

文章编号: 0253-2239(2009)10-2681-05

吸收介质膜 / 金属空芯光纤的太赫兹波传输特性

汤晓黎 石艺尉

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要 介质/金属结构空芯光纤是一种有发展前景的太赫兹波传输媒质。介质膜在有效增加内面反射率从而降低传输损耗的同时,其材料吸收会引起附加损耗。讨论了介质材料吸收对太赫兹空芯光纤结构参数的影响。计算结果表明,相比于无吸收的理想介质,吸收介质的最优膜厚变小,最优折射率变大。综合考虑了光纤内直径、介质膜折射率和传输波长等因素,分析了介质膜的材料吸收容限。分析结果表明,吸收容限随光纤内直径减小或传输波长增大而减小。当光纤内直径很小或传输波长很大时,吸收容限可能不存在。分析结果对介质/金属太赫兹空芯光纤的设计和材料选择具有重要参考价值。

关键词 光波导; 太赫兹空芯光纤; 介质材料吸收; 吸收容限

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2681

Characterization of Terahertz Hollow Fiber with an Absorptive Inner-Coating Dielectric Layer

Tang Xiaoli Shi Yiwei

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

Abstract Dielectric-coated metallic hollow fiber is one of the promising media for THz transmission. The dielectric layer enhances the reflection rate and hence lowers the transmission loss, whereas it brings additional loss due to its material absorption. The influence of dielectric absorption on the structure parameters of the hollow fiber is theoretically discussed. Calculation results show that the optimum refractive index of an absorptive dielectric layer is greater than that of a perfect transparent dielectric layer. The optimum thickness of the dielectric layer to minimize the loss of HE_{11} mode becomes smaller due to the absorption. The absorption tolerance is also investigated when considering such factors as inner diameter, refractive index, and transmission wavelength. It is shown that absorption tolerance decreases when the inner diameter becomes smaller or when the transmission wavelength becomes larger. In extreme cases of small inner-diameter or large transmission wavelength, the absorption tolerance is not existent. The calculation results are useful to the structure design and material selection in the fabrication of terahertz hollow fibers.

Key words optical waveguide; terahertz hollow fiber; dielectric material absorption; absorption tolerance

1 引 言

太赫兹(THz)辐射通常是指频率为 0.1 THz 到 10 THz 的电磁辐射,位于电磁波谱中微波与红外波段之间。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^[1,2]。THz 波导在 THz 辐射应用方面起着重要作用。目前,已提出多种类型的 THz 波导,如 THz 共面传输

线波导、塑料带状波导、金属管波导、蓝宝石光纤、金属波导、光子晶体波导和介质/金属空芯光纤等^[3~10]。介质/金属 THz 空芯光纤是通过在基管内面镀金属膜和介质膜得到的,该种光纤具有柔韧性好、结构简单、损耗低等优点。在金属膜内面镀介质膜,能增加内表面反射率,从而有效降低空芯光纤损耗^[11]。这种在中红外空芯光纤中的常用方法,其有

收稿日期: 2008-09-22; 收到修改稿日期: 2009-01-09

基金项目: 浦江人才计划(07PJ14012)和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

作者简介: 汤晓黎(1981—),女,博士研究生,主要从事太赫兹光波导的研究。E-mail: tangxiaoli@fudan.edu.cn

导师简介: 石艺尉(1963—),男,教授,博士生导师,从事光波导的研究。E-mail: ywshi@fudan.edu.cn (通信联系人)

效性为大量理论及实验结果所证实。内径 $700\ \mu\text{m}$ 、长 $1\ \text{m}$ 的 COP/Ag 空芯光纤^[12]在波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器处损耗约为 $0.4\ \text{dB}$ ，远远小于相同内径镀银空芯光纤 $3\sim 4\ \text{dB/m}$ 的损耗值。该方法在 THz 波段同样有效，在波长 $119\ \mu\text{m}$ ($2.5\ \text{THz}$) 处，实验测得内径 $2\ \text{mm}$ 、长度 $90\ \text{cm}$ 镀有聚苯乙烯和银膜的 (PS/Ag) 空芯光纤^[9] 的损耗为 $0.95\ \text{dB/m}$ 。

由于材料吸收，介质膜在增加内表面反射率的同时，也带来了附加损耗。介质膜越厚，引起的附加损耗越大。从红外波段到 THz 波段，介质膜厚从几百纳米变为数十微米，介质膜的吸收对 THz 空芯光纤的传输特性具有显著的影响。当附加损耗较大时，介质/金属空芯光纤的损耗反而大于相同内径的金属空芯光纤，这时镀介质膜就失去了意义。因此，介质膜材料的吸收特性对于 THz 空芯光纤的设计、制作以及材料选择具有重要意义。本文分析了介质材料吸收对 THz 空芯光纤结构参数的影响，并讨论了不同光纤内直径、介质膜折射率和传输波长时介质膜的吸收容限。

2 THz 空芯光纤传输模式

考虑两种 THz 空芯光纤：金属 THz 空芯光纤和介质/金属 THz 空芯光纤。其截面如图 1 所示。图 1 中 T 为空芯光纤内半径， d 为介质膜厚度。当 $d=0$ 时，图 1 对应金属 THz 空芯光纤；当 $d>0$ 时，图 1 对应介质/金属 THz 空芯光纤。

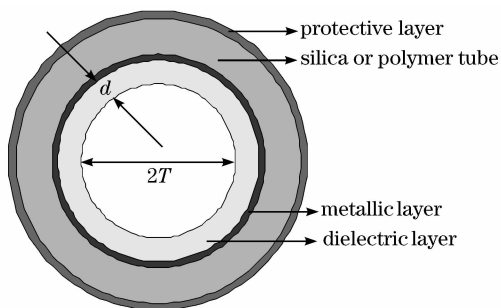


图 1 THz 空芯光纤截面图

Fig. 1 Cross-section of THz hollow fiber

在基管内面镀金或银等高反射金属膜，成为低损耗 THz 波传输媒质后，称为金属 THz 空芯光纤。理论计算得到在金属 THz 空芯光纤中 TE_{01} 模和 TE_{11} 模损耗较小^[13]。在实际传输系统中， TE_{11} 模容易被高斯光束激发，与光源有较高的耦合效率，在圆柱形波导中有稳定的场分布。 TE_{11} 模与线性极化高斯光束的最高耦合效率为 90% ^[10]。而 TE_{01} 模在圆柱形波导中的场分布为圆环形，不容易被高斯光

束激发，与光源的耦合效率很低。文献^[10]实验结果表明，金属 THz 空芯光纤的实测损耗和 TE_{11} 模理论损耗非常接近。因此，金属 THz 空芯光纤主要支持 TE_{11} 模，其衰减常数为^[11]：

$$\alpha_{\text{TE}_{11}} = n \frac{\mu^4}{(\mu^2 - 1)} \frac{n}{n^2 + k^2} \left(\frac{1}{k_0^2 T^3} + \frac{1}{\mu^4 T} \right), \quad (1)$$

式中 n 和 k 分别为金属膜的折射率和消光系数， μ 为一阶 Bessel 函数导数的第一个零点， k_0 为电磁波在空气中的波数。

在金属 THz 空芯光纤内面再镀介质膜，就构成介质/金属 THz 空芯光纤。光纤损耗最小时对应的介质膜厚为最优膜厚，记为 d_{opt} 。不考虑介质膜材料吸收时^[11]

$$d_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{2\pi(n_d^2 - 1)^{1/2}} \left\{ \arctan \left[\frac{n_d}{(n_d^2 - 1)^{1/4}} \right] + s\pi \right\}, \quad s = 0, 1, \dots \quad (2)$$

式中 λ 为传输波长， n_d 为介质膜折射率。由 (2) 式，介质/金属空芯光纤有多个最优膜厚值，但在实际制作中，考虑到介质膜越厚表面粗糙度也越大，一般取 (2) 式中 $s=0$ 对应的最优膜厚值。那么，最优膜厚和传输波长成正比。

进入介质/金属空芯光纤的高斯光束主要激发模式 HE_{1m} ，其中 HE_{11} 模损耗最低且与光源具有较高的耦合效率。 HE_{11} 模与线性极化高斯光束的最高耦合效率为 98.1% ^[14]。文献^[9]实验结果表明，优化光纤结构参数后，介质/金属 THz 空芯光纤主要支持 HE_{11} 模的传输。当介质膜厚为最优值且不考虑介质材料吸收时， HE_{11} 模的衰减常数为^[11]：

$$\alpha_{\text{HE}_{11}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{T^3} \frac{n}{n^2 + k^2} \left[1 + \frac{n_d^2}{(n_d^2 - 1)^{1/2}} \right]^2, \quad (3)$$

其中 μ_0 为零阶 Bessel 函数的第一个零点。

文献报道的理论结果和实验结果证实， TE_{11} 模损耗为金属 THz 空芯光纤损耗的近似值， HE_{11} 模损耗为介质/金属 THz 空芯光纤损耗的近似值。当介质膜为理想介质，即介质膜没有材料吸收时，一般情况下，介质/金属 THz 空芯光纤中 HE_{11} 模的损耗要小于同尺寸金属 THz 空芯光纤中 TE_{11} 模的损耗^[13]。然而实际的介质膜中总是存在材料吸收，材料吸收带来附加损耗，可能导致介质/金属 THz 空芯光纤损耗大于同尺寸金属 THz 空芯光纤损耗。

3 介质材料吸收对光纤结构参数的影响

考虑介质材料吸收前后介质/金属 THz 空芯光纤的衰减常数分别记为 $\alpha_{HE_{11}}$, $\alpha'_{HE_{11}}$, 则有

$$\alpha'_{HE_{11}} = \alpha_{HE_{11}} + \Delta\alpha, \tag{4}$$

其中 $\Delta\alpha$ 为由介质材料吸收引起的附加损耗:

$$\Delta\alpha = \alpha_{HE_{11}} k_0 d \frac{1}{F_m} k_d F_d, \tag{5}$$

其中 k_d 为介质膜的消光系数, F_m 为金属材料参数, F_d 为介质材料参数:

$$F_m = \frac{n}{n^2 + k^2},$$

$$F_d = \frac{\frac{n_d}{n_d^2 - 1} + \frac{n_d}{\sqrt{n_d^2 - 1}}}{1 + \frac{n_d^2}{\sqrt{n_d^2 - 1}}},$$

由(5)式可知, 介质膜越厚, 由介质材料吸收引起的损耗越大。从红外波段到 THz 波段, 介质膜厚最优值从几百纳米变为数十微米, 因此介质材料吸收对于 THz 空芯光纤具有显著的影响。

结合(3)式和(5)式可得, 由介质吸收引起的附加损耗 $\Delta\alpha$ 和金属材料参数无关, 而 $\alpha_{HE_{11}}$ 和 F_m 成正比, 因此由(4)式可得, F_m 为金属材料的选择标准, F_m 越小, 光纤损耗越小。结合(3)式、(4)式和(5)式还可以得到, 介质/金属 THz 空芯光纤的损耗 $\alpha'_{HE_{11}}$ 和 T^3 成反比。

首先分析介质材料吸收对介质膜最优膜厚及传输损耗的影响。以内面镀有聚苯乙烯(PS)和金(Au)的空芯光纤为例。图 2 为 PS/Au 空芯光纤中 HE_{11} 模损耗和 PS 膜厚的关系曲线。分别计算了考虑 PS 材料吸收和不考虑 PS 材料吸收两种情况下的损耗。光纤内径为 2 mm, 传输波长为 200 μm 。在 200 μm 处 PS 折射率为 1.58, 吸收系数为 2.4 cm^{-1} , Au 的复折射率为 356 + j444。图 2 中空芯光纤损耗随介质膜厚呈周期性变化, 正如(2)式所示, 空芯光纤损耗在多个膜厚处获得最小值。由图 2 可得, 考虑介质材料吸收后, 最优膜厚值变小, 传输损耗变大。图中忽略介质材料吸收时, 空芯光纤在膜厚 25 μm 处获得最低损耗 0.26 dB/m; 考虑介质材料吸收后, 最优膜厚和最低损耗分别为 22.3 μm 和 0.8 dB/m。由图 2 还可以得到, 忽略介质材料吸收时, 损耗在各个不同膜厚的谷值相等; 考虑介质材料吸收后, 损耗的谷值随膜厚增加而增加, 如图 2 中虚线所示。这是因为介质膜越厚, 由介质

材料吸收引起的损耗越大。

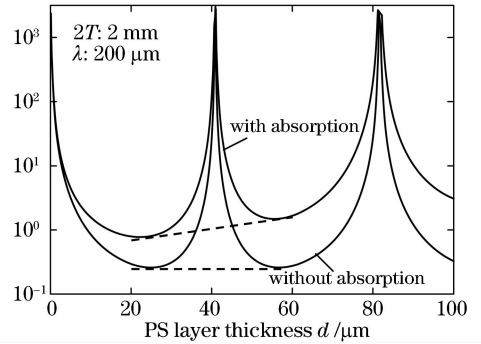


图 2 HE_{11} 模损耗随 PS 膜厚的变化

Fig. 2 Transmission losses of the HE_{11} mode as a function of PS layer thickness

然后分析介质材料吸收对空芯光纤内径的要求。图 3 为 THz 空芯光纤损耗和光纤内直径的关系曲线, 该图比较了 Au 空芯光纤中 TE_{11} 模的损耗和考虑介质材料吸收前后 PS/Au 空芯光纤中 HE_{11} 模的损耗, 计算中取传输波长 200 μm , PS 膜厚取最优值。由图 3 可见, 空芯光纤损耗随内径增大而减小。由图 3 还可得, 直径较小的介质/金属空芯光纤的衰减常数可能大于相同内径的金属空芯光纤。当光纤内直径小于 0.87 mm, 由于介质材料吸收, PS/Au 空芯光纤的损耗反而大于 Au 空芯光纤的损耗; 而当光纤内径小于 0.46 mm, 即使不考虑 PS 的吸收, PS/Au 空芯光纤的损耗也大于 Au 空芯光纤的损耗。也就是说, 当传输波长为 200 μm 时, 为了实现比同尺寸金属 THz 空芯光纤更低损耗的传输, 介质/金属 THz 空芯光纤的内直径一般要求大于 0.46 mm, 如果介质膜采用 PS, 那么其内直径一般要求大于 0.87 mm。实际应用中, 在对空芯光纤的柔韧性有较高要求时, 往往需要内径较小的空芯光纤, 这时要权衡内径和损耗这两个因素。

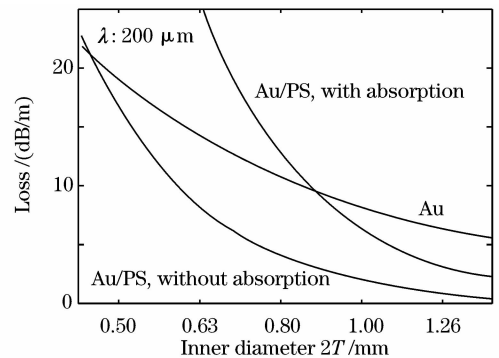


图 3 THz 空芯光纤损耗和光纤内直径的关系

Fig. 3 Transmission loss of THz hollow fiber as a function of inner diameter

最后分析介质材料吸收对介质膜折射率选取的影响。图 4 为 F_d 及 HE_{11} 模损耗和介质折射率的关系曲线,取传输波长 $200\ \mu\text{m}$,空芯光纤内直径 $2\ \text{mm}$,考虑材料吸收时介质膜吸收系数取 $2.4\ \text{cm}^{-1}$ 。研究表明,不考虑介质材料吸收时,介质折射率的最优值为 1.41,即介质/金属空芯光纤的损耗值在 $n_d=1.41$ 处最小^[1],如图 4 中的虚线所示。图 4 中 F_d 随介质折射率增大而减小。由(4)式和(5)式, F_d 越小,光纤衰减常数越小。因此,考虑介质材料吸收以后,由于(5)式中参数 F_d 的影响,介质膜折射率的最优值将变大,不再是 1.41,其精确值与传输波长、光纤内直径、介质膜消光系数以及金属折射率等因素有关。在图 4 计算条件下,介质折射率的最优值为 2.1。由图 4 还可以看到,考虑介质吸收后,当介质折射率较小时(如图 4 中小于 1.5),由于参数 F_d 的影响, HE_{11} 模衰减常数随介质折射率减小而迅速增大。这表明在图 4 的计算条件下,折射率小于 1.5 的介质材料不是理想的选择。

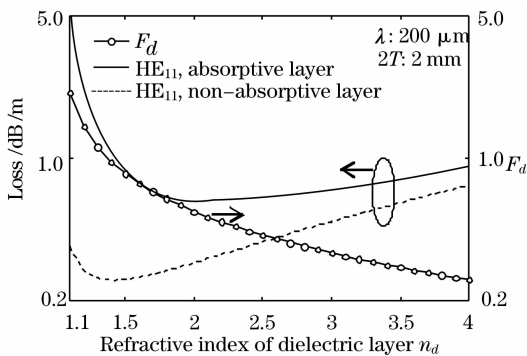


图 4 F_d 及 HE_{11} 模损耗和介质折射率的关系

Fig. 4 F_d and losses of the HE_{11} mode as a function of n_d

4 介质膜吸收容限

由于介质材料吸收,当介质/金属空芯光纤的衰减常数大于相同内径金属空芯光纤的衰减常数时,镀介质膜就失去了意义。引入介质膜吸收容限的定义,对于相同内径的两种 THz 空芯光纤,当介质/金属空芯光纤中 HE_{11} 模衰减常数和金属空芯光纤中 TE_{11} 模衰减常数相等时,对应的介质膜的吸收系数为介质膜吸收容限,记为 a_t 。 a_t 对于介质膜材料的选择具有重要意义。 a_t 与介质膜折射率、金属膜折射率、空芯光纤内直径、传输波长等因素有关。

图 5 为介质膜吸收容限和空芯光纤内直径的关系曲线。四条曲线对应的介质折射率分别为 1.1, 1.5, 2.0 和 3.0,传输波长均为 $200\ \mu\text{m}$ 。图 5 表明光纤内直径越小,吸收容限越小。比较图中四条曲

线,曲线 4 对应的吸收容限明显小于其他曲线。这表明,当传输波长为 $200\ \mu\text{m}$ 时,折射率为 1.1 的介质材料不是合适的选择。这从另一个角度验证了图 3 中的结论。图中曲线 1 和曲线 2 分别在内直径小于 $0.68\ \text{mm}$ 和小于 $0.52\ \text{mm}$ 部分没有数值,这是因为当光纤内直径较小,即使没有介质吸收,介质/金属空芯光纤的损耗也可能大于相同内径的金属空芯光纤的损耗(参见图 3)。因此,制作内直径较小的介质/金属空芯光纤,介质折射率的选取非常重要。例如对于内直径小于 $0.5\ \text{mm}$ 的介质/金属 THz 空芯光纤,在图 5 中,只有采用 $n_d=1.5$ 的介质膜,才能实现更低损耗的传输。

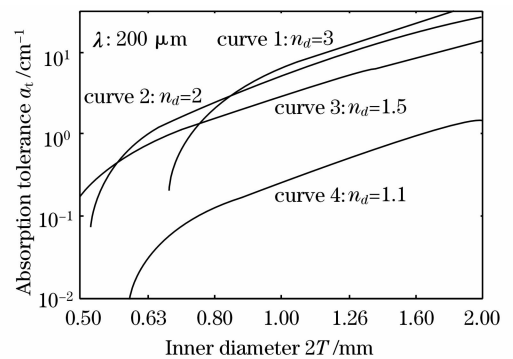


图 5 介质膜吸收容限和光纤内直径的关系

Fig. 5 Absorption tolerance of fibers with different inner diameters

图 6 为介质吸收容限 a_t 及 4 种在 THz 波段吸收较小的常见介质材料的吸收谱^[15-16]。这 4 种介质材料分别为:聚四氟乙烯 (PTFE)、聚苯乙烯 (PS)、高密度聚乙烯 (HDPE) 和低密度聚乙烯 (LDPE)。光纤内直径为 $0.5\ \text{mm}$,介质折射率取 1.5(四种介质在图 6 中涉及的波段,折射率均在 1.5 附近)。由图 6,波长越大, a_t 越小。图 6 中,在波长小于 $120\ \mu\text{m}$ 部分,4 种材料均可作为介质/金属 THz 空芯光纤的介质膜材料。在波长 $200\ \mu\text{m}$ 处,四种材料的吸收系数都大于容限。比较图中 4 种材料,LDPE 吸收系数较小,而且 LDPE 在 THz 波段的折射率在 1.5 附近,由图 5 的分析,适合制作内径较小的空芯光纤。因此,LDPE 为介质/金属 THz 空芯光纤的理想介质膜材料之一。

值得注意的是,在某些情况下,即使没有介质吸收,介质/金属空心光纤的损耗也可能大于金属空芯光纤损耗,也就没有吸收容限可言了。这些情况有:1) 空芯光纤内直径较小(如图 3 所示);2) 传输波长较大,这是因为对于金属 THz 空芯光纤和介质/金属 THz 空芯光纤,两者的最低损耗随传输波长的变

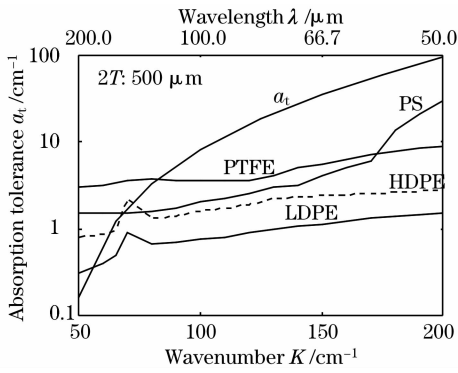


图6 介质吸收容限及四种常见介质的吸收谱
Fig. 6 Absorption tolerance and absorption spectra of polymers

化趋势是相反的,前者随传输波长增大而变小,后者则随传输波长增大而增加。

在中红外波段,薄膜表面粗糙度等对光纤传输损耗有显著的影响,理论损耗和实测损耗往往有较大差距。实际工艺中的最佳膜厚也小于理论最佳膜厚。在 THz 波段,由于传输波长增加,最优介质膜厚变大,薄膜表面粗糙度对损耗影响变小,实测与理论值相当^[9,10]。因此,THz 空芯光纤制作的最佳结构参数应与本文的理论计算结果相近,实际损耗值也可以参照考虑吸收的计算结果。

5 结 论

本文讨论了介质材料吸收对介质/金属 THz 空芯光纤结构参数的影响。考虑介质材料吸收后,介质膜最优膜厚值变小,介质折射率的最优值变大。对于内径较小的介质/金属 THz 空芯光纤,需要仔细选取折射率适当的介质才能达到降低损耗系数的目的。分析了光纤内直径、介质膜折射率和传输波长对介质膜吸收容限的影响:容限随光纤内直径减小或传输波长增加而减小。当光纤内直径很小或传输波长很大时,介质膜已经不能降低金属光纤的损耗,所以吸收容限不存在。

参 考 文 献

1 Zhang Xianbin, Shi Wei. THz electromagnetic radiation based on the stimulated raman scattering of polariton [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 1012~1016

张显斌,施 卫. 基于耦合场量子受激拉曼散射的太赫兹波辐射 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 1012~1016

2 Liu Shenggang. New progress on terahertz science and technology [J]. *China Basic Science*, 2006, **1**: 7~12

刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展 [J]. *中国基础科学*, 2006, **1**: 7~12

3 Hu Jie, Chen Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(4): 567~572

胡 婕,陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 567~572

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

5 T. Hidaka, H. Minamide, S. Ichikawa *et al.*. Ferroelectric PVDF cladding terahertz waveguide [J]. *J. Lightwave Tech.*, 2005, **23**(8): 2469~2473

6 G. Gallot, S. P. Jamison, D. Grischkowsky *et al.*. Terahertz waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 851~863

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

8 S. P. Jamison, R. W. McGowan, D. Grischkowsky. Single-mode waveguide propagation and reshaping of sub-ps terahertz pulses in sapphire fibers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(15): 1987~1989

9 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

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

11 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

12 Yi-Wei Shi, Kentaro Ito, Mitsunobu Miyagi *et al.*. Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance [J] *Appl. Opt.*, 2006, **45**(26): 6736~6740

13 Tang Xiaoli, Shi Yiwei. 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

14 R. K. Nubling, J. A. Harrington. Launch conditions and mode coupling in hollow-glass waveguides [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(9): 2454~2458

15 J. R. Birch. The far-infrared optical constants of polypropylene, PTFE and polystyrene [J]. *Infrared Phys.*, 1992, **33**(1): 33~38

16 J. R. Birch. The far infrared optical constants of polyethylene [J]. *Infrared Phys.*, 1990, **30**(2): 195~197