

文章编号: 2095-4980(2017)06-0889-09

渐变型太赫兹空芯波导的传输特性

于晶, 陈天航, 朱晓松, 石艺尉*

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要: 研究了渐变型空芯波导(GTHW)在太赫兹波段的传输特性。基于几何光学方法, 仿真分析了波导的输出光束质量和传输损耗特性。相比均匀型空芯波导, 当光从渐变型空芯波导的大端传输至小端或沿相反方向传输时, 渐变型波导具有特殊性能。当光从波导大端传输至小端, 渐变型和均匀型波导具有相似的弯曲附加损耗, 并且渐变型波导具有更高的耦合效率, 便于与多种光源耦合; 当光从波导小端传输至大端, 渐变型波导的传输损耗和输出光束发散角更小。仿真了波导弯曲率、光源发散角和波导锥度等参数对传输损耗的影响。采用波长532 nm的半导体激光器作为光源, 进行了验证实验。测量数据与仿真结果有很好的一致性。

关键词: 太赫兹; 光纤光学; 渐变型; 空芯波导

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0889

Transmission characteristics of Gradually-Tapered Hollow Waveguide for terahertz wave

YU Jing, CHEN Tianhang, ZHU Xiaosong, SHI Yiwei*

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Characteristics of Gradually-Tapered Hollow Waveguide(GTHW) are investigated for terahertz wave transmission. Based on the ray-optics method, simulation analysis is made in detail on beam profile and transmission attenuation. Compared with Constant Diameter Hollow Waveguide(CDHW), GTHW has unique properties when light travels from large end to small end or in the opposite direction. When light travels from large end to small end, GTHW and CDHW have similar additional losses caused by bending, and GTHW has much higher coupling efficiency and is convenient coupled with various light sources. When light travels from small end to large end, GTHW has lower transmission loss and an output beam with smaller divergence angle. Influences of waveguide parameters on transmission attenuation are simulated, such as bending radius, light source divergence angle, and the angle of the taper slope. Verification experiments are carried by using laser diode radiating at the wavelength of 532 nm. Measured data show good agreement with the simulation results.

Keywords: terahertz; fiber optics; gradually-tapered; hollow waveguide

随着太赫兹波(Terahertz, THz)相关研究与技术的发展, THz源在降低成本、提高效率、增强室温稳定性等方面取得了良好进步。THz辐射源按照产生机理, 可以分为基于光学效应和基于电子学的THz源; 按照发光类型, 可以分为非相干热辐射源、宽带THz辐射源以及窄带THz连续波源^[1]。其中窄带THz连续波源中的太赫兹量子级联激光器(THz Quantum Cascade Lasers, THz QCL)具有结构紧凑、稳定和能量转换效率高等优点, 是一种具有明显应用优势的THz源。但是THz QCL的器件尺寸通常小于激光波长, 使得器件输出光束质量较差, 远场发散角较大, 不利于应用中与THz波导等其他部件的耦合。针对THz QCL的光束发散特性, 目前研究采用了诸如表面发射、分布反馈腔、光子晶体波导、在出射端对应的衬底平面刻蚀光栅结构以及采用锥形结构器件等改善手段^[2], 目前得到的几种输出光束发散角得到改善的THz QCL如表1所示。

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2017-01-03

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1404100)

*通信作者: 石艺尉 email:ywshi@fudan.edu.cn

表 1 几种输出光束发散角得到改善的 THz QCL
Table 1 THz QCL with improved output beam divergence

improving method	frequency/THz	beam divergence angle	reference(published year)
surface emission	2.83	6.0° FWHM	(2006) ^[3]
photonic crystal	2.55–1.88	±10.0° angular range	(2009) ^[4]
sculpting designer spoof surface plasmon structures	3.00	~10.0° FWHM	(2010) ^[5]
first-order lateral distributed-feedback gratings	3.30–3.40	24.0° FWHM	(2012) ^[6]
tapered waveguide profile	3.23	18.4° FWHM	(2015) ^[7]
tapered waveguide profile with lateral gratings	3.40	15.5° FWHM	(2016) ^[8]
novel distributed-feedback gratings	3.10	4.0° FWHM	(2016) ^[9]

从表 1 可以看出, 现有 THz 光源仍存在发散角较大的问题。空芯波导是在 THz 波段获得低传输损耗的有效途径之一^[10-11], 针对 THz 光源发散角较大的问题, 通过选用大内径的空芯波导可以更方便地与光源进行耦合, 但大内径空芯波导的弯曲灵活性降低, 且大内径输出端不便于和检测器进行耦合。因此考虑在太赫兹系统中使用波导内径尺寸随波导长度渐变的空芯波导作为传输介质, 以渐变型波导大内径一端作为光源入射端, 提高与光源耦合的便利性和效率, 同时其小内径输出端具有更好的弯曲灵活性且便于和检测器耦合。本文理论分析了 THz 波段下, 渐变型空芯波导的输出光束质量和传输损耗特性, 并通过仿真和实验讨论了波导弯曲率、波导弯曲长度比例、光源发散角和波导锥度等参数对传输损耗的影响。结果表明, 渐变型空芯波导在 THz 系统中具有良好的应用前景。

1 理论模型

渐变型空芯波导的内径尺寸随波导长度渐变, 采用的结构为在波导最外层的基管材料内壁先镀制一层金属薄膜, 再在金属层上镀一层介质膜, 截面结构如图 1 所示。对于 THz 波, 空气中存在最多的氮气对其传输造成的吸收衰减很小, 对于 THz 波段的一些波长, 氧气和水蒸气会造成衰减, 且水蒸气的衰减远大于氧气的衰减^[12]。可以采用在空芯波导的空芯中注入惰性气体进行干燥除湿或抽真空的方法来排除空气对 THz 波衰减的影响。

由于渐变型空芯波导在形状上存在锥度, 因此相比于均匀型空芯波导具有不一样的传输特性。对于圆截面波导, 当波导内径远大于传输波长时, 可以使用“几何光学射线理论”得到一定入射角度范围内光传输的损耗^[13-14]。发射角为 θ_0 光线在均匀型波导与渐变型波导内的传输情况, 如图 2 所示。可以看到, 光线在均匀型空芯波导内传输过程中的传输角 θ 恒定。而光线在渐变型波导中的传输角是动态变化的, 光线在波导壁处发生第 k 次反射后的传输角为:

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \delta\varphi \quad (1)$$

式中 $\delta\varphi$ 是波导锥度:

$$\delta\varphi = 2\arctan\left(\frac{a_1 - a_2}{2L}\right) \quad (2)$$

式中: a_1 为入射端波导内径; a_2 为出射端波导内径; L 为波导长度。光线在波导壁处第 k 次反射的入射角为:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} - \delta\varphi \quad (3)$$

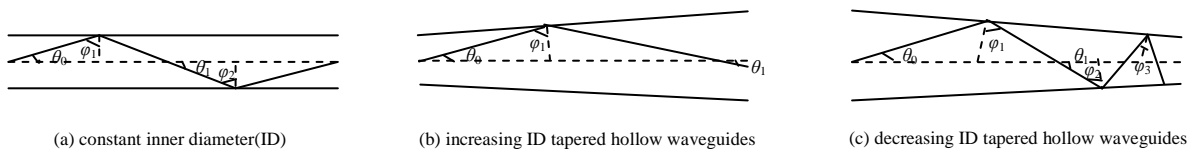


Fig.2 Schematic diagram of ray propagation
图 2 光线传播示意图

由式(1)~(3)可以看出, 对于同一根渐变型空芯波导, 输入端的选择不同, 光线在波导中的传输情况不同: 以波导小端为入射端, 即波导内径随光线传输过程逐渐增大的情况下, 光线的传输角随反射次数的增加而逐次减小; 以波导大端为入射端, 光线的传输角随反射次数的增加而逐次增大。相比于大端入射, 小端入射时, 相同波导长度内所发生的反射次数更少。

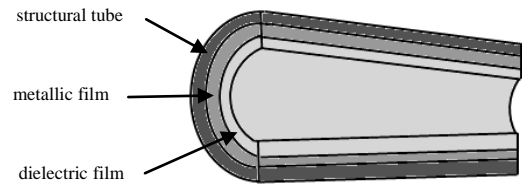


Fig.1 Cutaway structure of a gradually-tapered hollow waveguide
图 1 渐变型空芯波导的截面结构示意图

光线在波导壁第 k 次反射时，沿波导轴向累积传输距离为：

$$z_k = z_{k-1} + a(z_{k-1}) \tan \varphi_{k-1} \tag{4}$$

式中 $a(z_{k-1})$ 为光线在波导壁发生第 $k-1$ 次反射时所在波导截面的波导内径。

光线能否射出长度为 L 波导的判别如下：

$$\text{increasing ID tapered} \begin{cases} z > L, \\ \text{or} \\ \theta \leq \frac{1}{2} |\delta\varphi|, \end{cases} \quad \text{there exists the waveguide} \tag{5}$$

$$\text{decreasing ID tapered} \begin{cases} z > L, \\ \theta \geq \frac{1}{2} (\pi - \delta\varphi), \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{there exists the waveguide} \\ \text{turn around and effectively lost} \end{array} \tag{6}$$

入射光功率为 P_0 通过长度 L 的渐变型波导后衰减为：

$$P(L) = \int_0^{\theta_{\max}} P_0(\theta) \exp[-\sum_0^{k(\theta,L)} (1 - R(\theta_k))] \sin \theta d\theta \tag{7}$$

式中： $P_0(\theta)$ 是入射光强度的角分布； θ_{\max} 是最大入射角度； $R(\theta_k)$ 是空芯波导内部空气与介质层交界处的相对反射率。

明确渐变型空芯波导处于弯曲状态时的光线传输情况，对于研究系统的小型化具有重要参考意义。弯曲情况下，光在空芯波导中的传输有 2 种轨道。当波导的弯曲率很小，光在波导的内外侧壁交替来回反射——近似直波导模型(Straight Waveguide Approximation, SWA)，如图 3(a)所示；当波导的弯曲率增大到一定程度，光只在波导的外侧壁反射——边导模型(Edge-Guided Model, EGM)，如图 3(b)所示。SWA/EGM 轨道判别式为：

$$a(z_k) \begin{cases} < r[1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi_k)], & \text{SWA} \\ > r[1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi_k)], & \text{EGM} \end{cases} \tag{8}$$

式中 r 为波导弯曲半径。

对于高斯光束，由于光线入射角度不同，一部分光线沿 SWA 传输，另一部分光线沿 EGM 传输。当波导弯曲率改变，沿 2 种轨道传输的光线的比例也会随之改变。此外，由于渐变型波导的内径尺寸随长度渐变，且光线传输角非恒定，在波导弯曲率一定的情况下，同一光线在传输过程中也可能发生 SWA 和 EGM 轨道间的转换，如图 3(c)所示。当处于 SWA 轨道时，光线在波导壁第 k 次反射的入射角为：

$$\varphi_k = \begin{cases} \varphi_{k-1} - \delta\varphi - \frac{a_{k-1}}{r} \tan \varphi_{k-1}, & \text{bounces along the outer wall} \\ \varphi_{k-1} - \delta\varphi + \frac{a_{k-1}}{r} \tan \varphi_{k-1}, & \text{bounces along the inner wall} \end{cases} \tag{9}$$

转换至 EGM 轨道后，光线在波导壁第 k 次反射的入射角恒定为：

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} \tag{10}$$

光线沿 EGM 轨道相比于 SWA 轨道在波导壁处的反射次数更少，传输损耗更小。

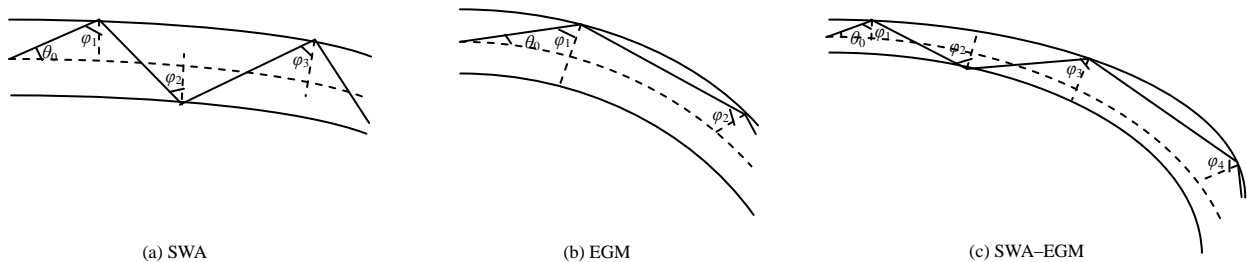


Fig.3 Trajectory model for a bent tapered waveguide
图 3 弯曲波导中光线传播轨道模型

2 理论仿真与分析

基于上一小节的理论模型，对介质/金属结构空芯波导在 10 THz 的传输损耗特性进行仿真分析。仿真中选用

的金属为银,其折射率参数引自文献[15], $n=42.6, k=204$,介质折射率取为1.5。介质膜最优膜厚由式(11)^[16]确定为 $4.086 \mu\text{m}$:

$$d_F = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_F^2 - 1}} \arctan\left(\frac{n_F}{\sqrt{4n_F^2 - 1}}\right) \quad (11)$$

2.1 输出光束质量特性

为研究光束经渐变型空芯波导传输后的输出光束的发散角情况,并与均匀空芯波导做比较,将输出光束的功率作为输出角的函数,得到输出光束的归一化强度曲线,如图4所示。仿真采用的输入光束的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 5° ;渐变型空芯波导的长度为1 m,波导内径为1~1.62 mm,分别以其大内径一端和小内径一端为输入端;均匀波导的内径尺寸为1 mm。可以看出,与均匀波导相比,以波导小端为入射端,输出光束发散角变小;相反地,以波导大端为入射端,输出光束发散角变大。为了进一步研究输出光束质量,对在距离波导输出端 $d=1 \text{ mm}$ 处的光斑进行仿真,如图5所示。可以看出,与均匀波导相比,以渐变型波导的小端为入射端的输出光束的光斑明显缩小,具有更好的光束质量。

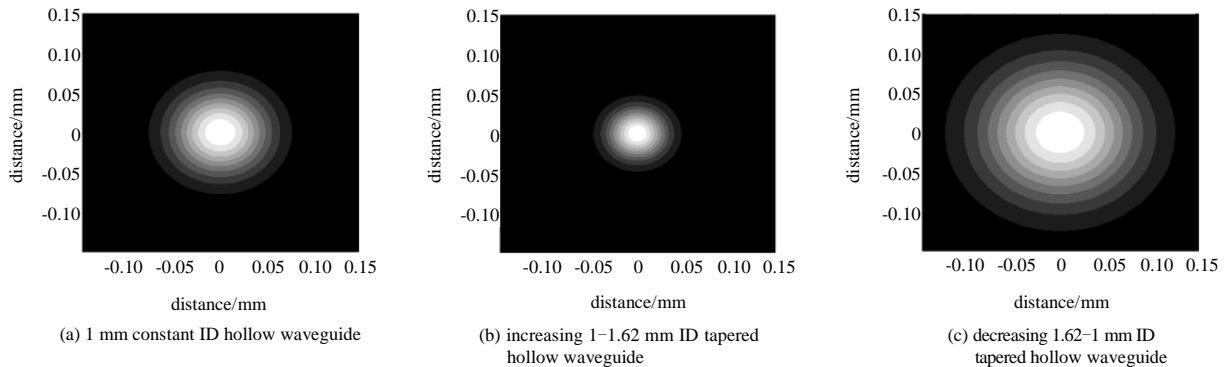


Fig.5 Output beam profiles at $d=1 \text{ mm}$
图5 距离波导输出端 $d=1 \text{ mm}$ 处的输出光斑

2.2 直线波导的传输损耗特性

当渐变型波导处于直线状态,对渐变型波导的传输损耗会造成影响的参量有波导输入端的选择(大端入射/小端入射)、波导内径尺寸和波导锥度。为研究上述变量对渐变型波导的传输损耗特性的影响,取波导长度为1 m,一端内径固定为1 mm,另一端内径在1~3 mm范围内递增,得到内径尺寸相对较大的不同锥度的渐变型波导;取波导长度为1 m,一端内径固定为0.7 mm,另一端内径在0.7~2.7 mm范围内递增,得到内径尺寸相对较小的不同锥度的渐变型波导。分别以上述波导的大端和小端为输入端,以FWHM为 5° 的高斯光束作为光源,得到波导传输损耗随波导锥度变化的曲线如图6所示。可以看出,以波导大端为入射端,传输损耗随波导锥度的增加而增加。以波导小端为入射端,传输损耗随波导锥度的增加而减小。由于小内径波导相比于大内径波导,光线在波导壁处的反射次数更多,因此无论以波导大端还是小端为入射端,小内径波导的传输损耗

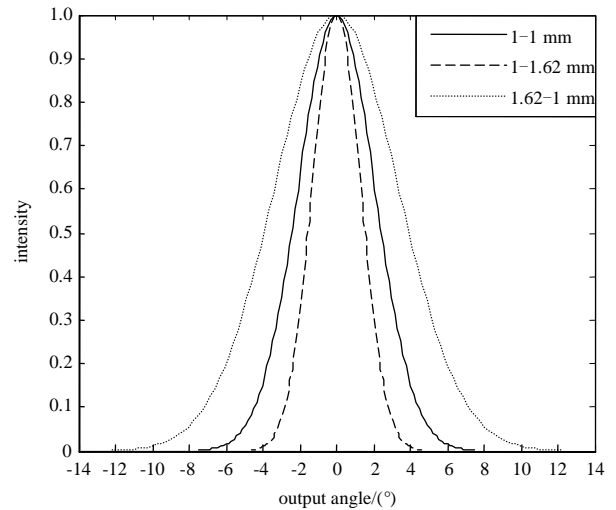


Fig.4 Normalized power transmission as a function of output angle for GTHW and CDHW

图4 渐变型与均匀型空芯波导的输出光束发散角归一化强度

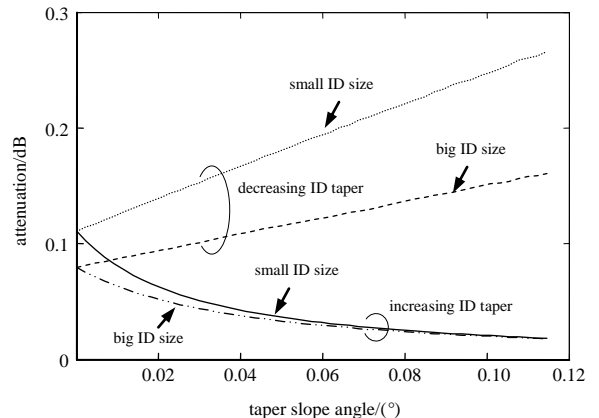


Fig.6 Calculated attenuation as a function of taper slope angle for different ID sizes increasing and decreasing ID tapered hollow waveguide

图6 不同内径尺寸波导分别以小端和大端为输入端情况下传输损耗与波导锥度的关系

对波导锥度的敏感性更大。对于大端入射，波导锥度越大，小内径波导比大内径波导的传输损耗大得越多。对于小端入射，波导锥度越大，小内径波导比大内径波导的传输损耗大得越少，当波导锥度大于一定值时，两者传输损耗几乎相等。

2.3 弯曲波导的传输损耗特性

当渐变型空芯波导处于弯曲状态时，以 FWHM 为 5° 的高斯光束作为光源，取长度为 1 m，波导内径为 1~1.62 mm 的渐变型波导，分别以其大端和小端为入射端；并取长度为 1 m，波导内径为 1 mm 的均匀型波导，进行比较研究。考虑到实际使用中的输入与输出耦合的需要，将上述波导的前 20 cm 和末端 10 cm 保持直线状态，中间 70 cm 弯曲至不同半径 r ，得到波导传输损耗随波导弯曲率($1/r$)变化的曲线，如图 7 所示。可以看出，当波导弯曲率约为 $0\sim 0.25\text{ m}^{-1}$ ，由于高损耗的 SWA 传输轨道模式占主导，传输损耗随波导弯曲率的增加而增加。接着，传输损耗随波导弯曲率的增加而呈下降趋势，传输损耗曲线出现凹谷，这是因为随波导弯曲率的增加，越来越多的光线沿低损耗的 EGM 轨道进行传输。其中，对于以渐变型波导的小端为入射端的情况，由于此时 EGM 轨道较 SWA 轨道的低传输损耗优势不突出，因此传输损耗未呈现明显的随波导弯曲率的增加而下降的趋势；相反地，对于以渐变型波导的大端为入射端的情况，EGM 轨道较 SWA 轨道的低传输损耗优势更明显，传输损耗随波导弯曲率的增加而有显著下降的趋势。此外，对于均匀型波导，其传输损耗随波导弯曲率的增加而下降的趋势程度介于以渐变型波导的小端入射和大端入射之间。当波导弯曲率大于 2 m^{-1} ，EGM 传输轨道占主导，传输损耗随波导弯曲率的增加而线性增加，进入线性损耗区域。在该区域，渐变型波导传输损耗整体略微低于均匀型波导，显示了渐变型波导在大弯曲率状态下的传输优势；以渐变型波导的大端和小端为输入端，得到的传输损耗近似相等，即以渐变型波导的大端为入射端，更有利于在与光源耦合的同时，不使弯曲附加损耗恶化。

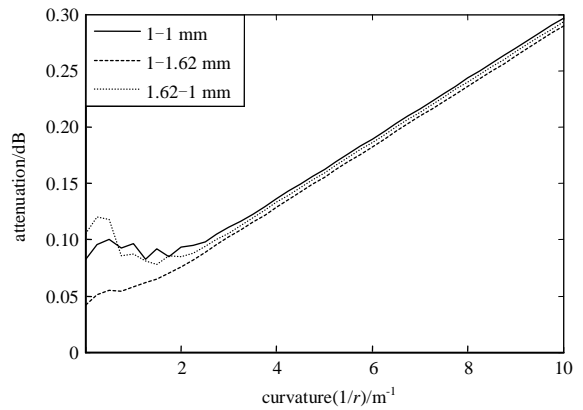


Fig.7 Calculated bending losses of increasing and decreasing ID tapered and constant ID hollow waveguide

图 7 渐变型空芯波导分别以其小端与大端为输入端以及均匀型空芯波导的弯曲传输损耗

2.4 波导弯曲长度比例对损耗的影响

作为传输介质的渐变型波导，在实际应用中会根据需求，对波导的弯曲部分进行选择，出现弯曲长度占波导总长度比例不同的情况。对弯曲长度比例分别为 70%和 50%的渐变型波导的弯曲传输损耗进行仿真，结果如图 8 所示。可以看出，无论以波导小端还是大端为入射端，弯曲长度比例越大，线性损耗区域的曲线斜率越大，即弯曲附加损耗越大，并且传输损耗曲线的凹谷越明显。

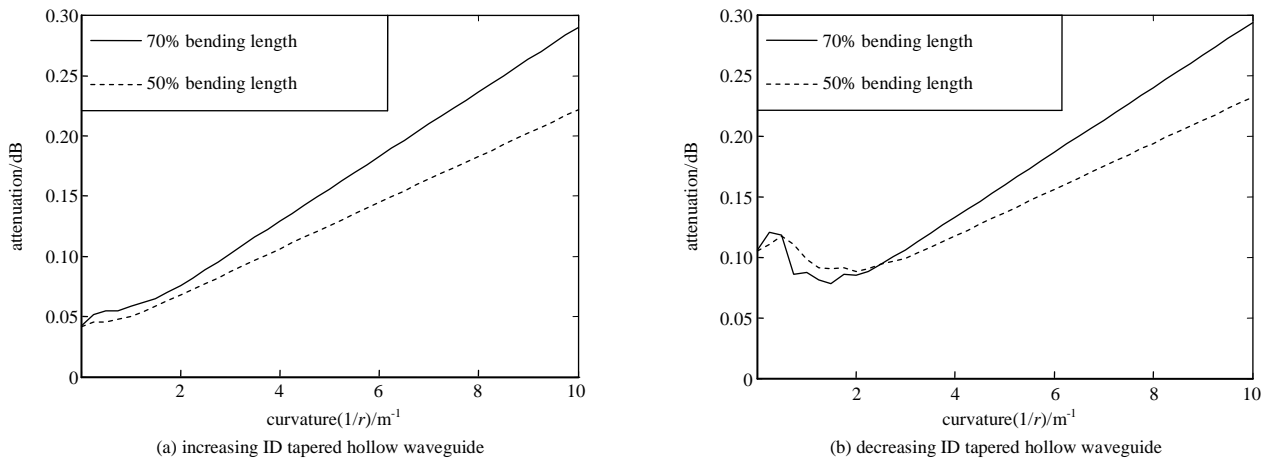


Fig.8 Calculated bending losses of increasing ID and decreasing ID tapered hollow waveguide with different bending length percentages

图 8 弯曲长度比例不同的情况下渐变型空芯波导在小端入射和大端入射的弯曲传输损耗

2.5 光源发散角对损耗的影响

由于 SWA/EGM 轨道的转换与入射光线的传输角密切相关,光源发散角会对渐变型波导的损耗带来影响。以 FWHM 分别为 1° 、 5° 和 10° 的高斯光束作为光源,得到光源的发散角对渐变型波导弯曲传输损耗的影响如图 9 所示。可以看出,无论以波导小端还是大端为入射端,光源发散角越大,传输损耗越大。由式(8)可知,光线传输角越大,进入 EGM 轨道所需的波导弯曲率越大,因此传输损耗曲线的凹谷随光源发散角的增大而右移,凹谷加深。

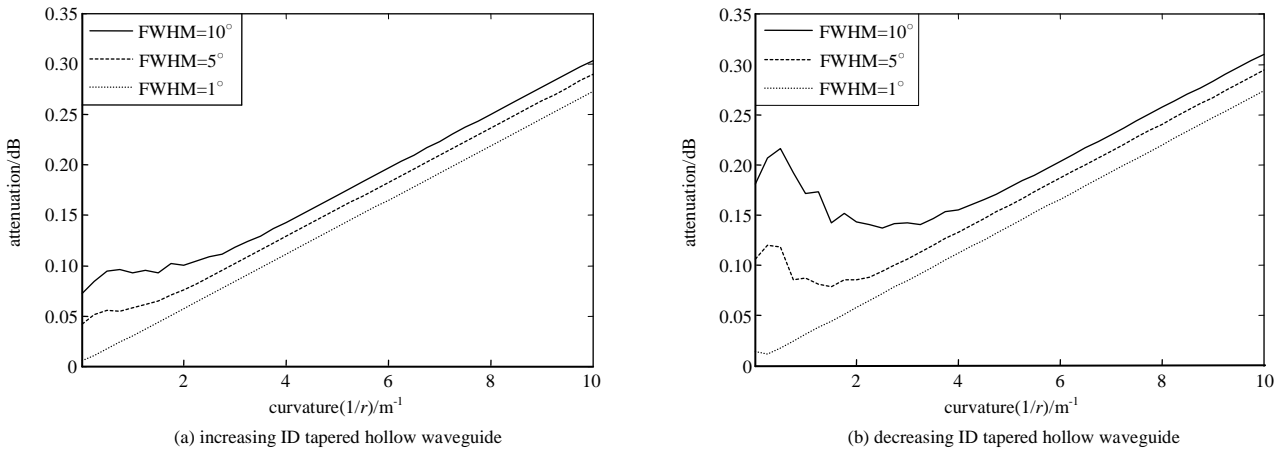


Fig.9 Calculated bending losses of increasing ID and decreasing ID tapered hollow waveguide under different FWHM divergence angles
图 9 光源发散角不同的情况下渐变型空芯波导在小端入射和大端入射的弯曲传输损耗

2.6 波导锥度对损耗的影响

为研究波导锥度对传输损耗的影响,对锥度 0.036° (波导内径 $1\sim 1.62\text{ mm}$) 和锥度 0.11° (波导内径 $1\sim 3\text{ mm}$) 的渐变型波导的传输损耗进行仿真,结果如图 10 所示。

可以看到无论小端入射还是大端入射,在线性损耗区域,不同波导锥度的损耗曲线的斜率十分接近,即波导锥度对波导处于大弯曲率状态下的弯曲附加损耗几乎无影响。这是由于当光线处于 EGM 传输轨道时,从式(10)可知光线在波导壁处每次反射的入射角恒定,不受波导锥度的影响,因此波导锥度对弯曲附加损耗的影响可忽略。

此外,大端入射时,非弯曲状态下,大锥度波导的传输损耗明显大于小锥度波导,但进入线性损耗区域后,两者损耗近似。因此大端入射时,选用大锥度波导,一方面可以得到内径更大的波导入射端且保持输出端内径不变,便于与光源和探测器耦合,另一方面不会对弯曲状态下的损耗造成明显影响,但由图 6 可知,需以增加波导直线状态下的损耗为代价,应根据需求进行权衡。

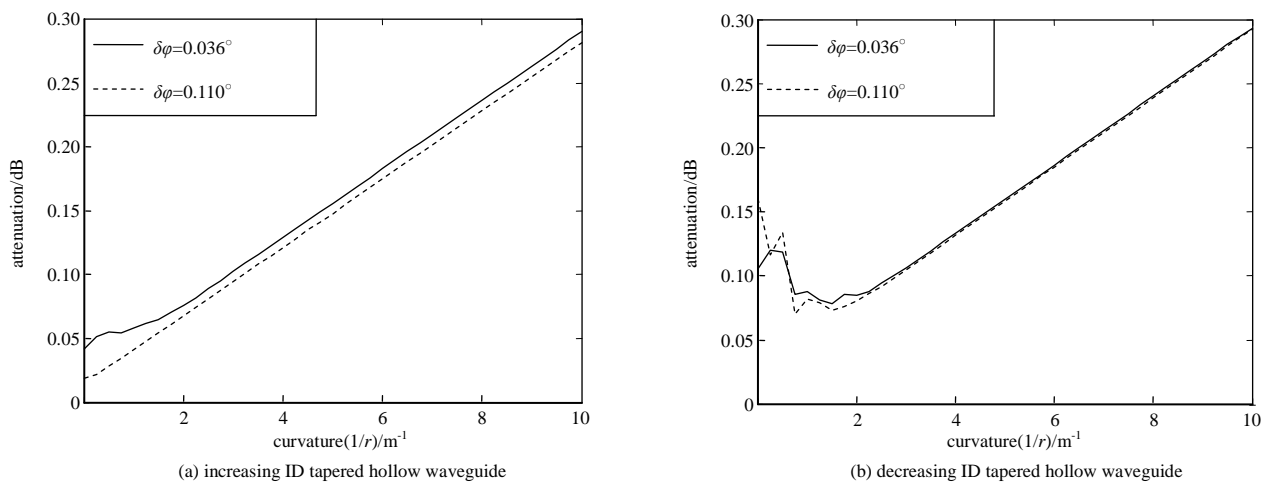


Fig.10 Calculated bending losses of increasing ID and decreasing ID tapered hollow waveguide under different taper slope angles
图 10 波导锥度不同的情况下渐变型空芯波导在小端入射和大端入射的弯曲传输损耗

3 实验结果

3.1 实验系统搭建

利用聚碳酸酯作为初始材料，通过熔融拉丝的方法，实验室制备了长度 1 m，内径 1~1.62 mm(锥度 0.036°)和内径 1~1.38 mm(锥度 0.022°)的渐变型空芯波导基管^[17]。采用液相镀膜法，在基管上镀制银膜^[18]，得到镀银膜渐变型空芯波导。使用可见光半导体 532 nm 波长激光器作为光源，由于实验所用波导内径远大于 10 THz(波长为 0.03 mm)太赫兹光和 532 nm 激光的波长，因此 2 种波长的光在渐变型空芯波导中的传输情况均符合本文第 1 节的“几何光学射线”模型，实验结果得到的传输特性趋势可以对仿真结果进行验证。

实验测量系统如图 11 所示。为测量渐变型波导的弯曲传输损耗，在波导输入端与输出端放置刻度尺，控制波导直线部分的长度，对中间部分的波导进行均匀弯曲，弯曲半径 r 分别为 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.50, 0.33, 0.25, 0.20 和 0.16 m。

3.2 测量结果

以内径 1~1.62 mm 波导的大端和小端分别作为入射端，波导的前 20 cm 和末端 10 cm 保持直线状态，中间 70 cm 弯曲至不同半径 r ，测量波导直线及不同弯曲率状态下的传输损耗，结果如图 12 所示。当波导处于直线状态时，小端入射比大端入射的传输损耗更低。当波导弯曲率大于 2，传输损耗曲线近似线性，两者损耗接近。此结果与图 7 的趋势相符。

以内径 1~1.62 mm 波导的大端和小端分别作为入射端，波导的前 20 cm 和末端 10 cm 保持直线状态，中间 70 cm 弯曲至不同半径 r ，即弯曲长度比例为 70%；波导的前 40 cm 和末端 10 cm 保持直线状态，中间 50 cm 弯曲至不同半径 r ，即弯曲长度比例为 50%。测量波导直线状态及不同弯曲率状态下的传输损耗，结果如图 13 所示。可以看出，弯曲长度比例越大，线性损耗区域的曲线斜率越大，即弯曲附加损耗越大，与图 8 仿真结果一致。

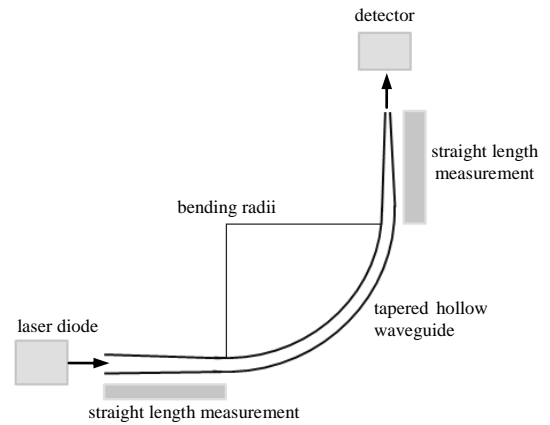


Fig.11 Schematic diagram of the measuring system for GTHW
图 11 渐变型空芯波导传输特性测量系统示意图

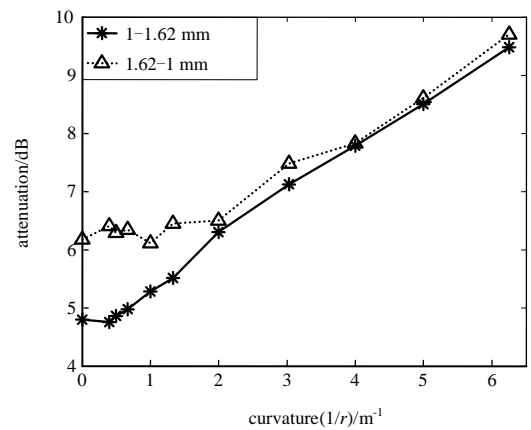
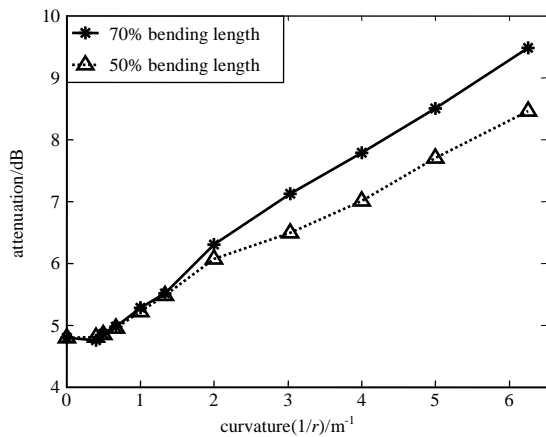
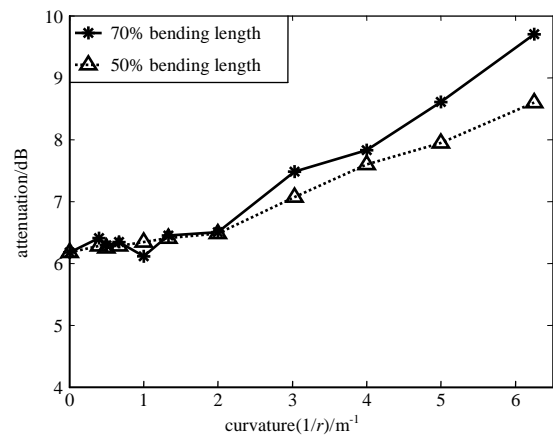


Fig.12 Measured bending losses of increasing and decreasing ID tapered hollow waveguide
图 12 渐变型空芯波导分别以其小端与大端为输入端的实测弯曲传输损耗



(a) increasing ID tapered hollow waveguide



(b) decreasing ID tapered hollow waveguide

Fig.13 Measured bending losses of increasing ID and decreasing ID tapered hollow waveguide under different bending length percentages
图 13 弯曲长度比例不同的情况下渐变型空芯波导在小端入射和大端入射实测弯曲传输损耗

分别以渐变型波导的小端和大端为入射端,测量锥度 0.036° 和锥度 0.022° 的渐变型空芯波导在直线及不同弯曲率状态时波导的传输损耗,结果如图 14 所示。直线状态时,以波导小端为入射端,锥度大的波导传输损耗更低;以波导大端为入射端,大锥度波导传输损耗明显更高。弯曲状态下,大锥度波导与小锥度波导的损耗近似,即波导锥度对弯曲附加损耗无明显影响。实验结果与图 10 的仿真结论相符。

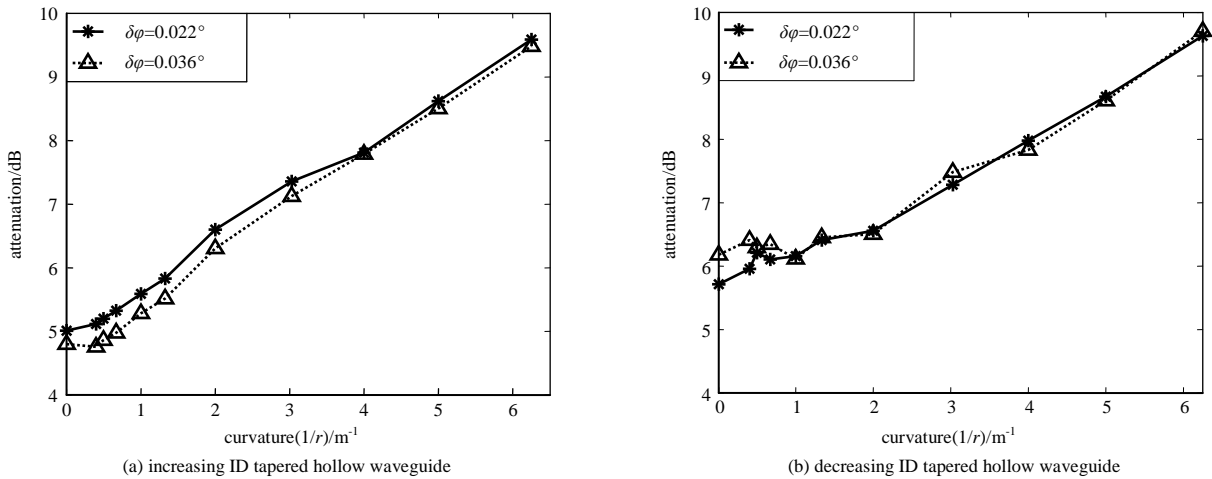


Fig.14 Measured bending losses of increasing ID and decreasing ID tapered hollow waveguide with different taper slope angles

图 14 波导锥度不同的情况下渐变型空芯波导在小端入射和大端入射的实测弯曲传输损耗

4 结论

本文基于几何光学方法,建立渐变型空芯波导内光线传输轨道模型,仿真分析了渐变型空芯波导的输出光束质量和传输损耗特性。研究了波导弯曲率、波导弯曲长度比例、光源发散角和波导锥度等参数对传输损耗的影响,并进行了实验验证,为根据需求对上述参数进行选择提供了参考。相比于均匀型空芯波导,以渐变型空芯波导的小端为入射端,传输损耗减小,并且输出光束发散角更小;以渐变型空芯波导的大端为入射端,方便与光源耦合,同时不会对弯曲附加损耗造成明显影响。综上结果表明,渐变型空芯波导在太赫兹系统中的传输和传感等方面有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016,46(8):1086–1107. (HONG Wei,YU Chao, CHEN Jixin,et al. Technology of millimeter and terahertz waves[J]. Scientia Sinica:Informations, 2016,46(8):1086– 1107.)
- [2] 谭智勇,曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器及其光束表征技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):21–25. (TAN Zhiyong,CAO Juncheng. Terahertz quantum-cascade laser and its beam pattern characterization[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):21–25.)
- [3] WAFFORD K A,BURNETT D M,LEIDENHEIMER N J,et al. Surface emitting terahertz quantum cascade laser with a double-metal waveguide[J]. Optics Express, 2006,14(24):11672–11680.
- [4] CHASSAGNEUX Y,COLOMBELLI R,MAINEULT W,et al. Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions[J]. Nature, 2009,457(7226):174–178.
- [5] YU N,WANG Q J,KATS M A,et al. Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. Nature Materials, 2010,9(9):730–735.
- [6] WIENOLD M,TAHRAOUI A,SCHROTTKE L,et al. Lateral distributed-feedback gratings for single-mode,high-power terahertz quantum-cascade lasers[J]. Optics Express, 2012,20(10):11207–11217.
- [7] 王涛,刘俊岐,刘峰奇. 高输出功率锥形波导太赫兹量子级联激光器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):361–364. (WANG Tao,LIU Junqi,LIU Fengqi. High output power tapered terahertz quantum cascade laser[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(3):361–364.)
- [8] YAO C,XU T H,WAN W J,et al. Single-mode tapered terahertz quantum cascade lasers with lateral gratings[J]. Solid-State Electronics, 2016,122:52–55.
- [9] WU C,KHANAL S,RENO J L,et al. Terahertz plasmonic laser radiating in an ultra-narrow beam[J]. Optica, 2016,3(7): 734–740.

- [10] MITROFANOV O, NAVARRO CIA M, VITIELLO M S, et al. Terahertz waveguides with low transmission losses: characterization and applications[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9199:919901.
- [11] TANG X L, SHI Y W, MATSUURA Y, et al. Transmission characteristics of terahertz hollow fiber with an absorptive dielectric inner-coating film[J]. Optics Letters, 2009, 34(14):2231-2233.
- [12] 卢昌胜, 吴振森, 李海英, 等. 基于 HITRAN 的太赫兹波大气吸收特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):346-349. (LU Changsheng, WU Zhensen, LI Haiying, et al. Atmospheric absorption characteristics of Terahertz-wave based on HITRAN[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 346-349.)
- [13] MIYAGI M. Waveguide-loss evaluation in circular hollow waveguides and its ray-optical treatment[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(2):303-307.
- [14] GIBSON D J, HARRINGTON J A. Gradually tapered hollow glass waveguides for the transmission of CO₂ laser radiation[J]. Applied Optics, 2004, 43(11):2231-2235.
- [15] ORDAL M A, LONG L L, BELL R J, et al. Optical-properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. Applied Optics, 1983, 22(7):1099-1119.
- [16] 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.
- [17] 张岷, 郜诗佳, 于晶, 等. 大口径超柔韧空芯光纤的制作和特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8):227-233. (ZHANG Huan, GAO Shijia, YU Jing, et al. Fabrication and characterization of flexible large-bore hollow fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8):227-233.)
- [18] 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[J]. 光学学报, 2016, 36(1):56-64. (LI Yiqing, TAN Zhiyong, CAO Juncheng, et al. Fabrication and characterization of big-bore flexible dielectric-coated metallic terahertz waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1):56-64.)

作者简介:



于晶(1992-), 女, 黑龙江省牡丹江市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波导. email: 14210720151@fudan.edu.cn.

陈天航(1989-), 男, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹波导.

朱晓松(1976-), 男, 沈阳市人, 副教授, 主要研究方向为光纤传感等.

石艺尉(1963-), 男, 江苏省徐州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光波导及其应用等.