

# 介质/金属波导在 G 波段的损耗和色散特性

李维轩<sup>1</sup>, 朱晓松<sup>1</sup>, 石艺尉<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中山复旦联合创新中心, 广东 中山 528437

**摘要** 仿真研究了介质/金属波导在 140~220 GHz 频段的损耗和色散特性。在该频段, 当传输波长接近波导尺寸时, 介质层不能降低传输损耗, 但介质层导致模场结构发生变化, 波导的色散进入负值区间。分析总结了具有不同介质层厚度的介质/金属波导的色散特性变化和零色散位置。提出了利用不同介质层厚度的波导对金属波导进行色散补偿的方法和方案。结果表明, 通过色散补偿可以实现在不同频点的零色散特性, 也可以实现一定频段范围内的平坦低色散特性。研究结果对该频段波导的结构设计和制作工艺等具有指导意义。

**关键词** 光纤光学; 光波导; 模式; 色散

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1806004

## Loss and Dispersion Properties of Dielectric-Coated Metallic Waveguide in G-Band

Li Weixuan<sup>1</sup>, Zhu Xiaosong<sup>1</sup>, Shi Yiwei<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information, Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>Zhongshan-Fudan Joint Innovation Center, Zhongshan, Guangdong 528437, China

**Abstract** Loss and dispersion characteristics of dielectric-coated metallic hollow waveguides are simulated for frequencies ranging from 140 GHz to 220 GHz. Results show that the dielectric layer coating cannot reduce the transmission loss in this frequency band when the operation wavelength is close to the inner diameter of the waveguide. However, the electric field profile of the model is distorted because the dielectric layer and dispersion of the waveguide switches from positive to negative. The dispersion variation and zero-dispersion position in dielectric-coated metallic hollow waveguides with different dielectric layer thicknesses are analyzed and summarized. Dispersion compensation methods and schemes for metal waveguides are proposed using waveguides with different dielectric layer thicknesses. The result shows that zero-dispersion can be achieved at different frequencies and flat and low dispersion over specific frequency bands can be realized. It guides structural design and fabrication parameter control for the waveguides used in this frequency band.

**Key words** fiber optics; optical waveguide; mode; dispersion

**OCIS codes** 060.2310; 230.7370; 030.4070; 260.2030

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波通常是指频率为 0.1~10 THz 的电磁波<sup>[1]</sup>, 介于微波和红外波段之间, 属于电子学

和光子学的交叉领域, 拥有许多独特的传输特性, 如通信速率高、空间分辨率高、受恶劣天气影响小、能量低等<sup>[2-3]</sup>。太赫兹波还具有未被充分开发的频谱资源, 诸多特殊的物理属性使其广泛应用于成像、探

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-03-29; 录用日期: 2021-04-12

基金项目: 国防科技创新特区项目、国家自然科学基金(61975034)

通信作者: \*ywshi@fudan.edu.cn

测、传感和通信等领域<sup>[2, 4-7]</sup>,也更适合大容量无线通信和未来 6G 的应用<sup>[2]</sup>。其中,适合下一代地面无线通信的频段包括中心频率为 220 GHz 的低衰减大气窗口<sup>[7]</sup>。与微波相比,太赫兹波有介质吸收损耗高、导体欧姆损耗高及容易被空气中的水蒸气吸收等问题<sup>[4]</sup>,不适合长距离传输,故亟待开发新型低损耗太赫兹波导。由于实芯介质波导易受材料本征吸收的影响,Hassani 等<sup>[8]</sup>提出了无包层、截面布满空气小孔的微结构波导,该波导将能量限制在空气孔中传输,从而降低了材料对太赫兹波的吸收损耗。

空芯波导以空气为纤芯,结构简单,无端面反射损耗,可以将太赫兹波束缚在空气芯当中,抗干扰能力强,现已应用在无线电、微波传输及红外激光传能等领域<sup>[9]</sup>。将微波频段常用的金属空芯波导缩小尺寸后,其可以直接应用在太赫兹频段,但是内壁粗糙和金属的有限导电性,导致传输损耗较高,一般只可用于太赫兹波的短距离传输。为了降低传输损耗,Unger<sup>[10]</sup>提出介质/金属结构的波导,在金属波导的内壁上镀制一层介质膜,可以增加反射率,使太赫兹波的能量更加集中在吸收较小的空气芯中,从而大大降低了传输损耗,同时该结构还具有柔性好、功率容量大等优点<sup>[11]</sup>。近年来多篇文献报道了基于介质/金属结构的太赫兹低损耗波导。文献[12]报道了内径为 2 mm 的聚苯乙烯(PS)/银(Ag)空芯波导,在 2.5 THz 频率处损耗为  $0.95 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ;文献[13]报道了内径为 3 mm 的聚乙烯(PE)/银(Ag)空芯波导,在 1.5 THz 频率处的损耗低至  $1.3 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ;文献[14]报道了内/外径为 3.6/4 mm 的环烯烃聚合物(COP)/银(Ag)空芯波导,在 0.16 THz 和 4.3 THz 频率处损耗分别为  $2.10 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $2.84 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

另外,波导的色散会导致脉冲展宽,在通信中引起码间串扰,影响传输带宽,严重限制了传输速率。除低损耗波导外,近年来还出现了一些具有平坦低色散特性的太赫兹波导。文献[15]报道了具有实心微结构的太赫兹塑料光纤,在 0.1~3 THz 频段内的传输损耗低于  $0.50 \text{ cm}^{-1}$ ,且具有平坦的色散特性,平均群速度色散为  $2 \text{ ps} \cdot \text{GHz}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;文献[16]提出了一种悬浮芯聚合物太赫兹波导,在 0.8~1 THz 频段内损耗低至  $0.062 \text{ cm}^{-1}$ ,实现了  $(0.14 \pm 0.07) \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  的低平坦色散;文献[17]提出了基于六晶格包层的波导,用于太赫兹传输,损耗约为  $0.04 \text{ cm}^{-1}$ ,色散为  $(0.47 \pm$

$0.05) \text{ ps} \cdot \text{THz}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。另外,利用具有高负色散特性的波导进行色散补偿也是降低传输线整体色散的有效方法<sup>[18]</sup>。

在波导结构优化过程中,对于频率大于 1 THz 的高频段太赫兹波,传输波长远小于波导孔径,介质/金属波导的介质层最佳厚度遵循最佳膜厚的理论公式<sup>[19]</sup>;但对于较低频率端,如 G 波段(频率为 140~220 GHz,波长为 1.36~2.14 mm),传输波长是红外波段的几十至几百倍,传输波长接近甚至大于波导孔径,传输特性会发生相应的变化<sup>[20-21]</sup>。本文对介质/金属波导结构在 G 波段的传输特性进行了仿真,分析了介质层厚度对传输损耗、色散和耦合效率的影响,给出了通过介质/金属波导结构实现波导色散补偿的方案。

## 2 损耗特性

随着工作频率的提高,标准矩形波导的截面尺寸越来越小。WR-5 波导的截面为长 1.30 mm、宽 0.65 mm 的矩形,在 140~220 GHz 工作频段的损耗( $\alpha$ )为  $5.85 \sim 11.3 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而圆波导因截面中心对称具有灵活的弯曲特性,并且损耗较小。为了确保圆波导的基模( $\text{TE}_{11}$  模)远离截止波长以降低损耗,其半径一般和标准矩形波导在同样量级。本实验组研究的介质/金属波导的示意图如图 1 所示, $\Phi$  为波导内径, $d$  为介质层厚度, $d=0 \mu\text{m}$  则为金属波导。波导的金属材料选择 Ag,介质层材料选用 COP。

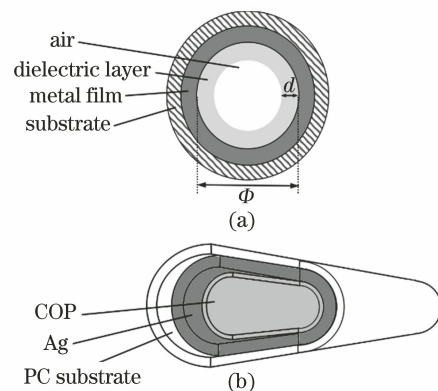


图 1 介质/金属波导示意图。(a)截面图;(b)结构图  
Fig. 1 Schematic of dielectric-coated metallic hollow waveguide. (a) Cross section; (b) structure diagram

采用基于有限元分析法的商用软件 COMSOL 仿真各种类型波导的传输特性。利用有限元法,将求解区域划分成多个三角形网格单元,最大网格单元尺寸为最小波长的 1/5。在考虑波导腔对电磁波

吸收的情况下,使用阻抗边界条件来指定 Ag 波导内壁材料,图 2 为通过 Drude 模型获得的相对介电常数的实部  $n$  和虚部  $k$ <sup>[22]</sup>。COP 是一种目前在太赫兹波导领域应用较为广泛的材料,介质吸收相对较小,光学参数均取自参考文献[23]的测量结果,在该波段折射率为 1.53,吸收系数为  $0.04 \text{ cm}^{-1}$ 。图 3 为 WR-5、WR-10 两种标准矩形波导和三种不同孔径的圆形金属波导的损耗谱,频段为 120 ~ 250 GHz,步长设置为 10 GHz。

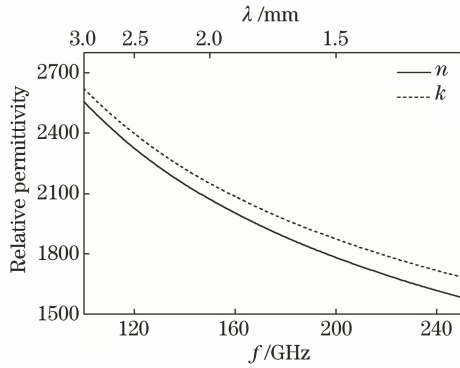


图 2 Ag 的相对介电常数

Fig. 2 Relative permittivity of Ag

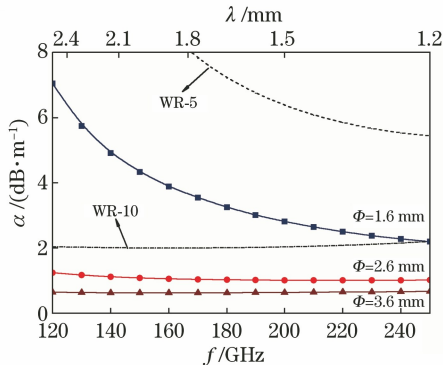


图 3 圆波导和标准矩形波导在 G 波段的基模损耗谱

Fig. 3 Loss spectra of fundamental mode in circular waveguides and standard rectangular waveguides in G-band

从图 3 可以看出,圆波导的基模传输损耗随着内径的减小而增大,内径为 3.6 mm 的圆波导的基模传输损耗为  $0.6 \sim 0.7 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,内径减小到 2.6 mm 时损耗增大到  $1.0 \sim 1.2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ ,但均低于 WR-5 标准矩形波导在相同频率处的损耗。在高频率端,趋肤深度变浅,金属波导的欧姆损耗上升,而在低频端,随着波长的增大,临近截止波长处波导的损耗会上升,因而损耗谱有微弱的先减小后增大的趋势,但在 G 波段整体损耗趋于平坦。对于内径为 1.6 mm 的波导,基模的截止波长也更靠近 G 波

段,损耗谱随着频率的增加单调递减。在低频率端损耗增加到  $20 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$  以上时,可以认为波导中  $\text{TE}_{11}$  模已经截止。因此设计时需选择适当的波导内径,使工作频段远离高损耗区间。

对于中远红外波导,在金属内面镀制介质膜是降低传输损耗的有效常用方法<sup>[24]</sup>。图 4 给出了内径为 2.6 mm 的介质/金属结构波导在 G 波段的损耗特性。在不考虑材料吸收的条件下,介质层厚度较薄时损耗随频率的变化趋势与金属波导类似,即在 G 波段保持平坦。与金属波导相比,介质/金属结构波导损耗整体上升,在高频段损耗增加尤为明显。在 220 GHz 频率处,金属圆波导的损耗为  $1.01 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , $d = 50 \mu\text{m}$  时波导损耗略有增加,为  $1.40 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , $d = 250 \mu\text{m}$  时波导损耗为  $6.33 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

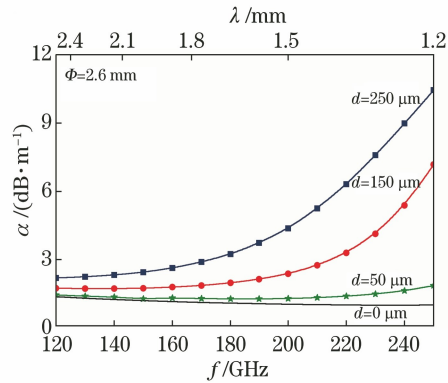


图 4 不同介质层厚度圆波导  $\text{TE}_{11}$  模的损耗谱

Fig. 4 Loss spectra of  $\text{TE}_{11}$  mode in circular waveguides with different dielectric layer thicknesses

即使在不考虑介质层吸收的情况下,介质/金属结构波导在 G 波段的基模损耗均高于金属波导。这是因为在内径一定的条件下,介质层增厚时空气纤芯的大小受到压缩,电场能量溢出波导空气芯,进入介质层当中,导致损耗升高。图 5 为内径为 2.6 mm 的金属波导和介质/金属波导中典型低阶模的场分布。其中图 5(a)、(c)、(e)为金属波导中  $\text{TE}_{11}$  模、 $\text{TM}_{11}$  模、 $\text{TE}_{12}$  模的场分布,图 5(b)、(d)、(f)为具有不同介质层厚的介质/金属波导中  $\text{TE}_{11}$  模、 $\text{TM}_{11}$  模、 $\text{TE}_{12}$  模的场分布。对比图 5(a)和(b)可知,300  $\mu\text{m}$  的介质层使  $\text{TE}_{11}$  模式的场分布发生了严重畸变,电场能量主要集中在介质层中,而不是在空气芯中。由图 5(c)~(f)可知,金属波导中的  $\text{TM}_{11}$  和  $\text{TE}_{12}$  模式的部分模场形状与  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TE}_{11}$  模式较为相似,在介质/金属结构波导中  $\text{TM}_{11}$  模式的电场分布在  $d = 200 \mu\text{m}$  时向  $\text{HE}_{11}$  模式趋同,而  $\text{TE}_{12}$  模式在  $d = 400 \mu\text{m}$  附近与  $\text{TE}_{11}$  模式较为相似。



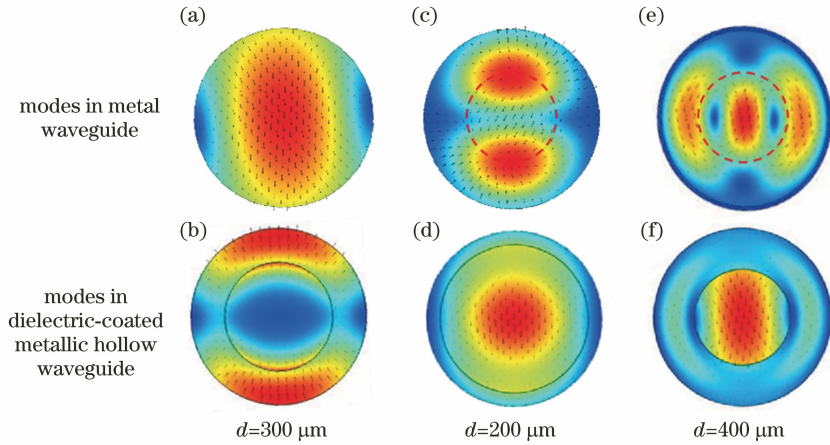


图 5 波导中模式的电场分布。(a)(b) TE<sub>11</sub> 模式;(c)(d) TM<sub>11</sub> 模式;(e)(f) TE<sub>12</sub> 模式

Fig. 5 Electric field distributions of modes in waveguide. (a)(b) TE<sub>11</sub> mode; (c)(d) TM<sub>11</sub> mode; (e)(f) TE<sub>12</sub> mode

为了评价模场分布的畸变程度,引入各个模式与高斯光源的最大耦合效率( $\eta_{\max}$ )作为参考。通过调整光源束腰半径和波导内径之比,模式和光源的耦合效率达到最大值<sup>[25]</sup>。图 6 是内径为 2.6 mm 的介质/金属结构波导和高斯光源的  $\eta_{\max}$  与介质层厚的关系。在金属波导中 TE<sub>11</sub> 模和高斯光源的  $\eta_{\max}$  可以达到 80%。随着介质层厚度的增加,能量逐渐从空气芯进入到介质层中传输,耦合效率有所下降。TM<sub>11</sub> 模、TE<sub>12</sub> 模则在介质层达到一定厚度之后,耦合效率相对金属波导有所增大,但此时模式的截止频率也随之改变,因为模式的场分布已经发生严重畸变,不再是原本的 TM<sub>11</sub> 和 TE<sub>12</sub> 模式。因此在特定的介质/金属结构下,高阶模式能量向基模转化,模场与基模趋于相似,损耗也有所降低,耦合效率增大。

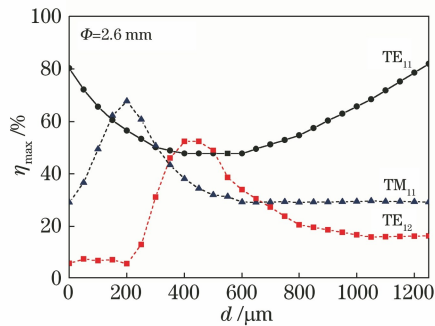


图 6 不同介质层厚的波导与高斯光源的模式最大耦合效率  
Fig. 6 Maximum coupling efficiency of modes with Gaussian beam and the waveguides with different dielectric layer thicknesses

从降低波导损耗的角度优化介质/金属波导的结构,即介质层的厚度。文献[26]的仿真结果表明,亚波长空芯波导的介质层厚度最优值与波导空气芯

大小有关,而孔径远大于波长的波导介质层厚度最优值和波导孔径无关。在 G 波段,介质/金属结构波导的空气芯大小既不满足亚波长、也不满足远大于波长的条件。在这种情况下波导中是多模传输的,对于波导的基模,介质层无法降低其损耗;对于波导的高次模,则与亚波长波导结论一致,即最优介质层厚度与波导空气芯大小有关。

### 3 色散特性

色散导致脉冲展宽,引起码间串扰,影响传输带宽。虽然介质层在 G 波段无法降低基模的损耗,但可以降低基模色散。色散系数为

$$D(\lambda) = -\frac{c}{\lambda} \times \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2}, \quad (1)$$

式中: $c$  为真空中的光速; $\lambda$  为波长; $n_{\text{eff}}$  为波导的有效折射率<sup>[25]</sup>。

在 W 波段(75~110 GHz)的仿真结果表明,对内径为 4 mm 的介质/金属波导,波导尺寸与传输波长接近,色散谱出现零色散点和色散系数为负的区域<sup>[25]</sup>。在 G 波段,介质/金属波导的色散特性在介质层厚增加时有明显的变化。图 7 是内径为 2.6 mm 具有不同介质层厚波导的基模色散系数。与 WR-5 矩形波导相似,内径为 2.6 mm 的金属圆波导的色散系数随着频率增加单调递减且色散系数为正值。而 G 波段的介质/金属结构波导的色散系数变化趋势相比在 W 波段更加复杂。介质层厚度较薄时,色散随频率的变化趋势与金属波导类似,当厚度达到 200  $\mu\text{m}$  及以上时,曲线趋势变为先减后增,在该波段存在最低点。色散曲线随着介质层厚的增加进一步下移,高频端的色散系数先进入色散

负值区间,并且零色散点向低频端移动。当厚度增大到 300  $\mu\text{m}$  以上时,在 G 波段,低频端曲线已经全部进入负值区间,高频段的色散系数又从负值变为正值,色散零点又会重新出现在高频端,并随着介质层厚度的增加向低频端移动。图8给出了内径为

2.6 mm、不同介质层厚的波导结构色散零点的位置和介质层厚度的关系。

由图 8 可知,金属波导在 G 波段无零色散点。对于介质层厚大于 50  $\mu\text{m}$  的介质金属波导,在该波段仅有一个零色散点,但在同一频率处,使色散为零的波导结构不止一种。例如  $d = 100 \mu\text{m}$  和  $d = 400 \mu\text{m}$  的介质/金属结构波导在 200 GHz 附近均有零色散点。对照图 7 色散曲线的趋势可知,介质层厚度为 100~400  $\mu\text{m}$  的波导结构在 200 GHz 处的色散曲线均应处于负值区间内,故均可以作为色散补偿波导对金属波导中产生的色散进行补偿。但因为具有介质层的波导损耗大于金属波导,所以具有介质层的波导用作色散补偿波导时,需要考虑对损耗的影响。根据图 8,对于内径为 2.6 mm、长度  $l = 1 \text{ m}$  的金属波导,计算出在典型频点处具有不同介质层厚度的色散补偿波导的长度和附加损耗,并将其作为色散补偿波导的选择依据,具体数据如表 1 所示。如在 200 GHz 频率处,内径为 2.6 mm 的金属波导基模色散系数为  $2.29 \text{ ps} \cdot \text{GHz}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。从表 1 可以看出,1 m 长的金属波导可以用  $d = 150 \mu\text{m} (l = 0.42 \text{ m})$ 、 $d = 200 \mu\text{m} (l = 0.20 \text{ m})$  或者  $d = 300 \mu\text{m} (l = 0.38 \text{ m})$  的介质/金属结构波导补偿色散,均可实现 200 GHz 处的零色散特性。其中最佳选择为  $d = 200 \mu\text{m} (l = 0.20 \text{ m})$  的介质/金属波导,因为其附加损耗最低,为 2.92 dB。对于低频段,如在 120 GHz 频率处,金属波导色散值较大,可以用作色散补偿的波导,当介质层厚度在 300  $\mu\text{m}$  及以上时,附加损耗显著增加。

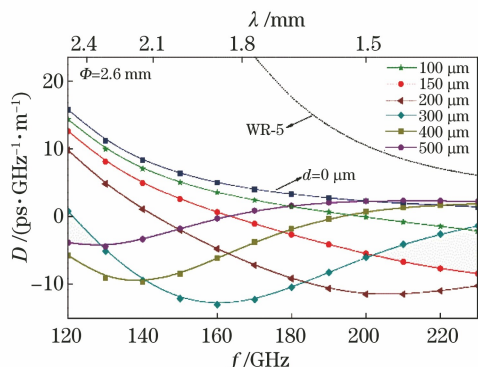


图 7 具有不同介质层厚度的波导基模色散谱  
Fig. 7 Dispersion spectra of fundamental mode for waveguides with different dielectric layer thicknesses

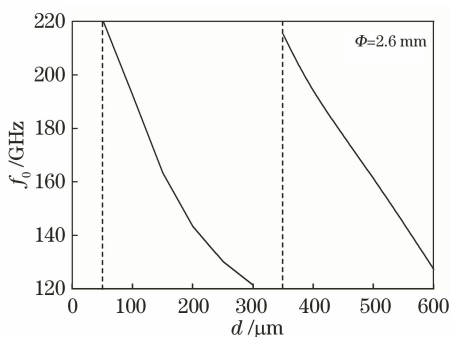


图 8 具有不同介质层厚度的波导基模零色散频率  
Fig. 8 Zero dispersion frequency of fundamental mode for waveguides with different dielectric layer thicknesses

表 1 长度为 1 m 的金属波导在各频点处选用的色散补偿波导特性

Table 1 Dispersion compensation waveguide characteristics for 1-m-long metal waveguide at different frequencies

Frequency $f / \text{GHz}$	Dielectric layer thickness $d / \mu\text{m}$	Attenuation $\alpha / (\text{dB} \cdot \text{m}^{-1})$	Dispersion $D / (\text{ps} \cdot \text{GHz}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Length $l / \text{m}$	Additional loss $L / \text{dB}$
220	150	14.2	-7.65	0.218	3.09
	200	26.1	-10.9	0.153	3.99
	300	41.6	-2.56	0.652	27.1
200	150	7.80	-5.46	0.420	3.27
	200	14.6	-11.4	0.200	2.92
	300	38.1	-5.99	0.383	14.6
150	200	6.90	-2.00	0.800	5.51
	300	15.7	-12.1	0.537	8.42
	400	24.3	-8.44	0.756	18.3
120	400	16.5	-5.76	2.74	45.1
	500	22.1	-3.86	4.08	89.9

通信传输系统在要求零色散频点的同时,也要求在一定的带宽上保持近似为零的低色散。图 9(a)给出一组金属波导和介质/金属波导的组合,在不同频段实现平坦低色散的方案。在如图 9 所示的方案中,将 G 波段划分为 4 个频率区间,组合内径均为 2.6 mm、介质层厚度不同的波导,在 4 段频率区间内可以分别实现近似零色散。从图 9(a)可以看出,金属波导在该波段的色散曲线斜率始终为负,可借助与斜率接近相反且色散曲线处于负值区间的介质/金属波导进行补偿。如  $d=400\ \mu\text{m}$  的介质/金属波导在低频端有较大的负色散,在 140~160 GHz 频段平均色散斜率为 0.16(同频段金属波导的平均色散斜率为  $-0.17$ ),每 1 m 金属波导使用长度为 0.79 m 的该结构波导进行补偿。补偿后的色散系数在该频段的绝对值均小于  $0.682\ \text{ps}\cdot\text{GHz}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。由于  $d=400\ \mu\text{m}$  的波导结构色散在高频段由负转正,在零点附近色散系数的绝对值变小,实现整体近零低色散需要补偿波导的长度是金属波导的数倍,会引入极大的衰减,难以应用在实际情况中。故改用  $d=350\ \mu\text{m}$  ( $l=0.51\ \text{m}$ ) 波导对应 160~180 GHz 频段,  $d=300\ \mu\text{m}$  ( $l=0.34\ \text{m}$ ) 波导对应 180~200 GHz 频段,  $d=$

$250\ \mu\text{m}$  ( $l=0.22\ \text{m}$ ) 波导对应 200~230 GHz 频段,均可以实现色散相对平坦且趋近于零的结果。

如果需要权衡色散和损耗两方面的性能,可以优先选择长度短附加损耗低的波导,同样可以得到一定的色散补偿效果。图 9(b)为依此原则调整后的补偿方案的结果。从图 9(b)可以看出,在 197~230 GHz 频段,  $d=200\ \mu\text{m}$  的波导色散绝对值最大且为负值。用较短的补偿波导即可实现色散补偿,从而减小损耗的代价。采用 0.15 m 长的该结构波导与金属波导组合,可以使色散系数的绝对值由最大  $2.38\ \text{ps}\cdot\text{GHz}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  降低至  $0.683\ \text{ps}\cdot\text{GHz}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ,附加损耗不超过 3.92 dB。由于介质/金属波导和金属波导的色散斜率均为负值,补偿后在该频段的色散整体下降,在零色散上下变化,没有实现平坦色散的特性。同理在 130~148 GHz、148~169 GHz、169~197 GHz 的频段上,分别采用  $d=350\ \mu\text{m}$  ( $l=1.00\ \text{m}$ )、 $d=300\ \mu\text{m}$  ( $l=0.40\ \text{m}$ )、 $d=250\ \mu\text{m}$  ( $l=0.25\ \text{m}$ ) 的补偿波导。对色散绝对值相对较大的负色散波导进行补偿,相比图 9(a)的方案,在能够容忍一定量色散的条件,有更低的附加损耗。

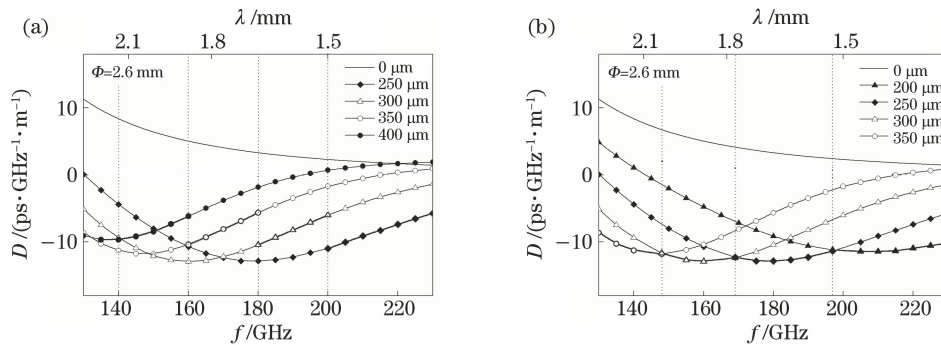


图 9 不同频段内补偿前后波导色散特性对比。(a)近零色散平坦方案;(b)低附加损耗方案

Fig. 9 Comparison of waveguide dispersion characteristics before and after compensation in different frequency bands. (a) Nearly-zero dispersion-flattened scheme; (b) low additional loss scheme

#### 4 结构优化参数

根据前述仿真结果,损耗和色散均随着频率的变化和波导结构的调整而发生变化。金属管内径一定,当介质层厚度增大时,损耗升高,色散会有所下降。主要原因是场分布发生了畸变,对能量的约束能力变差,模式能量逐渐从空气芯进入到介质层中传输。为了分析场畸变的规律,参照衰减系数的定义和色散系数的计算公式,引入表征空气芯能量占比的系数。单模色散是相位常数的二阶偏导,与频

率相关。故定义两个系数  $P_c$  和  $E_c$ ,分别为纤芯能量占金属管内总能量的比例关于介质层厚度和传输波长的偏微分,数学表达式为

$$P_c = \frac{\partial(P_{\text{Center}}/P_{\text{Metal}})}{\partial d}, \quad (2)$$

$$E_c = \frac{\partial(P_{\text{Center}}/P_{\text{Metal}})}{\partial \lambda}, \quad (3)$$

式中: $P_{\text{Center}}$  为空气芯中的能量; $P_{\text{Metal}}$  表示金属管中的能量总和,即空气芯和介质层中能量的和。图 10 和图 11 分别给出了金属管内径为 2.6 mm 时,色散系数  $D$  和基模损耗  $\alpha$  随介质层厚度变化的趋



势, 120~220 GHz 不同频率的能量集中系数  $P_c$  和  $E_c$  的拟合结果。

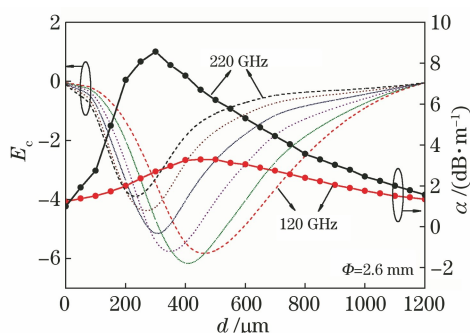


图 10 能量集中系数  $E_c$  和损耗  $\alpha$  随介质层厚变化趋势  
Fig. 10 Variation trend of energy concentration ratio  $E_c$  and loss  $\alpha$  with dielectric layer thicknesses

从图 10 可以看出:随着介质层厚度的增大,基模损耗逐渐增大且在达到峰值后下降,其中 120 GHz 频率的损耗在介质层厚度为 450  $\mu\text{m}$  附近达到峰值,220 GHz 则在 300  $\mu\text{m}$  处达到峰值;而 120~220 GHz 范围内  $E_c$  随介质层厚度变化的变化曲线趋势与损耗正好相反,且频率越高, $E_c$  达到谷值处的介质层厚度越小。

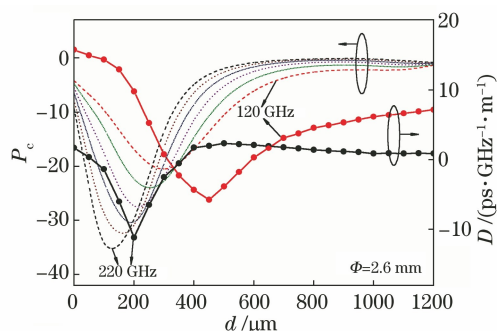


图 11 能量集中系数  $P_c$  和色散系数  $D$  随介质层厚变化趋势

Fig. 11 Variation trend of power concentration ratio  $P_c$  and dispersion coefficient  $D$  with dielectric layer thicknesses

从图 11 可以看出,色散随着介质层厚度的增大呈现出与损耗几乎相反的趋势。对于 120 GHz 和 220 GHz 的传输,随着介质层厚的增大,色散先减小,由正值变为负值,达到谷值后增大。其中 120 GHz 时色散在介质层厚为 450  $\mu\text{m}$  附近达到谷值,220 GHz 时则在介质层厚为 200  $\mu\text{m}$  附近达到谷值,由图 10 可知,该结构的损耗相比金属波导有所上升,但尚未达到峰值;而系数  $P_c$  随介质层厚度变化的趋势与色散相近,同样是频率越高, $P_c$  达到谷值处的介质层厚度越小。可见系数  $E_c$  与损耗、系数  $P_c$  与色散存在较强的关联。

因此在特定频率处对介质/金属波导结构进行优化时,需综合考虑损耗和色散的影响,可以通过考查系数  $P_c$  和  $E_c$  的方式进行估计。例如,在损耗容忍度较高的系统中,设计的色散补偿波导可以增大介质层厚度,使  $P_c$  数值更小而  $E_c$  尚未达到谷值;在色散容忍度高的系统中,在起到补偿效果的同时可以尽量选用介质层厚度小的波导结构,使  $E_c$  远离谷值。

## 5 结 论

采用 COMSOL 软件对圆波导在 G 波段的损耗和色散特性进行了仿真研究。介质层导致模场的畸变,使损耗增加。模式与高斯分布光源的耦合效率可以评价模式场分布的畸变程度。介质层在该频段不能降低波导的传输损耗,但可以改变波导的色散特性。通过控制介质层的厚度,可以获得具有无色散特性的波导,可以用介质/金属波导实现对金属波导在不同频段的色散补偿。通过匹配金属波导内径、介质层厚度不同的介质/金属波导,实现在 G 波段内的平坦色散特性,扩大传输波导带宽。根据损耗和色散特性与介质层厚的关系,定义了两个能量集中系数  $P_c$  和  $E_c$ ,可以预测损耗和色散特性的变化,从而平衡传输波导整体的损耗和色散特性,为波导的选型提供理论参考。

## 参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Xie S, Li H R, Li L X, et al. Survey of terahertz communication technology [J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.  
谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述 [J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186.
- [3] Zhao M M, Yu J J. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 931-937.  
赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 931-937.
- [4] Li S, Dai Z J, Gao X, et al. Low-loss terahertz waveguide and its imaging application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 68-73.  
李帅, 戴子杰, 高翔, 等. 低损耗太赫兹波导及其成像应用[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(1): 68-73.
- [5] Liang M Y, Ren Z Y, Zhang C L. Progress of

- terahertz space exploration technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 180004.  
梁美彦, 任竹云, 张存林. 太赫兹空间探测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 180004.
- [6] Wang X, Wang J L. Terahertz metamaterial absorber sensor based on three-dimensional split-ring resonator array and microfluidic channel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1904001.  
王鑫, 王俊林. 基于三维开口谐振环阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1904001.
- [7] Wang Y W, Dong Z W, Li H Y, et al. Atmospheric attenuation characteristics of terahertz pulse propagation [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(2): 208-214.  
王玉文, 董志伟, 李瀚宇, 等. 太赫兹脉冲大气传输衰减特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(2): 208-214.
- [8] Hassani A, Dupuis A, Skorobogatiy M. Low loss porous terahertz fibers containing multiple subwavelength holes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7): 071101.
- [9] Hongo A, Morosawa K, Matsumoto K, et al. Transmission of kilowatt-class CO(2) laser light through dielectric-coated metallic hollow waveguides for material processing[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(24): 5114-5120.
- [10] Unger H G. Circular electric wave transmission in a dielectric-coated waveguide [J]. *Bell System Technical Journal*, 1957, 36(5): 1253-1278.
- [11] Sui K R, Tang X L, Zhu X S, et al. Infrared Ag/AgI hollow waveguides with high performance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2186-2190.  
隋可融, 汤晓黎, 朱晓松, 等. 高性能 Ag/AgI 红外空芯光纤的研究 [J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2186-2190.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhang X W, Tan Z Y, Chen K W, et al. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic waveguides in G band and 4.3 THz [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(2): 215-222.  
张学文, 谭智勇, 陈可旺, 等. 介质金属膜波导在 G 波段和 4.3 THz 的传输特性 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(2): 215-222.
- [15] Han H, Park H, Cho M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(15): 2634-2636.
- [16] Yakasai I K, Abas P E, Ali S, et al. Modelling and simulation of a porous core photonic crystal fibre for terahertz wave propagation[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(4): 1-16.
- [17] Mei S, Kong D P, Wang L L, et al. Suspended graded-index porous core POF for ultra-flat near-zero dispersion terahertz transmission [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101946.
- [18] Wadsworth W J, Knight J C, Ortigosa-Blanch A, et al. Soliton effects in photonic crystal fibres at 850 nm [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(1): 53-55.
- [19] Lai C H, Hsueh Y C, Chen H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3457-3459.
- [20] Xu J, Su J T, Liu L J, et al. Sub-terahertz measurement of dielectric properties using coplanar waveguide [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614037.  
许吉, 苏江涛, 刘来君, 等. 亚太赫兹频段介电性能的共面波导测量 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614037.
- [21] Wu D M, Teng D, Cao Q, et al. Cos-Gaussian beams propagating inside terahertz parallel-plate waveguides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 192302.  
吴登明, 滕达, 曹清, 等. 余弦-高斯光束在太赫兹平行平板波导中的传输研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 192302.
- [22] 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.
- [23] Sengupta A, Bandyopadhyay A, Bowden B F, et al. Characterisation of olefin copolymers using terahertz spectroscopy [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(25): 1477-1479.
- [24] Harrington J A. *Infrared fibers and their applications* [M]. Washington, D.C.: SPIE, 2004: 159-163.
- [25] Yu S Y, Zhu X S, Shi Y W. Transmission characteristics of dielectric-coated metallic hollow waveguide at W-band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0306001.  
俞舒元, 朱晓松, 石艺尉. W 波段介质金属膜空芯波导的传输特性 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0306001.
- [26] Sun B S, Tang X L, Zeng X, et al. Characterization of cylindrical terahertz metallic hollow waveguide with multiple dielectric layers [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7276-7285.