度  $0.05 \mu\text{m}$ ;测得的最低损耗为波长  $158.31 \mu\text{m}$  时在 3 mm 直径波导中的值  $3.9 \text{ dB/m}$ 。另外还测试了  $184.31 \mu\text{m}$  波在芯径 2 mm 波导中传输的弯曲损耗,如图 1(b)所示,结果表明曲率越大,损耗越大。

尽管所测得的直波导损耗值比金属铜波导中的损耗值大,但是相对于其他 THz 导波器件来说,损耗还是可以接受的。分析表明造成这种大损耗可能的原因有以下两点:1) 最低损耗模式  $\text{TE}_{01}$  模没有在波导中被激发;2) 内壁 Cu 层表面不均匀、被腐蚀或者生锈使得电阻率变大,库仑损耗增加。由于  $\text{TE}_{01}$  模式较难激发,所以能进行改进的办法就是对内壁 Cu 层进行处理。一种可能的改进办法就是在 Cu 层表面增附一层介电材料,不仅能增强反射,降低损耗,还可以保护 Cu 薄膜免受污染。Harrington 等还测得  $158.31 \mu\text{m}$  辐射在 99 cm 长的 Cu/CuI 内附聚碳酸酯波导中传输的损耗为  $8.7 \text{ dB/m}$ ,比仅 Cu 内附波导损耗  $6.5 \text{ dB/m}$  大。CuI 对  $158.31 \mu\text{m}$  波有较大的吸收,由此可以看出 CuI 膜只起到了避免 Cu 被氧化的作用,并没有提高反射率,需要寻找其他对 THz 波透明的涂层材料。

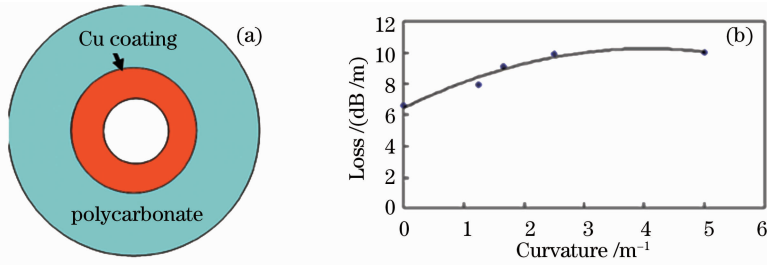


图1 (a) 内附 Cu 膜的塑料管波导截面图; (b) 2 mm 芯径波导弯曲损耗随曲率变化图

Fig. 1 (a) Cross section of plastic tube waveguide with Cu coated inside; (b) bending loss versus curvature for the 2 mm bore waveguide measured at 184.31  $\mu\text{m}$

为了提高这种波导的性能,2007年 B. Bowden 等<sup>[22]</sup>又采用制备红外波导的技术,先使 Ag 薄膜沉积在空心玻璃波导内壁,再将聚苯乙烯(PS)薄膜附在 Ag 层表面。Ag 膜的沉积速率约为 1  $\mu\text{m}/\text{h}$ ,且所制备的 Ag 膜都约为 1  $\mu\text{m}$  厚,远厚于 Ag 在 119  $\mu\text{m}$  波段的趋肤深度 100 nm。当将 2.5 THz 电磁波耦合进 2 mm 直径,90 cm 长的波导中时,测得的传输损耗为 0.95 dB/m。利用 Spiricon 焦热相机观察 119  $\mu\text{m}$  辐射经过 1.6 mm 芯径波导传输后的模场分布发现,Ag 内附的波导中模式为  $\text{TE}_{01}$ ,因为  $\text{TE}_{01}$  模相对于金属表面为 s 偏振,传输损耗较小;当芯径增大为 2.2 mm 时,观察到损耗较大的杂化模,这是由于一些高阶模式开始出现。由于杂化模是由 s 偏振和 p 偏振组合而成,其中 p 偏振分量是一种高衰减模式,从而导致了杂化模的大传输损耗。通过在 Ag 表面内附 PS 薄膜的办法,可以提高 p 偏振分量的反射率,从而降低杂化模的损耗。

这种结构的波导,虽然损耗较小,但是制备工艺相对比较复杂,并且管内壁沉积的金属膜厚度的均匀性难以保证;经常弯曲还容易损伤内壁金属膜,因此也未被广泛应用。

## 4 基于介质界面全反射的亚波长波导

### 4.1 亚波长光纤型波导

传统光纤型波导通常都由高折射率芯层和低折射率包层构成,由于光波在介质界面处发生全反射,因此主要被限制在芯层中进行传输,由此可知光波的传输损耗主要由芯层材料的吸收损耗率决定。THz 波段低损耗材料的缺少,导致我们不能直接将这种技术应用在 THz 波导上。2003 年,浙江大学的 Tong 等<sup>[23]</sup>制备了亚波长的纳米光纤,并且观察到了其低损耗的传输性能。光在光纤中传播,被传导的芯模并不是 100% 被限制在芯层中,而是有部分能量进入到了包层。传统光纤型波导中,只有少部分能量进入到包层,相比芯层中的能量可以忽略不计,横截面上轴向传播的坡印亭矢量分布如图 2(a) 所示。而在亚波长光纤型波导中,进入到包层的能量就不可忽略了,有的甚至远超过芯层中的能量;如果将低折射率包层材料换成空气,就实现了低损耗的亚波长光纤型波导,横截面上轴向传播的坡印亭矢量分布如图 2(b) 所示。

基于此原理,台湾大学的 Chen 等<sup>[24]</sup>利用 200  $\mu\text{m}$  的聚乙烯(PE)塑料光纤型波导实现了对 0.3 THz 波

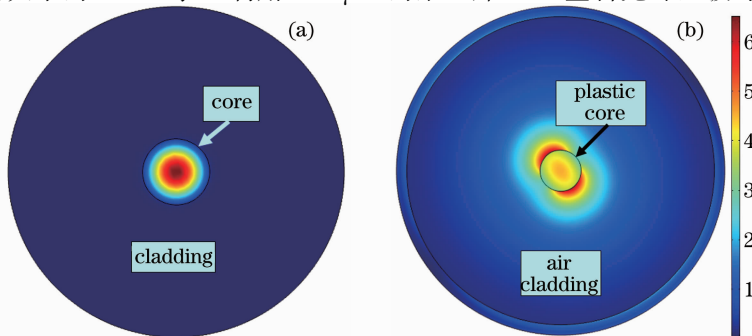


图2 光纤横截面上坡印亭矢量分布。(a) 传统光纤型波导;(b) 亚波长光纤型波导

Fig. 2 Distributions of the normalized scalar  $z$ -component of the time-averaged Poynting vector over a linear color scale in the cross section areas of (a) conventional fiber-form waveguide; (b) sub-wavelength fiber-form waveguide

的亚波长传输,测试装置如图 3 所示。当传输波长从 310 GHz 递增到 360 GHz 时,传输损耗相应从  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  递增到  $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 。这是首次在 THz 波导领域实现  $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  量级以下的低损耗传输。对于这种波导,大部分光能都在光纤外部空气中传输,因此受环境影响较大,并且弯曲损耗也较大。

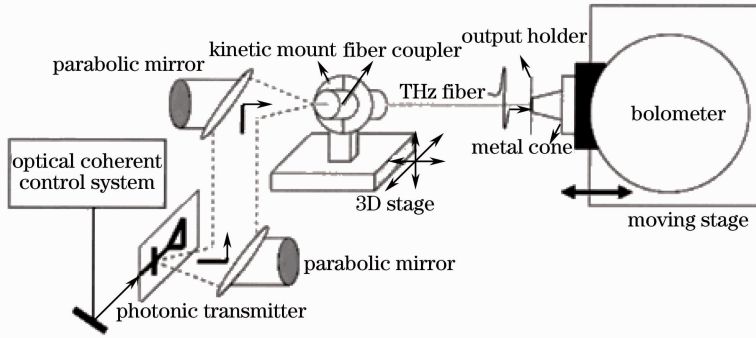


图 3 THz 光纤测试的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the THz fiber measurement

## 4.2 亚波长空心波导

类似此原理,如果让波导中的包层模能量进入到亚波长的空芯层,不但可以实现 THz 传输,还可以减小所受到的环境的影响。德国亚琛工业大学的 Nagel 等<sup>[25]</sup>利用这种思想从理论上设计了两种受环境影响较小的结构——LID (Low-index discontinuity) THz 波导:适合光学器件集成的 SRW (Split rectangular waveguide) [图 4(a)]和适合内窥的 TW (Tube waveguide) [图 4(b)]。

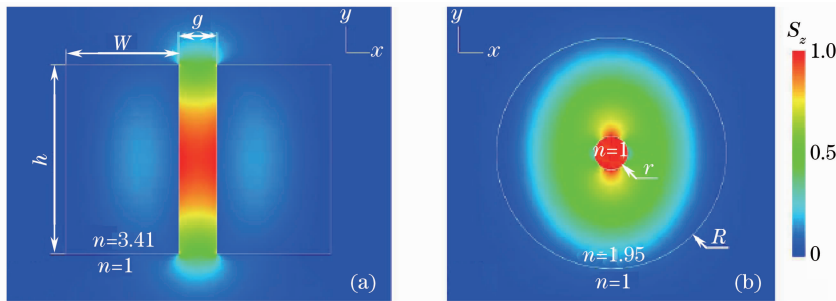


图 4 (a) 波在 SRW 中传播的  $z$  方向坡印廷矢量分布,  $f=0.7 \text{ THz}$ ,  $w=54 \mu\text{m}$ ,  $h=90 \mu\text{m}$ ,  $g=18 \mu\text{m}$ ;

(b) TW 中坡印廷矢量分布,  $f=0.5 \text{ THz}$ ,  $R=181.5 \mu\text{m}$ ,  $r=27 \mu\text{m}$

Fig. 4 Distribution of the normalized scalar  $z$ -component of the time-averaged Poynting vector  $S_z$  over a linear color scale in the cross section of the waveguides. (a) Float-zone silicon SRW at  $f=0.7 \text{ THz}$  with  $w=54 \mu\text{m}$ ,  $h=90 \mu\text{m}$  and  $g=18 \mu\text{m}$ ; (b) fused silica TW at  $f=0.5 \text{ THz}$  with  $R=181.5 \mu\text{m}$  and  $r=27 \mu\text{m}$

这种结构的导光原理可以认为是:包层模由于全反射作用被限制在包层材料中,但是仍有部分能量的光波泄漏进入了中间的空心区域,在其中被传导。当空心尺度在传输光波的亚波长量级时,被限制在空心区域的能量就更多。SRW 由空气间隙厚度为  $g$  的两块 Si 板构成,板高  $h$ ,宽  $w$ ;TW 由内径为  $r$ ,外径为  $R$  的空心石英管构成;其中介质材料所包围的空心部分均为亚波长尺度。模拟结果显示,对于 SRW 传输  $0.7 \text{ THz}$  波,最优结构为  $h=1.6 \mu\text{m}$ , $w=5 \mu\text{m}$ , $g \approx 90 \mu\text{m}$  时,被限制在间隙部分的光能量占总比重最大,约为 55%;对于 TW 传输  $0.5 \text{ THz}$  波时,最优情况下,空隙中能量占比相对 SRW 小,约为 26%,对应结构为  $R=2r \approx 150 \mu\text{m}$ 。计算表明,这两种结构的波导也显示出优良的低弯曲损耗能力,分别为 TW:  $0.0015 \text{ dB}/(^{\circ})$ ;SRW:  $0.0004 \text{ dB}/(^{\circ})$ 。

这两种波导的材料都是传统商用塑料或者硅基材料,并且结构加工简单,已经有非常成熟的工艺流程,因此成本低廉。虽然这两种波导传输损耗都较低,但是外界环境对传输的影响却是一个值得考虑的问题,良好的封装技术有望扩大这种波导的应用范围。

## 5 基于反共振反射的塑料管波导

将亚波长光纤型波导中的 TW 波导的空心区扩大,减小介质区,得到一种新型薄壁塑料管波导。此种

波导的介质层比较薄,在包层中传播的模式限制机理是高折射率包层与低折射率空心部分的折射率差引起的全反射,但是由于包层材料的高吸收损耗,所以包层模式会很快衰减掉。除了包层模,这种波导还能在空气芯层传输一种芯模;相较于包层模,芯模的材料吸收损耗更低。

2009年,台湾大学的Lai等<sup>[26]</sup>利用商用的内径为9 mm,厚度为0.5 mm,折射率为1.4的聚四氟乙烯管观察到了THz波的传输。经研究发现这种模式的传输机理类似于反共振反射波导。可以将波导的包层简化为法布里-珀罗(F-P)标准具来描述这种传输机制,如图5所示<sup>[27]</sup>。

对于F-P标准具,透射谱是周期振荡的窄峰,其中透射最大发生在标准具共振频率位置。换言之,在共振频率附近,在芯-包层界面处几乎没有反射发生;而在反共振频率位置(即远离共振频率处),反射达到最大从而形成芯模。

波导模式两个最重要的参数就是模指数和衰减常数。

研究者分别讨论了芯直径 $D$ 、包层厚度 $t$ 和包层折射率 $n$ 三个参数的变化对芯模的影响。结果表明,内芯直径越大,模指数越大,对应于芯模入射角 $\theta_1$ 越大,就越接近掠入射;同时芯直径越大衰减越小,可以理解为,因为芯直径越大,入射角也越大,那么同样长度波导所经历的反射次数也越少,并且每次反射的反射率也越高。对于不同厚度的包层,模指数几乎不受影响;但是芯模传输的带宽随厚度减小而增加。包层折射率变化对模指数也几乎没有影响,如图6(a)所示,它只改变共振频率和传输带宽,折射率越小,带宽越大,如图6(b)所示。

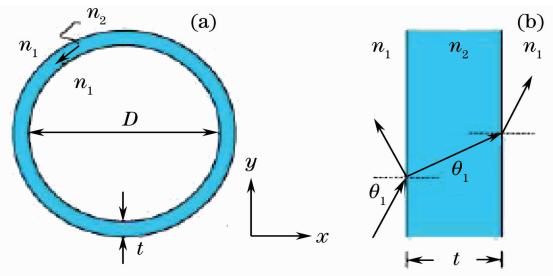


图5 (a)管状波导横截面;(b)包覆层可以看作FP标准具  
Fig. 5 (a) Cross section of pipe waveguide; (b) the cladding can be viewed as a Fabry-Pérot etalon

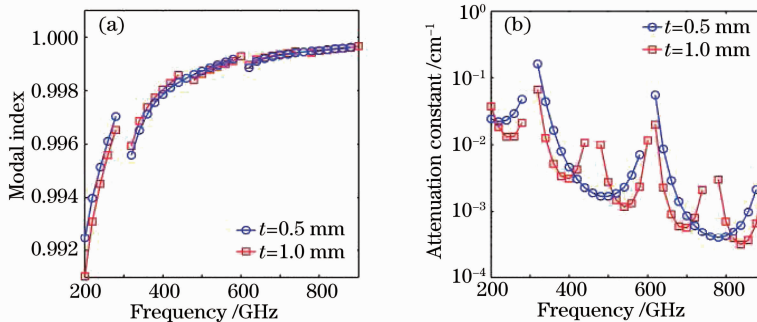


图6 包层厚度为0.5 mm和1.0 mm的管状波导最低阶芯模的(a)模指数和(b)衰减常数

Fig. 6 (a) Modal indices and (b) attenuation constants of the fundamental mode of the pipe waveguide with cladding thickness  $t=0.5$  mm and 1.0 mm

对于可以弯曲的塑料波导,弯曲损耗也是一个重要的表征参数。图7所示为2010年,Lu等<sup>[28]</sup>发表的对空芯直径为9 mm,包层厚度为0.5 mm的聚四氟乙烯管式波导弯曲损耗的测试结果。结果表明,当传输频率接近共振频率时,弯曲损耗增加;而当其在反共振频率附近时,弯曲损耗大大减小。当曲率半径 $R=60$  cm时,测

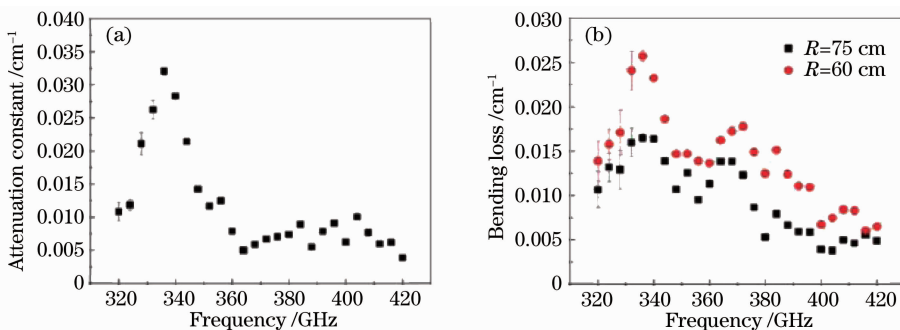


图7 (a)直波导衰减谱;(b) $R=75$  cm和 $R=60$  cm时的弯曲损耗。 $D=9$  mm, $t=0.5$  mm

Fig. 7 (a) Attenuation spectrum of straight pipe waveguides for  $D=9$  mm and  $t=0.5$  mm; (b) bending loss spectra of the pipe waveguide ( $D=9$  mm,  $t=0.5$  mm) for  $R=75$  cm and 60 cm

得弯曲损耗为  $0.006 \text{ cm}^{-1}$ 。研究结果还表明,弯曲损耗跟入射 THz 波的偏振方向无关,且曲率半径越大,弯曲损耗越小,如图 8 所示,为 420 GHz 波在  $D=9 \text{ mm}$ ,  $t=0.5 \text{ mm}$  聚四氟乙烯管波导中传播弯曲损耗随曲率半径的变化。Lu 等还检测了弯曲前后这种管式波导的输出波偏振态,发现波导的弯曲不会改变输入太赫兹波的偏振状态。

这种低损耗的塑料波导用传统聚乙烯、聚四氟乙烯塑料加工就可以制备,并且工艺已经成熟。管外环境对 THz 波传输的影响也较小,是一种性能比较优良的 THz 波导。

表 1 是对上述几种波导几何参数、损耗特点以及各自优缺点的归纳比较。

表 1 不同 THz 波导之间的比较

Table 1 Comparison among different THz waveguides

	Cu/plastic waveguide <sup>[21]</sup>	Sub-wavelength fiber waveguide <sup>[24]</sup>	Low-index discontinuity waveguide <sup>[25]</sup>	Plastic tube waveguide <sup>[26,28]</sup>
Size	Inner diameter 2 mm frequency 2.5 THz	Diameter 200 $\mu\text{m}$ frequency 0.31 THz	Inner diameter 70 $\mu\text{m}$ ; outer diameter 140 $\mu\text{m}$ ; frequency 0.9 THz	Inner diameter 9 mm outer diameter 10 mm; frequency 0.42 THz
Absorption loss	5 dB/m	$0.01 \text{ cm}^{-1}$	0.0125 dB/cm	$0.0008 \text{ cm}^{-1}$
Bending loss	Radius of curvature 60 cm, 10 dB/m	Large bending loss	0.0015dB/(°)	Radius of curvature 60 cm, $0.006 \text{ cm}^{-1}$
Advantages and disadvantages	Low loss; complex technology; easily impaired	Low loss; mature technology; surrounding-independent	Low loss; mature technology	Low loss; mature technology; low cost

## 6 太赫兹波导器件应用现状

百微米量级的亚波长塑料光纤型波导制备工艺成熟,并且已经大规模商业化,成本较低。台湾大学的 Lu 等<sup>[29]</sup>早在 2008 年就已经利用这种塑料波导实现了扫描成像,图 9 是对一些实物的成像图片图 9(a)中黄色区域为高透射率,(b)~(d)黑色区域为高透射率。2009 年,又利用亚波长塑料光纤型波导实现了对胸腺组织的显微功能,如图 10 所示 C. -M. Chiu 等<sup>[30]</sup>,其中图 10(a)、(c)对应样品 1,图 10(b)、(d)对应样品 2。

从上可知,尽管亚波长波导的导光容易受环境影响,但当采用合适的固定装置后,这种实心结构的波导更具实用性。尽管空心管式波导受环境影响小,但是空心内部容易混入气体、液体或其他杂质影响 THz 波的传输,目前尚无应用实例。因此我们提出一种设想:如果能采用适当的封装技术封住端口,将会大大提高管式波导的性能。譬如在端口集成透镜,不仅可以实现这种管式波导中 THz 波的输出耦合,还可以避免其他杂物混入波导中,其应用前景将会更广阔。目前我们正在进行波导和透镜的参数设计,下一步将寻找可行的加工手段。

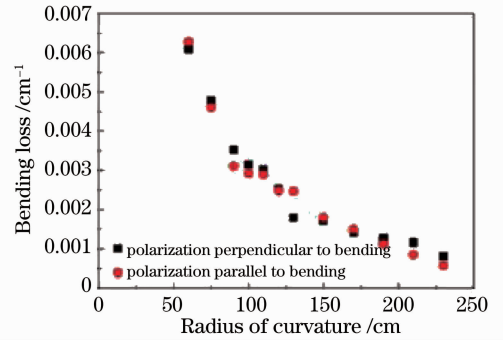


图 8 传播弯曲损耗随曲率半径的变化

Fig. 8 Bending loss of the tefflon pipe waveguide

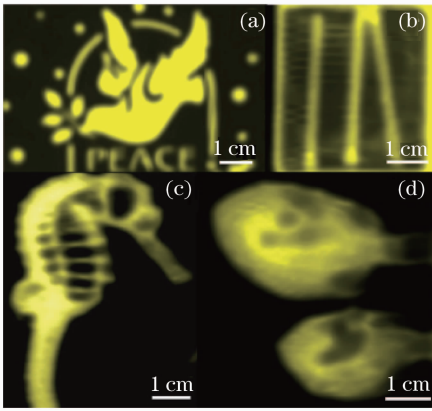


图9 亚波长光纤型波导扫描 THz 成像。(a) 世界和平字样和鸽子的金属图案;(b) 纸质火柴盒中的三根火柴;(c) 干海马;(d) 两条干鱼

Fig. 9 Fiber-scanning THz images of (a) a metal pattern with a word "peace" and a dove figure; (b) a paper-made matchbox with three matches inside; (c) a dry seahorse, and (d) two dry fishes

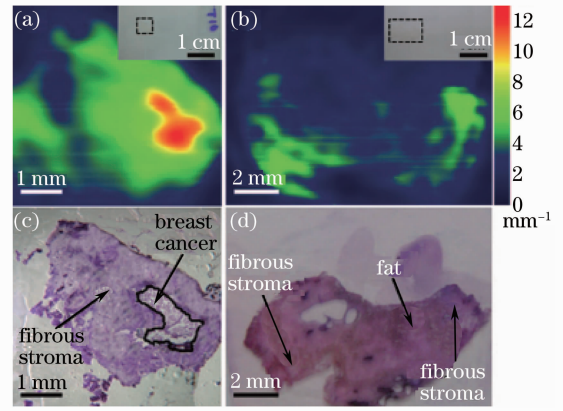


图10 (a),(b)乳腺癌组织吸收系数图像,插图表示真实组织的光学照片;(c),(d)经苏木精和曙红染色后的微光学图片

Fig. 10 (a), (b) THz near-field absorption coefficient images of the breast tissue sections. The insets show actual photographs. (c), (d) Photomicrographs of the breast tissue sections after hematoxylin and eosin (H&E) staining

## 7 结束语

本文从金属面反射、介质界面全反射和反共振反射三种限制原理出发,简要介绍了 THz 波导的传输机理,并总结了各自的优缺点。可以看到低损耗、可弯曲的塑料波导现在是 THz 波导器件的研究主流之一,并且以这些为基础的实用型器件将会被大规模应用。

## 参 考 文 献

- 1 P. R. Smith, D. H. Auston, M. C. Nuss. Subpicosecond photoconducting dipole antennas[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(2): 255~260
- 2 Ma Chengju, Chen Yanwei, Xiang Jun *et al.*. Progress in generation of terahertz radiation[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2007, **44**(4): 56~61  
马成举, 陈延伟, 向 军 等. THz 辐射产生技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4): 56~61
- 3 M. V. Exter, D. Grischkowsky. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 1990, **38**(11): 1684~1690
- 4 X. -C. Zhang, X. F. Ma, Y. Jin *et al.*. Terahertz optical rectification from a nonlinear organic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(26): 3080~3082
- 5 D. H. Auston, K. P. Cheung. Coherent time-domain far-infrared spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(4): 606~612
- 6 Q. Wu, X. -C. Zhang. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(24): 3523~3525
- 7 D. M. Mittleman, J. Cunningham, R. Neelamani *et al.*. Non contact semiconductor wafer characterization with the terahertz Hall effect[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(16): 16~18
- 8 D. Grischkowsky, S. R. Keiding, M. V. Exter *et al.*. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(10): 2006~2015
- 9 D. Crawley, C. Longbottom, V. P. Wallace *et al.*. Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2003, **8**(2): 303~307
- 10 R. M. Woodward, V. P. Wallace, D. D. Arnone *et al.*. Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain[J]. *J. Biol. Phys.*, 2003, **29**(2-3): 257~261
- 11 R. H. Jacobson, D. M. Mittleman, M. C. Nuss. Chemical recognition of gases and gas mixtures using terahertz radiation [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 2011~2013

- 12 M. R. Leahy-Hoppa, M. J. Fitch, X. Zheng *et al.*. Wideband terahertz spectroscopy of explosives[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **434**(4-6): 227~230
- 13 Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday *et al.*. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(24): 241116
- 14 K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2549~2554
- 15 F. Huang, B. Schulkin, H. Altan *et al.*. Terahertz study of 1, 3, 5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(23): 5535~5537
- 16 D. Zimdars, J. White, G. Stuk *et al.*. Large area terahertz imaging and non destructive evaluation applications[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, **48**(9): 537~539
- 17 S. Wang, X. -C. Zhang. Pulsed terahertz tomography[J]. *J. Phys. D*, 2004, **37**(4): R1~R36
- 18 Y. G. Zhao. Study of Photonic Crystal Structures by THz-TDS[D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2006. 4~6
- 19 J. A. Deibel, K. L. Wang, M. Escarra *et al.*. The excitation and emission of terahertz surface plasmon polaritons on metal wire waveguides[J]. *C. R. Physique*, 2008, **9**(2): 215~231
- 20 Huang Wanwen, Li Baojun. Progress on terahertz waveguide devices[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2006, **43**(7): 9~15  
黄婉文, 李宝军. THz波导器件研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(7): 9~16
- 21 J. A. Harrington, R. George, P. Pedersen *et al.*. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5263~5268
- 22 B. Bowden, J. A. Harrington, O. Mitrofanov. Silver/polystyrene-coated hollow glass waveguides for the transmission of terahertz radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2945~2947
- 23 L. Tong, R. R. Gattass, J. B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**(6968): 816~819
- 24 Lijin Chen, Hungwen Chen, Tzengfu Kao *et al.*. Low-loss subwavelength plastic fibre for terahertz waveguiding[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 308~310
- 25 Michael Nagel, Astrid Marchewka, Heinrich Kurz. Low-index discontinuity terahertz waveguides[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9944~9954
- 26 C. -H. Lai, Y. -C. Hsueh, H. -W. Chen *et al.*. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3457~3459
- 27 C. -H. Lai, B. You, J. -Y. Lu *et al.*. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(1): 309~322
- 28 J. -T. Lu, Y. -C. Hsueh, Y. -R. Huang *et al.*. Bending loss of terahertz pipe waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26332~26338
- 29 J. -Y. Lu, C. -M. Chiu, C. -C. Kuo *et al.*. Terahertz scanning imaging with a subwavelength plastic fibre[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(8): 084102
- 30 C. -M. Chiu, H. -W. Chen, Y. -R. Huang *et al.*. All-terahertz fibre-scanning near-field microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1084~1086