

介质金属膜椭圆太赫兹空芯光纤的传输特性研究

余主正^{1,2} 汤晓黎² 王欣然² 石艺尉²

(¹ 上海工程技术大学高等职业技术学院, 上海 201620)
(² 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要 在金属空芯光纤(MHF)内加介质膜是降低光纤传输损耗的有效方法。采用有限元法研究了介质膜对椭圆MHF在太赫兹波段传输特性的影响。分析结果表明,介质膜的干涉效应使得光纤传输特性随频率变化具有周期性。介质膜能够改变光纤传输模式,增加截止波长和单模传输带宽,提高光纤和光源的耦合效率并降低传输损耗。然而介质膜在低损耗窗口减小了模式双折射。分析结果为光纤结构选择、设计和制作提供了重要参考。

关键词 光纤光学;太赫兹空芯光纤;介质膜;传输特性;椭圆光纤

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0906009

Transmission Characteristics of Elliptical Terahertz Hollow Fiber with Dielectric and Metallic Inner Coatings

Yu Zhuzheng^{1,2} Tang Xiaoli² Wang Xinran² Shi Yiwei²

(¹ Advance Vocational Technical College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)
(² School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Adding dielectric coatings inside the metallic hollow fibers (MHF) is an effective way to reduce the transmission loss. Effects of dielectric coatings on the transmission characteristics of elliptical MHF in the terahertz region are numerically investigated by using finite element method. The dielectric coating changes the transmission modes in the elliptical MHF. Transmission characteristics of the elliptical hollow fiber vary periodically with the frequency owing to the interference effect of the dielectric coating. With the dielectric coating, the elliptical hollow fiber has a longer cutoff wavelength, broader single-mode bandwidth, higher coupling efficiency to the incoming light, and smaller transmission loss. However, it reduces the modal birefringence in the low-loss transmission windows. The results provide an important reference for the fiber design, structure optimization, and fabrication techniques.

Key words fiber optics; terahertz hollow fiber; dielectric coating; transmission characteristics; elliptical fiber

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2420

1 引 言

太赫兹辐射通常是指频率为 0.1~10 THz 的电磁辐射,位于电磁波谱中微波与红外波段之间^[1-2]。随着太赫兹科学技术的迅猛发展,太赫兹传输光纤的研究受到日益广泛的关注。由于在太赫兹波段尚缺乏低吸收材料,所以提高太赫兹波在空气中的传输比例是降低传输损耗的有效途径之一。一种方法是采用直径小于波长的亚波长光纤,如亚

波长金属丝^[3]和塑料纤维^[4]。由于光纤直径小于传输波长,因此太赫兹波主要在亚波长光纤周围的空气中传输,光纤具有较低的传输损耗。然而,亚波长光纤对太赫兹波的束缚能力弱,传输特性容易受到外界环境的干扰。另外,光纤的弯曲损耗大,和光源的耦合效率较低。另一种方法是增加纤芯的空气比例,如多孔光纤^[5]、光子带隙光纤^[6]、布拉格光纤^[7]、金属空芯光纤(MHF)^[8-9]、介质/金属空芯光纤

收稿日期: 2013-03-27; 收到修改稿日期: 2013-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61201062)

作者简介: 余主正(1979—),男,硕士研究生,讲师,主要从事空芯光纤方面的研究。E-mail: yuzhuzheng@163.com

导师简介: 石艺尉(1963—),男,博士,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)

(DMHF)^[10]等。MHF在太赫兹波段的传输特性是太赫兹光纤的研究热点之一。McGowan等^[11]实验研究了太赫兹波在金属管中的传输,金属的高折射率将大部分能量限制在空气纤芯中传输。然而由于金属管均匀性较差,且内壁粗糙度大,光纤损耗很高。研究发现通过在毛细管内壁镀金属膜制备MHF,可以显著改善其传输性能。当金属膜厚度远远大于趋肤深度,MHF的传输机理和金属波导相同,然而由于金属膜表面粗糙度小,MHF的损耗远远小于金属波导损耗。另外,采用柔韧性好的树脂基管,光纤可以获得很好的柔韧性,有利于系统的小型化和灵活性。实验研究表明内径为3 mm的镀铜空芯光纤在波长158.31 μm处损耗为3.9 dB/m^[8];内径为1 mm的镀银空芯光纤在190~250 μm波段损耗为7.5~8.0 dB/m^[9]。在MHF内壁镀介质膜是提高光纤传输性能的有效方法。厚度合理的介质膜能增加光纤内表面的反射率,从而降低传输损耗。Bowden等^[10]利用液相镀膜法,在内径为2.2 mm的银空芯光纤内壁镀8.2 μm的聚苯乙烯(PS)薄膜获得DMHF,实验测得在波长119 μm(2.5 THz)处光纤的损耗为0.95 dB/m,而相同内径银空芯光纤在该波长处的实测损耗大于3 dB/m。

自从1938年Chu^[12]首次对椭圆金属光纤进行研究以来,国内外学者对椭圆光纤进行了大量的研究^[13-14]。椭圆光纤在卫星通讯、雷达馈线、电子加速器、微波加热器的研究中具有广泛应用。椭圆光纤在太赫兹波段的应用也受到学者们的关注。Chen等^[15-16]分别利用有限元法研究了椭圆介质空芯光纤在太赫兹波段的传输特性。由于大部分能量在空气纤芯以及光纤外层的空气中传输,因此和实芯光纤相比,该光纤由于材料吸收引起的损耗大大降低。理论计算表明该结构光纤的吸收损耗在1.25 THz处为10¹ dB/m数量级,模式双折射最高

可达10⁻²数量级。通过在椭圆聚碳酸酯(PC)基管内壁镀银膜的方法制备了长轴半径为2.42 mm,短轴半径为1.18 mm的椭圆MHF,实验测得该光纤在0.65 THz处的损耗为0.79 dB/m^[17]。文献[18]理论分析了椭圆DMHF在太赫兹波段的高双折射特性和损耗特性,并从降低损耗和提高双折射的角度研究了光纤的参数优化设计。介质膜对椭圆空芯光纤的传输特性有着十分重要的影响。本文从传输模式、截止波长、耦合效率、传输损耗、双折射等方面,详尽分析了介质膜对椭圆MHF在太赫兹波段传输特性的影响。

2 模式特性

椭圆光纤截面结构如图1所示,其中图1(a)为MHF,图1(b)为DMHF。采用直角坐标,用 $a(a_1)$ 表示椭圆截面长轴内半径, $b(b_1)$ 表示短轴内半径, s 为金属膜厚度, d 为介质膜厚度。DMHF中记 $a_2 = a_1 + d, b_2 = b_1 + d$ 。用 a/b 和 a_2/b_2 分别表示MHF和DMHF的椭圆度。为了获得较低传输损耗,介质膜厚度 d 根据(1)式进行优化^[19]:

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

式中 d_{opt} 为传输损耗最小值对应的介质膜厚, λ 为真空中的传输波长, n_d 为介质折射率实部。分析中,介质材料复折射率取 $1.5 - i0.00048$,其实部为介质材料在太赫兹波段的典型折射率,虚部为介质材料的吸收,相当于高密度聚乙烯(HDPE)在1 THz处0.2 cm⁻¹的吸收系数^[20],在本文所分析的光纤参数中,损耗和吸收相关,其他参数均与吸收无关;不考虑空气对太赫兹波的吸收;金属膜为银(Ag),其折射率引用文献[21]中的Drude模型。 s 取为1 μm,该厚度可以由实验制作获得,并且远大于银

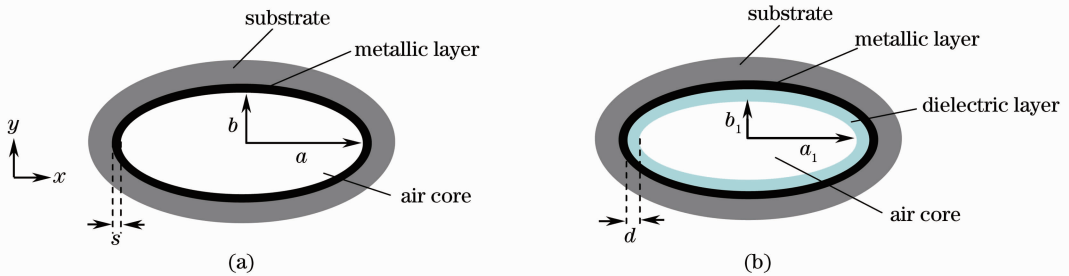


图1 椭圆空芯光纤截面图。(a) MHF; (b) DMHF

Fig. 1 Cross section of elliptical hollow fibers. (a) MHF; (b) DMHF

在太赫兹波段的趋肤深度。采用有限元数值分析软件 COMSOL Multiphysics 中的射频 (RF) 模块获得光纤的模场分布和复模式有效折射率 n_{eff} , $n_{\text{eff}} = n_{\text{re}} - in_{\text{im}}$, 衰减常数由有效折射率虚部获得: $\alpha = n_{\text{im}} \cdot k_0$, 单位为 m^{-1} , 其中 k_0 为真空中波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, 传输损耗为: $f_{\text{loss}} = 20(\lg e) \cdot \alpha = 8.686\alpha$, 单位为 dB/m , 其中 e 为自然对数的底数。

介质膜的加入引起金属膜表面阻抗的改变, 从而使得空芯光纤的传输模式发生变化。图 2 为两种椭圆空芯光纤的前 5 个模式的模场分布图。用颜色代表 z 方向平均功率大小, 箭头表示横向电场方向。作为比较, MHF 结构参数为: $a = 839 \mu\text{m}$, $b = 439 \mu\text{m}$; DMHF 结构参数为: $a_1 = 800 \mu\text{m}$, $b_1 = 400 \mu\text{m}$, $d = 39 \mu\text{m}$ 。在椭圆光纤中, 模式的两个偏振态解简并, 用角标 c 代表偶模, s 代表奇模。图 2(a) 为椭圆 MHF 在频率 $f = 1.8 \text{ THz}$ 处的模场, 图 2(b) 和图 2(c) 为椭圆 DMHF 在 $f = 1.8 \text{ THz}$ 和 $f = 3 \text{ THz}$ 处的模场。椭圆 MHF 在远离截止波长波段, 模场特性随波长变化不明显。而在椭圆 DMHF 中, 由于介质膜的干涉效应, 模场特性随波长呈现周期性变化。可将介质膜看成法布里-珀罗干涉仪, 当入射波频率满足介质膜的共振条件时, 介质膜处于透射率的峰

值, 较多能量分布在介质膜中, 如图 2(b) 所示, 此时光纤的传输损耗大; 当入射波频率满足介质膜的反共振条件时, 介质膜处于反射率的峰值, 绝大部分能量在空气纤芯中传输, 如图 2(c) 所示, 光纤的传输损耗小。这也是学者们称这类传输原理为“反共振反射”的原因。根据空芯光纤理论^[19], 在介质膜的共振频率附近[图 2(b)], 由于光纤的表面阻抗绝对值 (10^3 数量级) 远大于空气阻抗, DMHF 主要支持 TE 模和 TM 模传输; 而在介质膜的反共振频率附近[图 2(c)], 表面阻抗绝对值 (10^0 数量级) 远小于空气阻抗, DMHF 主要支持 HE 模和 EH 模传输。为了获得低损耗, 制作中对介质膜厚进行优化, 使其在目标波长处于反共振, 光纤主要支持 HE 模和 EH 模传输。比较 MHF 中[图 2(a)]和 DMHF 中[图 2(c)]对应的模式, 后者能量更加集中在空气纤芯中, 减少了在金属膜中能量的分布, 因此比前者具有更低的传输损耗。在 DMHF 中, 由于部分能量分布在介质中, 而且由(1)式可见介质膜厚和波长成正比, 因此在太赫兹波段, 介质材料的吸收对光纤损耗的影响不可忽略。两种光纤中传输模式的对应关系^[22]及奇偶模的偏振方向由表 1 给出。

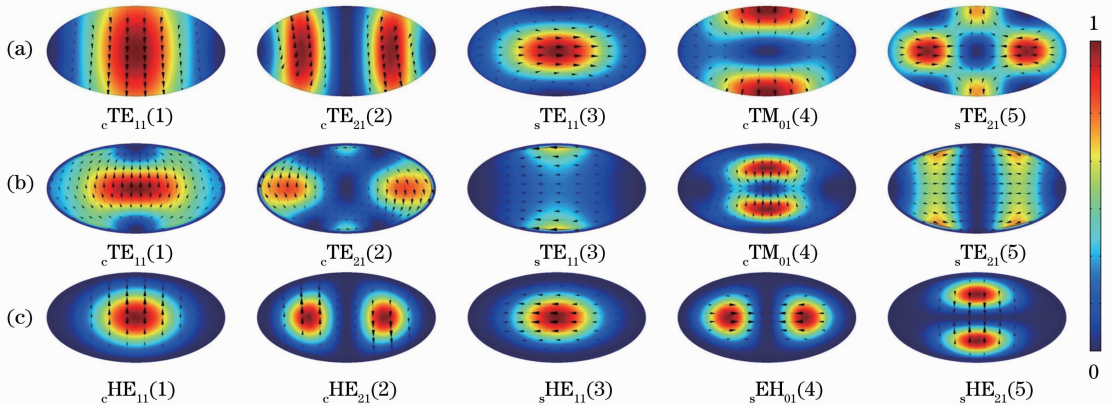


图 2 椭圆空芯光纤中前 5 个模式的模式图。(a)椭圆 MHF($f = 1.8 \text{ THz}$); (b)椭圆 DMHF($f = 1.8 \text{ THz}$); (c)椭圆 DMHF($f = 3 \text{ THz}$)

Fig. 2 Mode distributions for the first five modes in elliptical hollow fibers. (a) Elliptical MHF ($f = 1.8 \text{ THz}$); (b) elliptical DMHF ($f = 1.8 \text{ THz}$); (c) elliptical DMHF ($f = 3 \text{ THz}$)

表 1 两种椭圆光纤中模式对应关系及偏振方向

Table 1 Mode correspondence and polarization of elliptical fibers

MHF	DMHF	Polarization
$c \text{TE}_{nm}$	$c \text{HE}_{nm}, m \geq 0$	$c \text{TE}_{11}\text{-Y}$
$s \text{TE}_{nm}$	$s \text{HE}_{nm}, m \geq 1$	$s \text{TE}_{11}\text{-X}$
$s \text{TM}_{nm}$	$c \text{EH}_{nm}, m \geq 1$	$c \text{HE}_{11}\text{-Y}$
$c \text{TM}_{nm}$	$s \text{EH}_{nm}, m \geq 0$	$s \text{HE}_{11}\text{-X}$

图 3 给出了两种空芯光纤低阶模式的模式有效折射率实部 $n_{\text{re}} = \beta/k_0$ (β 为传播常数) 和归一化传输波长 λ/a (λ/a_2) 的关系。由图可见, 随着传输波长的增加, 模式的传播常数减小。在截止波长附近, 传播常数迅速降低, 并接近 0。

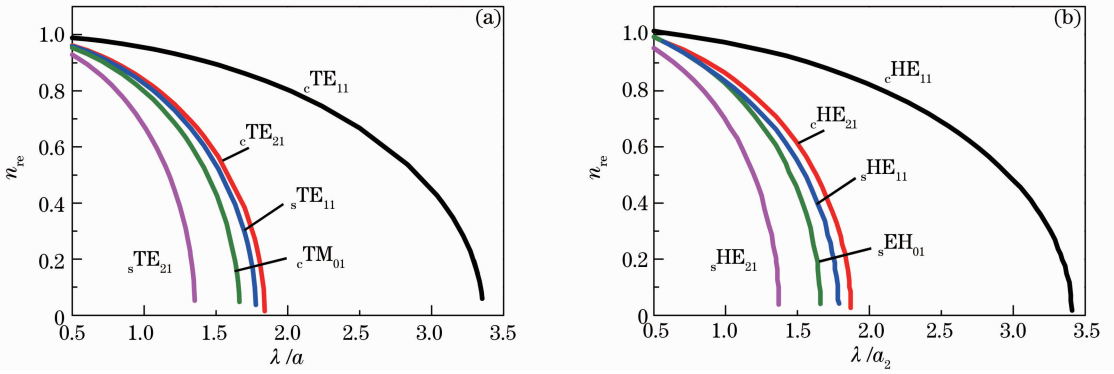


图 3 前 5 个低阶模式有效折射率实部和归一化波长的关系。(a) MHF; (b) DMHF

Fig. 3 Mode effective refractive indices real parts for the first five modes as a function of the normalized wavelength. (a) MHF; (b) DMHF

椭圆光纤中的截止波长和椭圆度相关。图 4 为椭圆 DMHF 中归一化截止波长 (λ_c/a_2) 和椭圆度 (a_2/b_2) 的关系。由图可见, 模式 cHE_{m1} 的归一化截止波长随椭圆度变化不明显, 而其他模式的归一化截止波长随椭圆度的增加而减小。这一现象和椭圆 MHF 中类似^[17]。图 4 中阴影部分表示单模传输范围, 在 $a_2/b_2 < 2$ 区域, 单模传输带宽随着椭圆度的增加而增加; 在 $a_2/b_2 \geq 2$ 区域, 单模传输带宽基本保持恒定。由图 4 还可以得到, 对于椭圆度不同的光纤, 传输模式的顺序不同。分析表明, 介质膜参数对截止波长具有影响。通常, 介质膜厚度越大、介质折射率越大, 光纤的截止波长越长。

将 4 种光纤的截止波长和单模传输带宽进行比较, 圆金属光纤 (Circular_MHF)、圆介质/金属光纤 (Circular_DMHF)、椭圆金属光纤 (Elliptical_MHF)、椭圆介质/金属光纤 (Elliptical_DMHF), 如表 2 所示。对于椭圆光纤, 考虑椭圆度等于 2。表 2

表 2 4 种光纤截止波长和单模传输带宽比较

Table 2 Comparison of cutoff wavelength and single-mode bandwidth in four kinds of fibers

Type	Dominant mode	λ_c	First higher order mode	λ'_c	Single-mode bandwidth
Circular_MHF	TE ₁₁	3.41a	TM ₀₁	2.61a	0.80a
Circular_DMHF	HE ₁₁	3.43a	EH ₀₁	2.61a	0.82a
Elliptical_MHF	cTE_{11}	3.35a	cTE_{21}	1.84a	1.51a
Elliptical_DMHF	cHE_{11}	3.41a ₂	cHE_{21}	1.88a ₂	1.53a ₂

3 耦合效率和损耗

光纤和光源的耦合效率对整个系统具有非常重要的影响。不同的传输模式和光源具有不同的耦合效率。根据耦合理论, 光源和光纤中某个模式的耦合效率可表示为

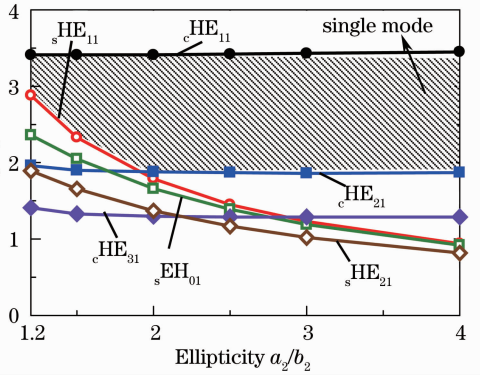


图 4 椭圆 DMHF 中归一化截止波长和椭圆度的关系
Fig. 4 Normalized cutoff wavelength of elliptical DMHF as a function of ellipticity

表明, 介质膜使得空芯光纤的截止波长增大, 单模传输带宽增加。圆光纤的截止波长比椭圆光纤略大, 然而椭圆光纤具有更大的单模传输带宽。4 种光纤中椭圆 DMHF 可以获得最大的单模传输带宽。

$$\eta_m = \frac{\left| \int_S \mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{z} dS \right|^2}{\int_S \mathbf{E}_m \times \mathbf{H}_m \cdot \mathbf{z} dS \int_{S_{in}} \mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{z} dS}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{E}_i 、 \mathbf{H}_i 分别表示入射波的电场强度和磁场强

度, E_m 、 H_m 分别表示所考虑模式的电场强度和磁场强度, S 表示积分区域为光纤截面的空气纤芯部分, S_∞ 表示积分区域为光纤截面所在的无限平面。本文考虑线偏振高斯光源和空芯光纤的耦合效率。

在椭圆 MHF 和椭圆 DMHF 中, 和光源耦合效率最高的模式分别为 TE_{11} 模式和 HE_{11} 模式^[17-18]。根据(2)式, 图 5 给出了 HE_{11} 模式和 TE_{11} 模式的最大耦合效率和椭圆度的关系。对于 x 偏振模式, 考虑 x 线偏振光源; y 偏振模式考虑 y 偏振光源。对于椭圆度一定的光纤, 耦合效率随束腰半径(w)和光纤截面尺寸的比例变化而变化, 如图 5 的插图所示。插图表明椭圆度为 2 的 DMHF 中, sHE_{11} 模的耦合效率在 $w/a_2 = 0.65$ 时取得最大值 0.91。值得注意的是, 图 5 中每个椭圆度均取耦合效率的最大值, 因此不同椭圆度采用的 w/a_2 的值不相同。由 sHE_{11} 模和 cTE_{11} 模曲线可见, 当椭圆度较小时 ($a/b < 1.5$), 椭圆光纤的耦合效率和圆光纤的耦合效率接近甚至大于圆光纤; 当椭圆度较大时, 耦合效率随椭圆度增加而降低。DMHF 中 x 偏振具有较高的耦合效率, 而 MHF 中 y 偏振具有较高的耦合

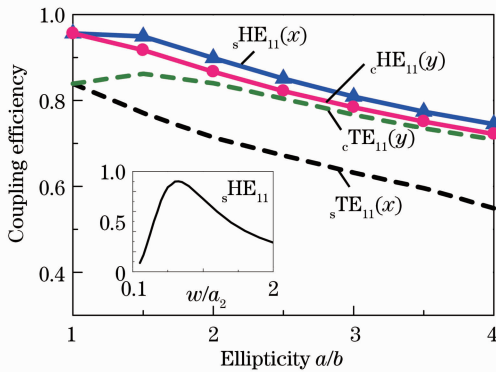


图 5 椭圆空芯光纤最大耦合效率和椭圆度的关系

Fig. 5 Maximum coupling efficiency in elliptical hollow fiber as a function of the ellipticity

效率。介质膜的加入提高了光纤的耦合效率。MHF 中 cTE_{11} 模的最大耦合效率为 0.862, 对应 0.65 dB 耦合损耗, DMHF 中 sHE_{11} 的最大耦合效率为 0.956, 对应耦合损耗为 0.2 dB。

图 6 给出了椭圆空芯光纤中耦合效率较高的几种模式的理论损耗谱。计算中 MHF 结构参数为: $a = 839 \mu m, b = 439 \mu m$; DMHF 结构参数为: $a_1 = 800 \mu m, b_1 = 400 \mu m, d = 39 \mu m$ 。由于介质膜的干涉效应, 椭圆 DMHF 中 x 偏振和 y 偏振的损耗谱具有周期性。两个偏振均在 1.8 THz 和 3.6 THz 处呈现损耗的峰值。干涉峰的位置可以用来估计光纤的传输窗口, 干涉峰主要和介质膜的折射率和厚度有关。相比椭圆 DMHF, 椭圆 MHF 具有较为平坦的损耗谱。因此对于传输宽谱的太赫兹光源, MHF 更为合适。而在单个频率处, DMHF 通过膜厚优化, 可以获得更低传输损耗。两种光纤中, x 偏振的损耗均低于 y 偏振损耗。表 3 比较了图 6 所考虑的光纤中 4 种模式最低传输损耗和耦合损耗。比较这 4 种模式, sHE_{11} 模式同时具有最低传输损耗和耦合损耗。这表明, 当考虑介质材料吸收时, 介质膜仍能有效降低损耗。

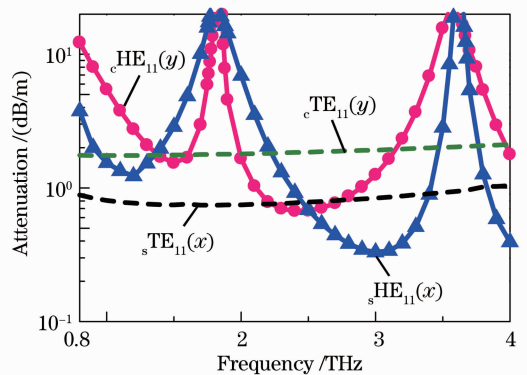


图 6 4 种模式理论传输损耗谱

Fig. 6 Theoretical transmission loss spectra of the four modes

表 3 4 种模式损耗比较

Table 3 Loss comparison of the four modes

Mode	Transmission loss / (dB/m)	Coupling loss / dB	Total loss / dB (Length is 1 m)
sHE_{11}	0.30	0.46	0.76
cHE_{11}	0.67	0.62	1.29
sTE_{11}	0.77	1.46	2.23
cTE_{11}	1.84	0.76	2.6

4 模式双折射

椭圆光纤中模式的两个偏振态具有不同的传输

常数, 光纤具有高双折射。当线偏振光平行入射到光纤的主轴, 线偏振态在传输中保持不变。模式双

折射被定义为两个偏振模式的有效折射率实部之差,即 $B = |n_{re}^x - n_{re}^y|$,它是衡量光纤保偏性能的一个重要指标。模式双折射越高,光纤保偏性能越好。图 7 比较了两种椭圆空芯光纤的模式双折射。图中阴影部分对应图 6 中 HE_{11} 损耗小于 2 dB/m 的区域。随着频率的增加,两种光纤的双折射都具有减小的趋势。在介质膜共振频率附近,椭圆 DMHF 的双折射呈现峰值,保偏性能高,然而传输损耗也很大。椭圆 MHF 在很大频率范围内获得 10^{-3} 数量级以上的高双折射。比较两种光纤,介质膜使得光纤在低损耗窗口模式双折射减小。

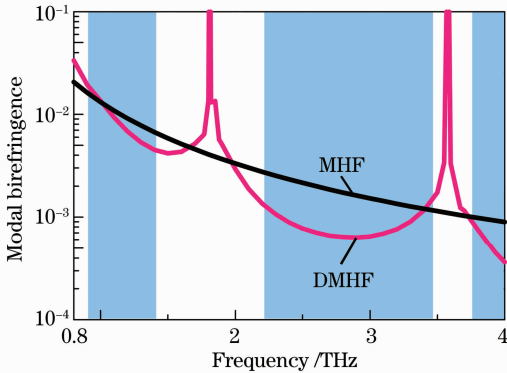


图 7 椭圆空芯光纤模式双折射和频率的关系

Fig. 7 Modal birefringence of elliptical hollow fibers as a function of frequency

5 结 论

通过分析椭圆 MHF 和椭圆 DMHF 两种光纤在太赫兹波段的传输特性,研究了介质膜对椭圆空芯光纤传输特性的影响。椭圆 MHF 在太赫兹波段主要支持 TE 模和 TM 模的传输;当介质膜厚根据目标波长优化后,椭圆 DMHF 主要支持 HE 模和 EH 模的传输。由于介质膜的干涉效应,椭圆 DMHF 传输特性随频率变化具有周期性。介质膜的引入使得光纤具有更大截止波长和更宽单模传输带宽。仿真计算结果表明,截止波长和椭圆度相关,不同椭圆度光纤中模式顺序不同。耦合效率和损耗研究表明,椭圆 MHF 中 TE_{11} 模可获得最低耦合损耗,而 TE_{11} 模的总损耗(包括耦合损耗和传输损耗)最低;椭圆 DMHF 中 HE_{11} 模同时具有最低传输损耗和最低耦合损耗。介质膜提高了光纤和光源的耦合效率并且降低了传输损耗。然而在低损耗传输窗口,介质膜降低了光纤的模式双折射。

参 考 文 献

1 Kang Shengwu, Wang Jiping, Liu Kan, *et al.*. Analysis of the

spectral characters of terahertz-wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0612001.

康胜武,汪继平,刘侃,等.太赫兹波光谱特性分析[J].*光学学报*, 2012, 32(6): 0612001.

2 Wang Linghui, Wang Yingxin, Liu Yuanyuan, *et al.*. Establishment and the usage of terahertz spectral database [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0815002.

王凌辉,王迎新,刘圆圆,等.太赫兹光谱数据库的建立和使用[J].*中国激光*, 2012, 39(8): 0815002.

3 K L Wang, D M Mittleman. Metal wires for terahertz wave guiding [J]. *Nature*, 2004, 432: 376-379.

4 L J Chen, H W Chen, T F Kao, *et al.*. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(3): 308-310.

5 A Hassani, A Dupuis, M Skorobogatiy. Porous polymer fibers for low-loss terahertz guiding [J]. *Opt Express*, 2008, 16(9): 6340-6351.

6 Bai Jinjun, Wang Changhui, Huo Bingzhong, *et al.*. A broadband low loss and high birefringence terahertz photonic bandgap photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9): 098702.

白晋军,王昌辉,霍丙忠,等.低损宽频高双折射太赫兹光子带隙光纤[J].*物理学报*, 2011, 60(9): 098702.

7 A Dupuis, K Stoeffler, B Ung, *et al.*. Transmission measurements of hollow-core THz Bragg fibers [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(4): 896-907.

8 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.

9 T Ito, Y Matsuura, M Miyagi, *et al.*. Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses [J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(5): 1230-1235.

10 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.

11 R W McGowan, G Gallot, D Grischkowsky. Propagation of ultra wide band short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(20): 1431-1433.

12 L J Chu. Electromagnetic waves in elliptical hollow pipes of metal [J]. *J Appl Phys*, 1938, 9(9): 583-591.

13 G P Zouros, J A Roumeliotis. Exact and closed-form cutoff wavenumbers of elliptical dielectric waveguides [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(9): 2741-2751.

14 Wang Yeheng, Zhang Xiang. Elliptical Fourier series expansion method and cutoff frequencies of elliptical optical waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(2): 204-213.

汪业衡,张翔.椭圆傅里叶级数展开法和椭圆光波导的截止频率[J].*光学学报*, 2000, 20(2): 204-213.

15 D Chen. Mode property of terahertz polymer tube [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(18): 2708-2713.

16 J L Wang, J Q Yao, H M Chen, *et al.*. A simple birefringent terahertz waveguide based on polymer elliptical tube [J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(1): 014207.

17 X L Tang, Y Jiang, B S Sun, *et al.*. Elliptical hollow fiber with inner silver coating for linearly polarized terahertz transmission [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(4): 331-334.

18 X L Tang, B S Sun, Y W Shi. Design and optimization of low-loss high-birefringence hollow fiber at terahertz frequency [J]. *Opt Express*, 2011, 19(25): 24967-24979.

19 M Miyagi, S Kawakami. Design theory of dielectric coated circular metallic waveguides for infrared Transmission [J]. *J Lightwave Technol*, 1984, LT-2(2): 116-126.

20 H Han, H Park, M Cho, *et al.*. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(15): 2634–2636.

21 M A Ordal, L L Long, R J Bell, *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]. Appl Opt, 1983, 22(7): 1099–1119.

22 S R Rengarajan, J E Lewis. Dielectric loaded elliptical waveguides [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980, 28(10): 1085–1089.

栏目编辑：王晓球