

# W 波段介质金属膜空芯波导的传输特性

俞舒元, 朱晓松, 石艺尉

复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433

**摘要** 分析比较了不同孔径、不同膜厚的金属膜空芯波导与介质金属膜空芯波导在损耗、色散、耦合效率等方面的传输性质。研究表明,较大的波导孔径与较小的介质膜厚能够获得较低的传输损耗。同时,镀制一定厚度的介质膜,将增大波导的单模传输范围并改善波导的色散特性。研究了高斯光源与波导的耦合效率,通过选择合适的光源,使高次模与波导的耦合效率远低于基模。讨论了介质膜对波导与光源之间耦合效率的影响,以及其在传输波长接近波导尺寸时对波导电场分布的影响。

**关键词** 光纤光学; 光波导; 单模传输; 耦合效率

**中图分类号** TN252

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0306001

## Transmission Characteristics of Dielectric-Coated Metallic Hollow Waveguide at W-Band

Yu Shuyuan, Zhu Xiaosong, Shi Yiwei

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

**Abstract** We analyze and compare the transmission characteristics of the metallic hollow waveguides and dielectric-coated metallic hollow waveguides with different diameters and dielectric layer thicknesses, in terms of attenuation, dispersion, and coupling efficiency. It is shown that a bigger diameter and a thinner dielectric layer can achieve a lower transmission loss. We can coat a dielectric layer to improve the single-mode transmission range and dispersion property. We study the coupling efficiency between a polarized Gaussian beam and the waveguides and find that coupling efficiencies of high-order mode are lower than that of the fundamental mode for a proper optical source. We discuss the influence of the dielectric layer on the coupling efficiency, and also analyze the influence of the dielectric layer on the electric field distribution when the transmission wavelength is close to the diameter of the waveguides.

**Key words** fiber optics; optical waveguide; single-mode transmission; coupling efficiency

**OCIS codes** 060.2310; 230.7370; 060.2430; 140.3325

## 1 引 言

太赫兹 (THz) 通常指频率处于 0.1~10 THz 之间的电磁波<sup>[1-2]</sup>,其波段正好位于研究较为成熟的红外光学与微波毫米波之间,但针对 THz 波段各项技术的研究仍处于一个相对落后的“空白”频段<sup>[3]</sup>。THz 辐射在诸多领域,如传感、成像、光谱学和医学等方面均具有较大的应用潜力,因此有关太赫兹信号的处理、传输和辐射等关键技术的研究需求显得极为迫切<sup>[4]</sup>。介质金属膜空芯波导可通过在基管内

镀金属膜和介质膜得到,这种波导具有柔韧性好、结构简单、损耗低等优点。对于 THz 波来说,传输损耗较高的一个关键因素是材料对太赫兹波的本征吸收,为减少传输损耗,在金属膜上再镀制一层介质膜,进一步增加反射率,使 THz 波的能量主要集中在吸收较小的空气纤芯中<sup>[5-6]</sup>。研究结果表明,在玻璃毛细管内壁镀制银膜与介质膜(聚苯乙烯,PS)制作而成的孔径为 2 mm、长度为 90 cm 的 THz 波导,在 2.5 THz 处其损耗仅为 0.95 dB/m<sup>[7]</sup>;直接在聚四氟乙烯(PTFE)基管外侧镀制银膜制作的孔径

**收稿日期:** 2017-08-29; **收到修改稿日期:** 2017-10-07

**基金项目:** 上海市自然科学基金(15ZR1404100)

**作者简介:** 俞舒元(1993—),男,硕士,研究生,主要从事太赫兹光波导等方面的研究。E-mail: 15210720126@fudan.edu.cn

**导师简介:** 石艺尉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光波导等方面的研究。

E-mail: ywshi@fudan.edu.cn(通信联系人)

为 1 mm、长度为 28.3 cm 的波导在 1.3 THz 处的最低损耗为 17 dB/m<sup>[8]</sup>。利用同种方法制备的孔径为 2 mm、长为 20 cm 左右的波导在 0.5 THz 处损耗为 7 dB/m<sup>[9]</sup>；孔径为 4 mm 的 Ag/PS 波导在中心频率为 1.4 THz 与 0.58 THz 处其损耗分别为 1.77 dB/m 与 1.62 dB/m<sup>[10]</sup>；孔径为 3 mm 的 Ag/PE 波导与 Ag/COP 波导在中心频率为 1.5 THz 与 1.7 THz 处时其损耗分别为 1.3 dB/m 与 1.5 dB/m<sup>[11]</sup>。

波长远小于波导孔径时,介质金属膜空芯波导的介质膜最佳厚度遵循最佳膜厚公式<sup>[12]</sup>;但当传输波长接近孔径尺寸甚至大于孔径时,以往的研究结论不再适用。对于一部分太赫兹波应用,比如 THz 成像系统<sup>[13]</sup>及 THz 时域光谱系统<sup>[14]</sup>,传输波长接近孔径大小的波导是不可或缺的。本文利用全矢量有限元法对不同孔径的金属膜空芯波导及不同膜厚介质金属膜空芯波导工作在波长接近甚至大于波导孔径时的传输性质进行数值仿真模拟,计算并比较其在损耗、色散、模式、单模传输范围、耦合效率等方面之间的差异。得到了波导孔径、膜厚和单模传输范围之间的关系与介质金属膜空芯波导获得最大单模传输范围时的膜厚;发现通过镀制介质膜能够改善波导的色散特性;通过计算各模式与不同孔径、不同膜厚波导间的耦合效率发现,能够通过选择合适的光源使得波导在原本多模传输的频率范围内近似为单模传输,并找到基模与光源获得最大耦合效率的束腰比。0.1 THz 频段的通信传输实验验证了波导的低损耗和宽频带传输特性。

## 2 损 耗

本文研究的 W 波段指的是 75~110 GHz,为太赫兹谱的低频部分,研究的两种波导分别为金属膜空芯波导与介质金属膜空芯波导,金属膜为银膜,介质膜为环烯烃聚合物(COP),仿真计算参数中的银膜与 COP 介质膜复折射率均参考文献<sup>[15-16]</sup>的测量结果,仿真计算采用有限元法,使用软件为 COMSOL Multiphysics,波导结构如图 1 所示,波导孔径用  $\Phi$  表示,介质膜厚度用  $d$  表示,金属膜厚度大于趋肤深度。

对于波长远小于波导孔径的情况,介质金属膜空芯波导的介质膜最佳厚度需满足

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

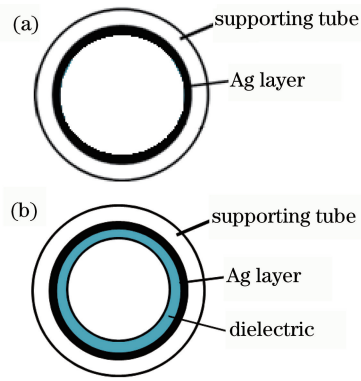


图 1 波导结构示意图。(a)金属膜空芯波导;  
(b)介质金属膜空芯波导

Fig. 1 Structure schematic of (a) metallic hollow waveguide and (b) dielectric-coated metallic hollow waveguide

式中, $n_d$  为介质膜的折射率, $\lambda$  为波导的工作波长<sup>[6]</sup>。但当传输波长接近或大于孔径时,该结论将不再完全适用。本文对传输波长与波导孔径接近甚至大于波导孔径时的传输性质展开讨论,将包含损耗、色散与耦合效率这 3 部分。

为了分析金属膜空芯波导与介质金属膜空芯波导的损耗特性,对 3 种不同孔径的金属膜空芯波导与同一孔径、不同膜厚的介质金属膜空芯波导进行仿真计算,结果如图 2 所示,其中  $\Phi$  为波导孔径。图 2 中的 3 条曲线分别表示  $\Phi=2, 3, 4$  mm 的金属膜空芯波导在 W 波段的基模传输损耗特性, $\Phi=2$  mm 的金属膜空芯波导在 W 波段的基模传输损耗为  $3 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} \sim 4 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , $\Phi=3$  mm 时为  $1.1 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , $\Phi=4$  mm 时则为  $0.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,这说明金属膜空芯波导在 W 波段的基模传输损耗随孔径  $\Phi$  的减小而增大;且  $\Phi$  不同的 3 根金属膜空芯波导的损耗曲线变化趋势一致,说明金属膜空芯波导的基模传输损耗是随频率减小而增大的。

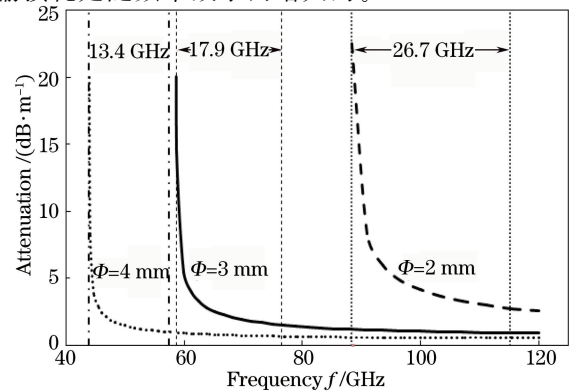


图 2 金属膜空芯波导基模损耗及单模传输范围  
Fig. 2 Transmission loss of fundamental mode and single-mode transmission range in metallic hollow waveguide

为了得到介质膜对波导基模传输损耗特性的影响,仿真计算了  $\Phi=2$  mm 的介质金属膜空芯波导在不同膜厚情况下的基模传输损耗,如图 3 所示,图中  $d$  为介质膜膜厚,标签为  $d=0$  的曲线代表金属膜空芯波导的情况。从图 3 可以看到介质金属膜空芯波导与金属膜空芯波导的损耗特性有着相似之处,均随频率的减小而增大,在频率  $f=120$  GHz 处,金属膜空芯波导的最低损耗为  $2.5 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $d=100 \mu\text{m}$  时最低损耗为  $3.7 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $d=200 \mu\text{m}$  时最低损耗为  $6.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $d=300 \mu\text{m}$  时最低损耗为  $10.4 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

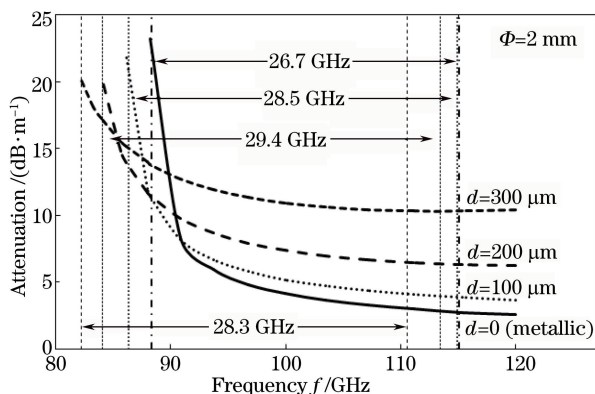


图 3 孔径为 2 mm 的介质金属膜空芯波导基模损耗及单模传输范围

Fig. 3 Transmission loss of fundamental mode and single-mode transmission range in 2-mm-diameter dielectric-coated metallic hollow waveguide

与波导孔径远大于传输波长<sup>[12]</sup>时不同,当传输波长与孔径尺寸相比接近甚至更大时,介质金属膜空芯波导的损耗随介质膜厚度的增加而单调增加,因为介质膜的材料吸收与波导尺寸过小使得电场能量溢出波导空气纤芯,介质膜难以起到增强反射以降低损耗的作用。这说明在波长与孔径尺寸相比接近甚至更大时,介质膜难以改善波导的损耗特性。但镀制介质膜后,可以观察到波导的基模损耗随着传输波长的增大其增大速度减缓,比较图 3 中 4 条曲线可知,介质膜越厚,曲线斜率的绝对值越小,这意味着损耗增大速度越缓慢。

但无论是金属膜空芯波导还是介质金属膜空芯波导, W 波段内波导的基模损耗均不足以完整描述波导的损耗特性。图 2 中虚线围成的区域其左侧为波导的截止区;右侧为多模传输区域,此时由于高次模的存在,波导基模损耗将不等同于波导的传输损耗。而中间区域对应波导单模传输范围,只有当波导工作在此范围内其基模损耗特性才能够完全描述

波导传输时的损耗特性。图 2 中左侧的点划线围成区域对应  $\Phi=4$  mm 的金属膜空芯波导的单模传输范围,为 13.4 GHz,标注在区域正上方;而中间部分疏点线围成区域对应  $\Phi=3$  mm 的金属膜空芯波导的单模传输范围,为 17.9 GHz;右侧密点线围成区域对应  $\Phi=2$  mm 的金属膜空芯波导的单模传输范围,为 26.7 GHz。因此,可以简单得到金属膜空芯波导的单模传输范围随  $\Phi$  的减小而增大并在频带上右移的结论。

若保持  $\Phi=2$  mm 不变,与图 2 相同,图 3 中 4 种不同类型线条所围成的 4 个区域对应  $d$  不同时介质金属膜空芯波导的单模传输区域,其左侧为截止区域,右侧为多模传输区域。点划线所围区域对应  $d=0$  (金属膜空芯波导) 时的单模传输范围,为 26.7 GHz;密点线所围区域对应  $d=100 \mu\text{m}$  时的单模传输范围,为 28.5 GHz;疏点线所围区域对应  $d=200 \mu\text{m}$  时的单模传输范围,为 29.4 GHz;短划线所围区域对应  $d=300 \mu\text{m}$  时的单模传输范围,为 28.3 GHz。图 3 中数据表明介质金属膜空芯波导镀制介质膜能够一定程度上增大波导的单模传输范围,并且当介质膜厚度  $d$  不断增加,单模传输范围随  $d$  的增大先增大后减小。因此,可以通过改变介质金属膜空芯波导的介质膜厚度来获得最大单模传输范围。尝试对  $d$  不同时波导的单模传输范围进行计算,获得  $\Phi$  不同时波导单模传输范围与膜厚  $d$  的关系曲线,如图 4 所示。

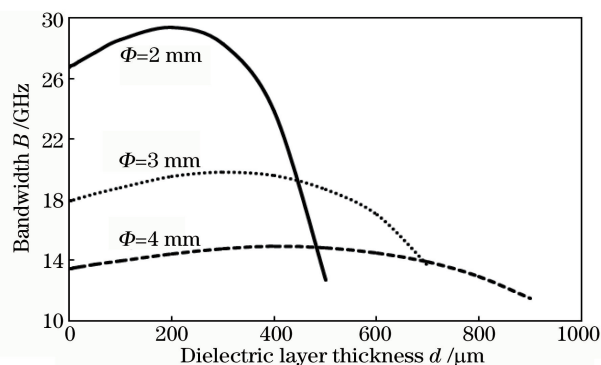


图 4 不同孔径波导其单模传输范围随膜厚变化情况  
Fig. 4 Single-mode transmission range versus dielectric layer thickness in waveguides with different diameters

图 4 中,  $\Phi=4$  mm 的介质金属膜空芯波导在  $d=400 \mu\text{m}$  附近有最大单模传输范围,为 14.9 GHz;  $\Phi=3$  mm 时在  $d=300 \mu\text{m}$  附近有最大单模传输范围,为 19.8 GHz;  $\Phi=2$  mm 时在  $d=200 \mu\text{m}$  附近有最大单模传输范围,为 29.4 GHz。由此可知,介质金属膜空芯波导在获得最大单模传输

范围时,介质膜厚度  $d$  与波导孔径  $\Phi$  几乎呈线性关系。

介质金属膜空芯波导单模传输范围随膜厚  $d$  增大而先增大后减小,当  $d$  大于一定值后,介质金属膜空芯波导的单模传输范围反而小于金属膜空芯波导,这主要是由于 COP 介质膜的材料吸收所致。当高次模与基模的传输损耗差大于  $20 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  时,便无须考虑高次模对波导传输的影响,认为进入了单模传输区域;而在讨论单模传输区域与截止区域的界线时,介质金属膜空芯波导由于介质膜使得波导损耗上升非常缓慢,并且损耗十分大,难以实际运用,因此对于损耗大于  $20 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  的部分不予讨论,认为其与截止等效,将这部分划入截止区域,扩大了单模传输范围,减小了带宽。

### 3 色 散

本文中所讨论的波导,不论是金属膜空芯波导,还是介质金属膜空芯波导,主要用于 W 波段的信号传输领域,而色散是除损耗外影响信号传输性能的另一大重要因素。由于本文讨论的几种波导在 W 波段有的工作在单模传输区域,有的则为多模传输,因此必须同时考虑单模传输时的基模色散与多模传输时的模间色散才能较为准确地讨论色散对于这些波导在传输性能上的影响。

#### 3.1 基模色散

首先讨论  $\Phi$  不同的几种金属膜空芯波导其基模色散情况,计算结果如图 5 所示。色散系数  $D$  的计算公式为

$$D(\lambda) = -\frac{c}{\lambda} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2}, \quad (2)$$

式中,  $D(\lambda)$  为色散系数,  $c$  为真空中的光速,  $n_{\text{eff}}$  为波导的有效折射率<sup>[20]</sup>。

从图 5 可以看出对于  $\Phi$  不同的几种金属膜空芯波导其基模色散系数  $D$  均随波长的增大而增大,且随着  $\Phi$  的减小,金属膜空芯波导的基模色散不断增大,色散斜率也随之增大。甚至当  $\Phi$  减小至 2 mm 时,由于波导在  $\lambda = 3.4 \text{ mm}$  处截止,色散变得非常大,基本无法应用于通信传输。对于传统通信光波导,用来描述其色散特性的色散系数  $D$  一般采用  $\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  为单位;但在 W 波段不论是波长间隔还是传输距离都与传统光波导相差较远,因此为了更直观地描述波导在 W 波段的色散特性,本文在计算色散系数  $D$  时使用的单位为  $\text{ns} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,意为波长间隔 1 mm 的信号传播 1 m 所产生

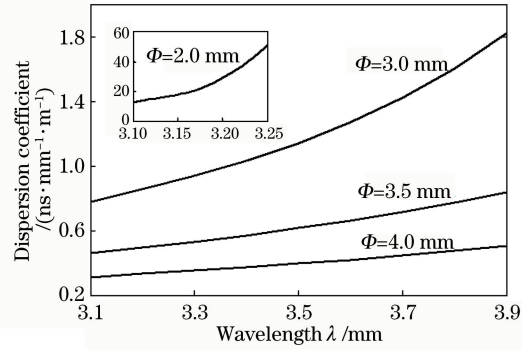


图 5 不同孔径时金属膜空芯波导基模的色散系数曲线

Fig. 5 Dispersion coefficients of metallic hollow waveguides with different diameters

的时间差为 1 ns。观察图 5 中各色散系数曲线,对于色散系数最小的  $\Phi = 4 \text{ mm}$  的金属膜空芯波导,假设有一个包含波长为 3 mm 与 4 mm 这两个频率成分的信号,在该波导内传播 1 m 后,传输时间差约为 0.4 ns。

选取基模色散最小的  $\Phi = 4 \text{ mm}$  的金属膜空芯波导,研究镀制介质膜对波导色散特性的改善,计算得到 6 条介质膜厚  $d$  不同的色散系数曲线,如图 6 所示。

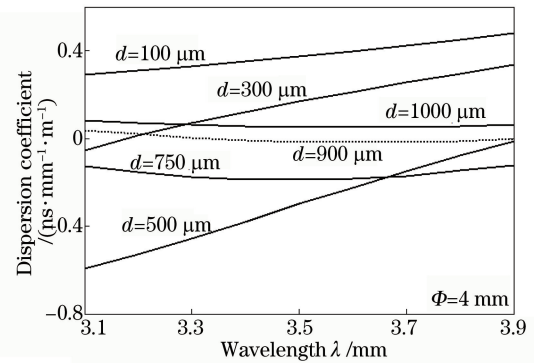


图 6 孔径为 4 mm 的介质金属膜空芯波导在介质膜厚不同时基模色散系数曲线

Fig. 6 Dispersion coefficients of fundamental mode in 4-mm-diameter dielectric-coated metallic hollow waveguide with different dielectric layer thickness

由图 6 中的 6 条色散系数曲线可知,介质金属膜空芯波导的色散特性与膜厚、波长之间的关系较其损耗特性与膜厚、波长之间的关系要复杂。随着膜厚  $d$  的增加,介质金属膜空芯波导的色散系数  $D$  并不简单遵循一个递增或递减的过程,而是先在正色散区减小后在负色散区增大 ( $d = 100, 300, 500 \mu\text{m}$ ),然后在达到最大负色散时 ( $d = 500 \mu\text{m}$ ),继续增大膜厚  $d$ ,波导的色散系数  $D$  在负色散区减小(从  $d = 500 \mu\text{m}$  至  $d = 750 \mu\text{m}$ ),达到 0 色散 ( $d =$

900  $\mu\text{m}$ ),最后在正色散区缓慢增大(从  $d=900 \mu\text{m}$  至  $d=1000 \mu\text{m}$ )。色散斜率曲线也随着  $d$  的增大先增大后减小,最后趋于平缓。介质金属膜空芯波导在膜厚  $d$  较小时依旧保有与金属膜空芯波导类似的色散特性,均为正色散且随波长的增大而单调增大;随着膜厚  $d$  增大到一定值后,介质金属膜空芯波导开始出现与金属膜空芯波导不同的色散特性,逐渐出现零色散与负色散区间。可以认为介质膜对于改善波导的色散特性有一定作用,适当的设计可以作为色散补偿使用。当膜厚  $d=500 \mu\text{m}$  时,色散系数绝对值随波长的增大而减小;而当膜厚继续增大至  $d=900 \mu\text{m}$  时,其色散系数随波长的增大变化复杂,但均小于  $10^{-7}$ ,在相同条件下其信号展宽远小于金属膜空芯波导,几乎可以忽略不计。

### 3.2 模间色散

如本章最初所述,由于本文所讨论的一部分波导在 W 波段为多模传输,仅讨论基模的色散是不完整的。为了研究多模传输对波导传输带宽减少的影响,列出不同模式(基模与另外两个高次模)在波导中传输 1 m 的时间差,从而得到信号的展宽并与波导仅存在基模时的信号展宽进行比较。

对于金属膜空芯波导,计算  $\Phi=4 \text{ mm}$  时各个模式在 75 GHz 与 100 GHz 处的群速度,得到各个模式传输 1 m 所需的时间,进而获得模式间的传输时间差,即信号展宽,具体数据见表 1。群速度计算公式为<sup>[17]</sup>

$$v_g = \frac{c}{n_{\text{eff}} - \lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda}} \quad (3)$$

表 1 中, $\Phi=4 \text{ mm}$  的金属膜空芯波导在频率 100 GHz 与 75 GHz 处因多模传输其信号分别展宽 1.171 ns 与 9.395 ns,远大于因基模模内色散导致的信号展宽(0.4 ns)。可见金属膜空芯波导中多模传输时的模间色散对于波导传输性能的影响远大于模内色散,占据波导色散的主导地位,极大地制约了波导的传输性能。

表 1 孔径为 4 mm 的金属膜空芯波导模式传播时间

Table 1 Propagation time of different modes in 4-mm-diameter metallic hollow waveguide

Wavelength $\lambda / \text{mm}$	Propagation time /ns			$\Delta t / \text{ns}$
	TE <sub>11</sub>	TM <sub>01</sub>	TE <sub>21</sub>	
3	3.714	4.076	4.885	1.171
4	4.107	5.157	13.502	9.395

对于介质金属膜空芯波导,仅计算  $\Phi=4 \text{ mm}$  时其在 100 GHz 处各个模式的群速度,得到不同膜

厚的情况下各个模式在波导中传播 1 m 所需的时间,进而获得时间差,即信号展宽,具体数据见表 2。

表 2 孔径为 4 mm 的介质金属膜空芯波导模式传播时间

Table 2 Propagation time of different modes in 4-mm-diameter dielectric-coated metallic hollow waveguide

Dielectric layer thickness $d / \mu\text{m}$	Propagation time /ns			$\Delta t / \text{ns}$
	TE <sub>11</sub>	TM <sub>01</sub>	TE <sub>21</sub>	
100	3.772	4.227	4.902	1.130
500	5.123	5.659	5.855	0.732
1000	5.533	5.740	5.884	0.351

由表 2 可知,镀制介质膜能够有效降低波导因多模传输而造成的模间色散。镀制 100  $\mu\text{m}$  的介质膜就能够将信号展宽从 1.171 ns 降低到 1.130 ns,继续增加膜厚,在其为 1000  $\mu\text{m}$  时信号展宽仅为 0.351 ns,甚至小于金属膜空芯波导基模的模内色散,仅为金属膜空芯波导模式传播时间差的 30% 左右,极大地改善了金属膜空芯波导因多模传输造成的信号展宽问题。

## 4 耦合效率

由于不同模式与光源的耦合效率不同,可以通过选择合适光源使得某个模式与光源的耦合效率远高于其他,进而实现在一个远大于实际单模传输频率范围的近似单模传输。本文关于耦合效率的计算参考文献[18]的耦合理论,光源和波导中某个模式耦合效率  $\eta$  的计算公式为

$$\eta = \frac{\left| \iint_{\Omega} \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{z} dS \right|^2}{\iint_{\Omega} \mathbf{E}_m \times \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{z} dS \iint_{\Omega} \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{z} dS} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$  为入射波电场与磁场强度, $\mathbf{E}_m, \mathbf{H}_m$  为所研究模式的电场与磁场强度, $\Omega$  为波导截面。这里采用的光源为沿  $x$  方向偏振的高斯线偏振光源,其电场的表达式为

$$\mathbf{E}^i(x, y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2}\right) \mathbf{x} \quad (5)$$

式中, $W$  为束腰半径,高斯光源入波导如图 7 所示,其中束腰半径与波导半径的比值( $W/T$ )称为束腰比<sup>[3]</sup>。

仿真计算结果显示金属膜空芯波导与介质金属膜空芯波导中的高次模与线偏振高斯光源的耦合效率非常低(小于  $10^{-6}$ ),可以忽略高次模对于波导传输性能的影响,近似认为波导为单模传输。

这里只给出基模与光源间的耦合效率计算结果, $\Phi$  不同的 3 种金属膜空芯波导与高斯线偏振光

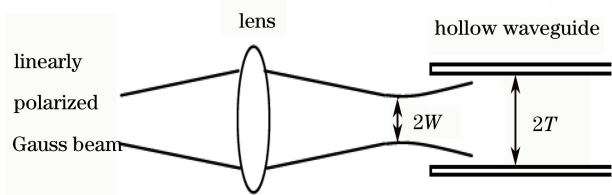


图 7 线偏振高斯光束入射空芯波导示意图  
Fig. 7 Schematic of linearly polarized Gaussian beam coupling to the hollow waveguide

源的耦合效率与光源束腰比关系曲线如图 8(a)所示,可以发现,3 条曲线的峰值均在束腰比为 0.8 左右取得,且随波导孔径减小,耦合效率急剧降低, $\Phi = 4$  mm 时最大值为 62.69%, $\Phi = 3$  mm 时最大值为 46.03%, $\Phi = 2$  mm 时最大值为 9.42%。与波导孔径尺寸远大于波长时<sup>[19]</sup>结论相似,耦合效率曲线对于束腰比的变化非常敏感。

介质金属膜空芯波导与线偏振高斯光源的耦合情况与金属膜空芯波导相似,如图 8(b)所示。由于  $\Phi$  不同的波导其耦合曲线趋势类似,仅给出  $\Phi = 4$  mm 时介质金属膜空芯波导在膜厚  $d$  不同时的耦合效率曲线。由图 8(b)可知,介质金属膜空芯波导其基模与光源耦合情况与金属膜空芯波导在趋势上大致相同,但达到耦合效率最大时的束腰比取值略有差别。随着膜厚  $d$  的增大,光源与波导的耦合效率先减小后增大,且最大值对应束腰比的取值先增大后减小。图中  $d = 1600 \mu\text{m}$  时的耦合效率曲线最大值为 64.91%,大于金属膜空芯波导的 62.69%。

为了进一步研究介质金属膜空芯波导膜厚对于波导耦合效率的影响,控制束腰比不变(均为各自的最佳束腰比),计算  $d$  不同时与 W 波段光源的耦合效率,如图 9 所示, $\Phi = 4$  mm。由图 9 可知,从  $d = 0$  (金属膜空芯波导)至  $d = 100, 300, 500, 700 \mu\text{m}$ ,耦合效率随膜厚增大而减小,并且最初为耦合效率随波长的增大而单调递减,其曲线斜率慢慢减小;随波长的增大,耦合效率先增大后减小,而至  $d = 700 \mu\text{m}$  时,耦合效率曲线呈现与膜厚较薄时完全不同的趋势——其耦合效率随波长的增大而单调递增。继续增大膜厚  $d$ ,其耦合效率曲线的变化趋势与之前完全相反——耦合效率随膜厚的增大而增大,从最初的随波长增大而单调递增变为先增大后减小,最后至  $d = 1600 \mu\text{m}$  时为单调递减。

图 8、图 9 中耦合效率曲线随膜厚变化产生的变化,主要是由于电场形变所致。模式与光源的耦合效率取决于模式电场与光源电场的相似度<sup>[17]</sup>,金属膜空芯波导与不同膜厚的介质金属膜空芯波导在

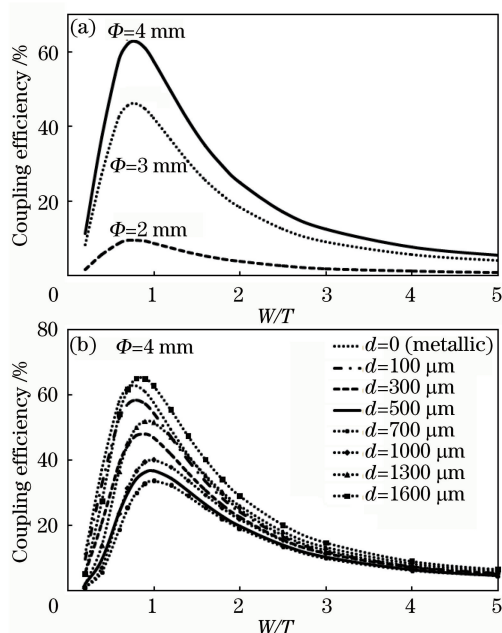


图 8 (a)不同孔径金属膜空芯波导基模耦合效率与束腰比的关系;(b)孔径为 4 mm 的介质金属膜空芯波导在膜厚不同时的基模耦合效率与束腰比的关系

Fig. 8 (a) Coupling coefficient of fundamental mode versus waist/diameter ratio for metallic hollow waveguides with different diameters; (b) coupling coefficient of fundamental mode versus waist/diameter ratio for 4-mm-diameter dielectric-coated metallic hollow waveguides with different dielectric layer thicknesses

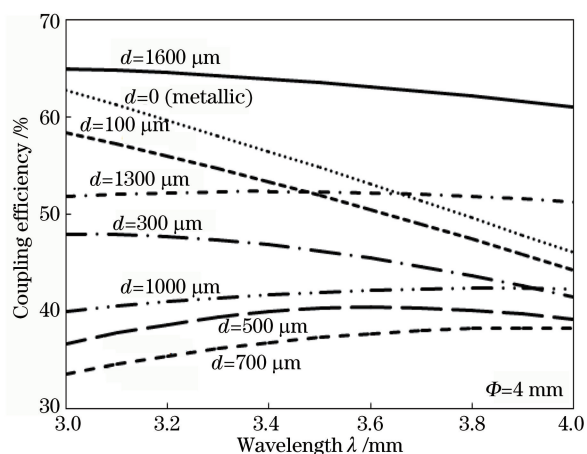


图 9 最佳束腰比下不同膜厚时介质金属膜空芯波导基模耦合效率与波长的关系

Fig. 9 Coupling coefficient of fundamental mode versus wavelength for dielectric-coated metallic hollow waveguides with different dielectric layer thicknesses at optimum waist/diameter ratio

100 GHz 处其基模电场如图 10 所示,可作为参考。

而在实际运用中,通过实验证明,金属膜空芯波导确实能够通过合适光源耦合使其在 W 波段传

输信号时近似为单模传输<sup>[20]</sup>。实验采用 2 根并行的 1.5 m 长、 $\Phi=4$  mm 的金属膜空芯波导作为传输媒介,通过外部腔激光器(ECL)和 I/Q 调制器得到混合 I 路和 Q 路的 QAM 调制信号,再使信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后分路,与 2 个发光二极管(PD)同时外差得到 W 波段毫米波信号,输入并行的 2 根金属膜空芯波导。实验结果证明同时传输 2 路 PM-16QAM 信号在 W 波段可获得 128 Gb/s 的传输速率<sup>[19]</sup>。在该调制方式下,实际的符号速率为 32 GBaud/s,因此带宽约为 8 GHz。若为多模传输,带宽应小于 1 GHz,说明通过选择合适光源确实能够使得波导在多模传输的频率范围内忽略高次模对于信号展宽的影响,实现单模传输。

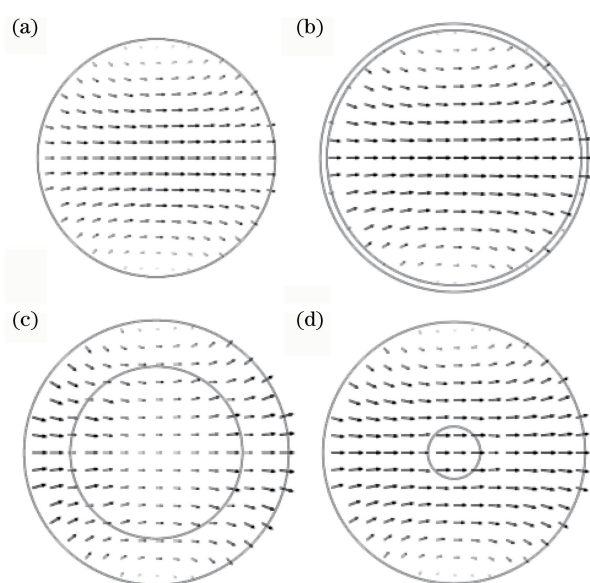


图 10 不同膜厚时介质金属膜空芯波导基模电场形状。

(a)  $d=0$ ; (b)  $d=100 \mu\text{m}$ ;

(c)  $d=700 \mu\text{m}$ ; (d)  $d=1600 \mu\text{m}$

Fig. 10 Electric fields of fundamental mode in dielectric-coated metallic hollow waveguides with different dielectric layer thicknesses of (a)  $d=0$ , (b)  $d=100 \mu\text{m}$ , (c)  $d=700 \mu\text{m}$ , and (d)  $d=1600 \mu\text{m}$

## 5 结 论

本文研究了孔径尺寸与波长相近的不同孔径金属膜空芯波导和不同孔径、不同膜厚的介质金属膜空芯波导在 W 波段的传输性质。不论是金属膜空芯波导还是介质金属膜空芯波导,减小孔径均将增大损耗,但能增加波导的单模传输范围。对于介质金属膜空芯波导,调整膜厚能够进一步增加波导单模传输范围。波导多模传输时,制约波导带宽的因素主要是模间色散,模内色散为次要因素。波导单

模传输范围虽然随着孔径减小而增大,但减小波导孔径会增加基模模内色散,特别是当波导工作在截止波长附近,其基模模内色散甚至远大于大孔径波导多模传输时的模间色散。对于介质金属膜空芯波导,增加膜厚能够明显减小波导的模间与模内色散,甚至出现负色散与零色散区间。

此外,若选择合适光源,比如线偏振高斯光源,能够使得波导在原先的多模传输频率范围近似单模传输,金属膜空芯波导基模的耦合效率最大为 62.69%,介质金属膜空芯波导在介质膜膜厚为 1600  $\mu\text{m}$ 时可以达到 64.91%。

## 参 考 文 献

- [1] Tang X L, Shi Y W. Transmission characteristics of dielectric-coated metal hollow fiber for terahertz wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2057-2061. 汤晓黎, 石艺尉. 介质/金属结构太赫兹空芯光纤的传输特性[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2057-2061.
- [2] Tang X L, Shi Y W. Characterization of terahertz hollow fiber with an absorptive inner-coating dielectric layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2681-2685. 汤晓黎, 石艺尉. 吸收介质膜/金属空芯光纤的太赫兹波传输特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2681-2685.
- [3] Tang X L. Terahertz hollow waveguide [D]. Shanghai: Fudan University, 2012. 汤晓黎. 太赫兹空芯波导[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [4] He X Y, Chen Q, Zhang Y X, *et al.* Design and fabrication of cyclic-olefin copolymer based terahertz photonic crystal fiber [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(1): 28-31. 何晓阳, 陈琦, 张屹遐, 等. 环烯烃聚合物太赫兹光子晶体光纤设计与制造[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014, 12(1): 28-31.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Fabrication of terahertz hollow-glass metallic waveguides with inner dielectric coatings[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(9): 093110.

- [8] Navarro-Cia M, Melzer J E, Harrington J A, *et al.* Silver-coated Teflon tubes for waveguiding at 1-2 THz[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, 36(6): 542-555.
- [9] Melzer J E, Navarrocia M, Mitrofanov O, *et al.* Silver-coated Teflon hollow waveguides for the delivery of terahertz radiation [C]. SPIE, 2014, 8938: 89380I.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Sanghera J S, Shaw L B, Busse L E, *et al.* Infrared optical fibers and their applications[C]. SPIE, 1999, 3849: 38-49.
- [13] Wang K, Mittleman D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 376-379.
- [14] Chen L J, Chen H W, Kao T F, *et al.* Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 308-310.
- [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] Sengupta A, Bandyopadhyay A, Bowden B F, *et al.* Characterization of olefin copolymers using terahertz spectroscopy[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(25): 1477-1479.
- [17] Agrawal G P. *Fiber-optic communication systems* [M]. 4<sup>th</sup> ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2011.
- [18] Snyder A W, Love J D. *Optical waveguide theory* [M]. Boston: Chapman and Hall, 1983.
- [19] Nubling R K, Harrington J A. Launch conditions and mode coupling in hollow-glass waveguides[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(9): 2454-2458.
- [20] Yu J, Li X, Tang X, *et al.* High-speed signal transmission at W-band over dielectric-coated metallic hollow fiber [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2015, 63(6): 1836-1842.