

文章编号:1001-9014(2010)04-0278-05

多层介质膜红外空芯光纤的传输特性

林 宵, 石艺尉*, 隋可融, 朱晓松
(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要:提出了一种计算多层介质膜空芯光纤损耗谱特性的方法,理论分析了介质—金属膜结构红外空芯光纤的传输损耗特性.将各层膜的厚度、材料色散和表面粗糙度等特性引入理论计算后,根据实测损耗谱估算了每层介质膜厚度.通过比较实测和理论计算损耗谱,调整优化了工艺参数.采用液相镀膜法,制作了在中红外波长带有低损耗特性的 Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ 三层介质膜结构空芯光纤.

关键词:光纤光学;多层介质膜;损耗谱;传输特性
中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF INFRARED HOLLOW FIBERS WITH MULTILAYERED DIELECTRIC INNER-COATINGS

LIN Xiao, SHI Yi-Wei*, SUI Ke-Rong, ZHU Xiao-Song
(School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A theoretical method for calculating the loss spectrum of the hollow fiber inner-coated with multi-dielectric-layer and silver layer was proposed. The transmission loss characteristics of infrared hollow fibers were analyzed theoretically. The film thickness for each dielectric layer was estimated according to the measured loss spectra by introducing the film thickness, material dispersion, and surface roughness into the theoretical calculation. The fabrication parameters of liquid-phase coating and iodization process for SiO₂ and AgI film were adjusted by comparing the measured and the calculated loss spectra. A hollow fiber with Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ structure was fabricated and low-loss property was demonstrated in the mid-infrared wavelength region.

Key words: fiber optics; multilayered dielectric film; loss spectrum; transmission characteristic

引言

空芯光纤在激光能量传输、红外热像传输和检测等方面有很好的发展应用前景^[1].它具有红外传输损耗小、结构简单、易于制造、柔韧性好等显著的优点.空芯光纤根据其内部材料和结构的不同,可以分为泄漏型和全反射型.介质—金属膜结构的空芯光纤是近年研究中常见的泄漏型空芯光纤.这种光纤在中红外波段(2~12μm)的波长范围内对 Ho:YAG, Er:YAG, CO 和 CO₂ 激光都实现了低损耗特性和较大的功率阈值.

Miyagi 和 Kawakami^[2]的研究结果表明,介质薄膜的厚度是影响介质—金属膜空芯光纤传输损耗的

重要因素之一.通过调节介质膜的膜厚可以在目标波长得到低损耗性能.如果采用多层介质镀膜代替单层介质膜,可以得到更低的损耗和更小的弯曲附加损耗.多层介质膜空芯光纤的研究是近年该领域的主要热点之一,如用 PbS 和 CdS 或 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 等材料制作的多层介质膜空芯光纤^[3,4].然而,由于厚膜的表面粗糙等工艺限制,文献[3,4]的低损耗目标均设定在波长较短的近红外.

对多层介质—金属膜结构的空芯光纤的损耗谱特性进行了理论分析,同时考虑了材料色散和介质膜界面粗糙度对光纤损耗的影响,得到了多层介质膜空芯光纤的损耗谱计算模型.通过对理论计算模型和实测损耗谱曲线的分析,可以在多层膜制作工

收稿日期:2009-12-21,修回日期:2010-05-18

Received date: 2009-12-21, revised date: 2010-05-18

基金项目:国家自然科学基金(60971014);“211工程”三期重点学科建设项目资助

作者简介:林 宵(1984-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事空芯光纤方面的研究,E-mail: 072021017@fudan.edu.cn.

* 通信作者 E-mail: ywshi@fudan.edu.cn.

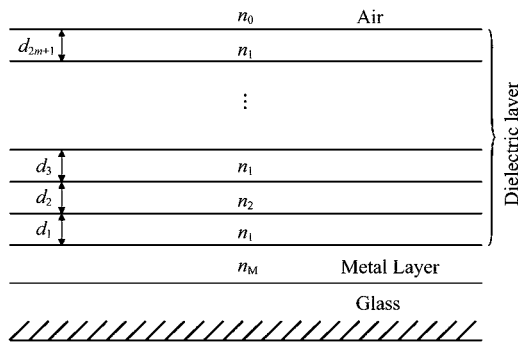


图1 多层(2n+1层)介质膜泄漏型空芯光纤结构模型
Fig. 1 Structure model of multi-dielectric layer hollow fiber (2n+1 layers)

艺过程中判断各层膜厚,从而为调整工艺参数和控制各层膜厚提供依据.在理论指导下,我们以内径0.7mm的玻璃毛细管作为基管材料,采用改良的液相镀膜法降低膜的表面粗糙度,制作了Ag/SiO₂/AgI/SiO₂结构的三层介质—金属膜空芯光纤,在中红外波段实现了低损耗特性.

1 理论分析

红外空芯光纤中的多层介质膜通常采用两种不同折射率的介质(n_1 和 n_2)交替镀膜,制得周期性多层介质膜空芯光纤.图1是2n+1层介质膜的结构示意图.

在空芯光纤的半径远大于传输光的波长,光源是非相干且任意极化的情况下,使用几何光学方法可以得到空芯光纤的传输损耗谱曲线.入射光功率 P_0 通过长度为 z 的光纤后衰减为^[5]

$$P(z) = \int_0^{\theta_{\max}} P_0(\theta) \exp\left[-\frac{1-R(\theta)}{2\text{actg}\theta} z\right] \sin\theta d\theta \quad (1)$$

其中, $P_0(\theta)$ 是入射光强度的角分布,对于大部分光纤损耗谱测试系统的光源, $P_0(\theta)$ 通常近似为高斯分布; a 是空芯光纤的内径; θ_{\max} 表示最大入射角度; $R(\theta)$ 是空芯光纤内部空气与介质层交界处的相对反射率.计算一定波长范围内的 $P(z)$ 就可以得到空芯光纤的传输损耗谱曲线.

在以前的工作中已经计算了单层膜结构的 $R(\theta)$,并且根据实测损耗谱推导了薄膜材料的色散^[6].多层膜的 $R(\theta)$ 是电磁场在介质交界面的折射反射问题,比单层膜结构复杂.利用场方法将边界条件相互联系起来,计算特征矩阵可以得到多层膜的反射系数.单层介质膜是多层膜的基础,首先考虑单层膜的特征矩阵^[7].图2是单层介质膜泄漏型空芯

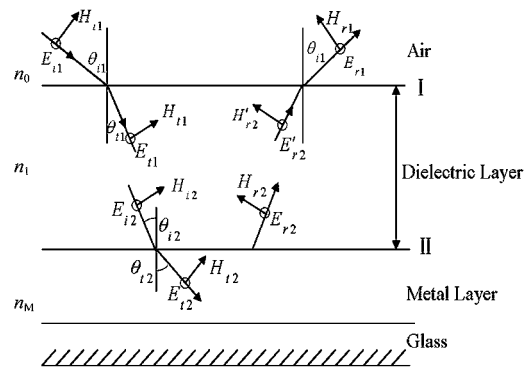


图2 单层介质膜空芯光纤内表面的光线反射模型
Fig. 2 Reflection model of dielectric-coated metal hollow fiber

光纤内表面的光线反射模型.图2中 n_m 是基底金属膜的折射率, n_1 为介质层, n_0 是空气折射率.介质膜层两边的场矢量可用特征矩阵 M 联系

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

单层特征矩阵 M_1 :

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n_1 d_1 \cos\theta_{12}) & -\frac{i}{p_1} \sin(k_0 n_1 d_1 \cos\theta_{12}) \\ -ip_1 \sin(k_0 n_1 d_1 \cos\theta_{12}) & \cos(k_0 n_1 d_1 \cos\theta_{12}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于多层介质膜,可逐层应用单层膜特征矩阵.各个单层膜特征矩阵之积就是多层膜的特征矩阵.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_N \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从多层膜特征矩阵得到反射系数 $R(\theta)$

$$R(\theta) = \frac{(m_{11} + m_{12} p_M) p_0 - (m_{21} + m_{22} p_M)}{(m_{11} + m_{12} p_M) p_0 + (m_{21} + m_{22} p_M)} \quad (5)$$

以上公式中,如果是TE模,则 $p_i = \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\mu_i}} \cos\theta_i$,

对TM模 $p_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}} \cos\theta_i$.

2 模型计算与讨论

对周期性多层介质膜,膜的排列结构一般按低折射率(n_L)薄膜和高折射率(n_H)薄膜设计成 $n_L/n_H/n_L/\cdots/n_H/n_L$ 结构.在实验中,选取SiO₂和AgI分别作为低折射率和高折射率薄膜材料.图3为根据上述模型计算的空芯光纤损耗谱,目标传输波长为2.94 μm .单层介质膜为Ag/SiO₂结构,15层介质膜则包含8层SiO₂和7层AgI薄膜的交替.对比两者损耗谱特性,采用多层介质膜—金属结构能有效降低损耗.多层膜结构损耗谱在目标波长两侧增加了

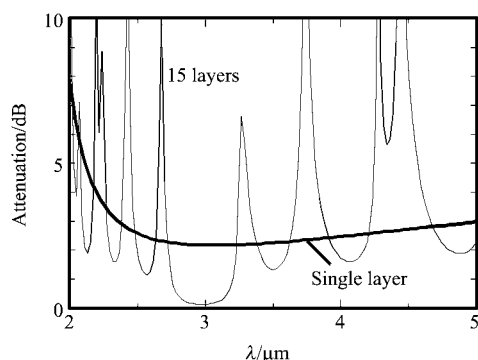


图3 单层介质膜和15层介质膜空芯光纤的理论损耗谱
Fig. 3 Calculated loss spectra of the hollow fiber with single and 15 dielectric films

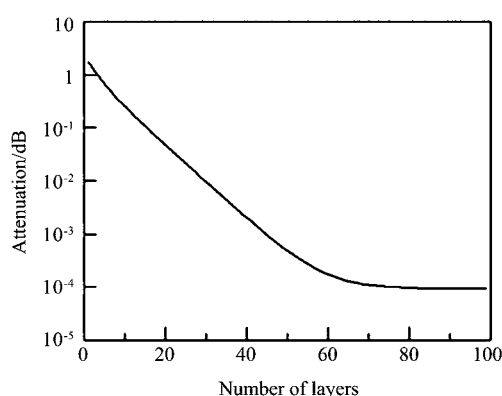


图4 多层膜空芯光纤损耗和介质膜层数的关系曲线($\lambda = 2.94 \mu\text{m}$)
Fig. 4 Transmission loss versus the number of dielectric layers at the wavelength of $2.94 \mu\text{m}$

许多的干涉峰,而在目标波长却有平坦的低损耗特性.可以明显观察到优化的周期介质膜在目标波长的禁带特性.

图4给出了空芯光纤在目标波长的损耗和介质膜层数的关系曲线.和单层介质膜相比,多层介质膜结构可以有效降低目标波长的传输损耗.在一定层数内,介质膜层数越多损耗越低,周期膜的禁带特性在外层金属薄膜的高反射下得到加强^[3].介质膜层数达到一定数值后,损耗不再急剧降低.

2.1 多层介质膜中各层膜厚的估算

对单层介质膜结构,实测损耗谱中的各个干涉峰波长成倍数关系,只要得到某个干涉峰的波长便能计算^[4]介质膜膜厚.然而对多层膜结构,已无法套用单层膜估算方法.这样,除了贴近基底的第一层介质膜外,第二层以上的介质膜膜厚没有现成公式可以进行评价估算.有报道^[4]利用扫描电子显微镜(SEM)测量得到Ag/CdS/Pbs/CdS三层介质膜空芯

光纤的各层膜厚.使用SEM测量膜层厚度,需要切割光纤得到截面图像.这种方法误差大,对有些介质材料不适用.由于膜厚沿光纤存在不均匀等现实情况,某一点的膜厚不能完全反应光纤整体的特性.而且要求各层介质膜在照片中的界面清晰. Ag/SiO₂/AgI/SiO₂光纤的SEM的图像显示,Ag层和SiO₂层都呈浅色,几乎无法区分.

利用光纤损耗谱特性间接估算多层介质膜的膜厚.利用上述损耗谱计算方法,用一组膜厚值进行扫描.当某组膜厚值的理论损耗谱曲线和实测损耗谱曲线吻合时,便认为该组膜厚值为空芯光纤多层介质膜的厚度.如果在多层膜制膜过程中使用模型,能更加准确评价每次成膜的厚度.在利用公式直接得到第一层膜厚的基础上,只需调整第二层膜厚值,使理论值准确符合此时两层膜的损耗谱,就可以得到第二层膜厚准确值.以此类推,对每次生成的新膜,只要考虑该层膜参数即可.这样就能利用各制作阶段损耗谱估算多层膜厚度.

图5为3层膜空芯光纤的理论损耗谱.对目标波长 $2.94 \mu\text{m}$ 的3层介质的最佳膜厚: $d_3 = 0.48 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.41 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.72 \mu\text{m}$.对其中任意一层介质膜,厚度增加20%,保持其余两层厚度不变,可以得到三条不同的损耗谱曲线,见图5中的虚线.可以看到,第二层(AgI层)因为折射率高,虽然膜厚绝对值变化最小,但是对损耗谱曲线影响最大.相比第三层,虽然第一层的厚度值增加最多,但是对损耗的影响反而小于最外面的第三层.因此在制作工艺中对高折射率材料的膜厚需要重点控制,同时也要注意接近光纤芯径层的厚度.

2.2 影响模型估算精度的因素

介质膜材料的色散会影响空芯光纤的损耗谱特性.将材料色散引入多层膜损耗谱模型,可以更准确

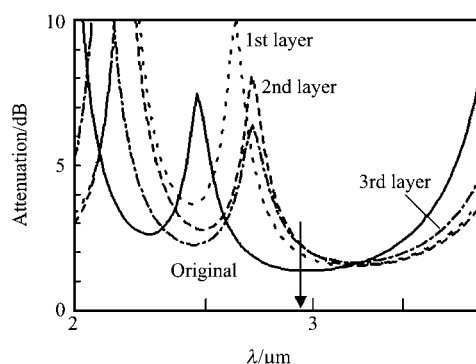


图5 Ag/SiO₂/AgI/SiO₂空芯光纤理论损耗谱特性
Fig. 5 Theoretical loss spectra of Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ hollow fiber

地预估多层介质膜空芯光纤中间层厚度. SiO₂和 AgI 的材料色散如下:

$$\text{AgI}: n(\lambda) = 2.0216 + 0.878/\lambda^2 - 0.0024/\lambda^4, \quad (6)$$

$$\text{SiO}_2: n(\lambda) = 1.42614 + 0.02729/\lambda^2 + 0.0001/\lambda^4. \quad (7)$$

实际镀膜过程中,存在介质膜表面粗糙度,将影响反射率,造成光纤的传输损耗增加.入射光线入射到粗糙表面,除了镜面反射光,还会有其它方向的漫反射光线.假设随机粗糙表面起伏高度为 σ ,受表面粗糙度影响,镜面反射光的相位会发生变化^[8]:

$$\Delta\phi = 2k_0 n_i \sigma \cos\phi_i. \quad (8)$$

因为实际镀膜的表面粗糙度远远小于传输波长,并且假设随机粗糙面表面斜率远小于 1,介质膜材料特性均一,这样只考虑镜面反射光线,忽略其它散射光.在交界面上,表面粗糙度影响近似等效为镜面反射光线产生 $\Delta\phi$ 的相移.

此时,在粗糙面上的反射系数 r 就可以利用光滑表面下的反射系数 r^0 表示^[9]:

$$r = r^0 \exp[-(\Delta\phi)^2/2]. \quad (9)$$

将粗糙面的反射系数 r 代入多层膜损耗谱模型,可以得到粗糙度对损耗谱的影响.图 6 为假设所有交界面的粗糙度 σ 都相同, SiO₂ 单层介质膜、三层和五层 SiO₂/AgI 介质膜空芯光纤在 2.94 μm 的传输损耗随粗糙度的变化.在粗糙度为 0 时,多层膜结构的损耗低于单层膜的损耗,但是当粗糙度增加时,多层膜结构的损耗接近甚至超过单层膜结构光纤.此时多层膜结构对单层膜不再有降低损耗的优越性,甚至会增加损耗.所以为了实现多层膜空芯光纤的低损耗性,在制作工艺中,必须控制介质膜交界面的粗糙度.

考虑 3 层膜 Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ 空芯光纤.图 7 中实线为各个界面粗糙度为 0 的损耗谱曲线.虚线

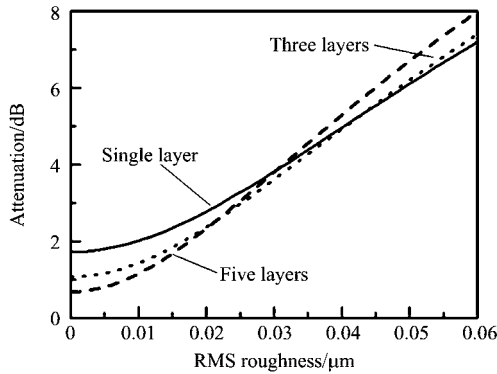


图 6 介质膜空芯光纤传输损耗随粗糙度变化的关系
Fig.6 Theoretical losses of multilayered hollow fibers as a function of surface roughness

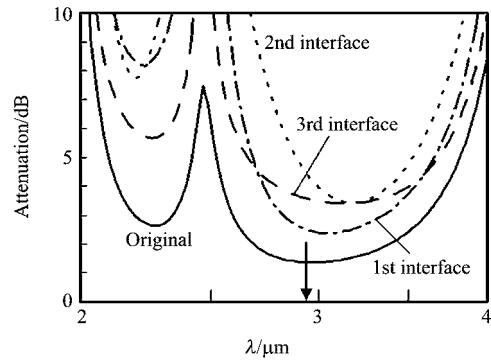


图 7 不同界面粗糙度下空芯光纤理论损耗谱特性
Fig.7 Theoretical loss spectra of Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ hollow fiber at different interface roughness

是在其它界面粗糙度为 0 的基础上,设某一个介质交界面的粗糙度为 0.05 μm ,得到的三条损耗谱曲线.可以看到第二个(AgI 层)表面粗糙度对损耗谱曲线影响最大.接近基底的第一交界面的粗糙度对损耗的影响小于第三个交界面(空气与 SiO₂ 交界).

3 多层膜空芯光纤的制作

在镀有金属银膜的毛细管内面,采用液相化学法镀 SiO₂ 介质膜.制作的 Ag/SiO₂ 空芯光纤的实测损耗谱如图 8 所示.波长 4.2 μm 和 2.1 μm 处的损耗峰是薄膜的干涉效应形成的干涉峰.8 ~ 10 μm 的干涉峰是 SiO₂ 材料的吸收峰.根据单层膜膜厚的计算公式和干涉峰位置可以算得 SiO₂ 介质膜厚度为 0.995 μm .把单层膜结构看成多层膜结构的一种特例,数值 0.995 μm 代入多层膜损耗谱计算模型,理论计算和实测干涉峰的位置吻合.计算中单层膜的粗糙度为 0.03 μm .

多层介质膜空芯光纤的制作需要准确控制各层

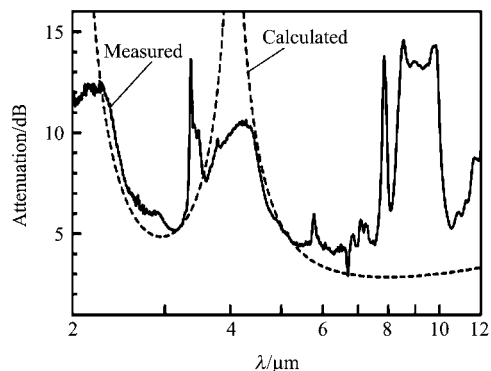


图 8 Ag/SiO₂ 空芯光纤的损耗谱
Fig.8 Loss spectra of Ag/SiO₂ hollow fiber

介质的厚度,制膜工艺要做到均一光滑.制作了长15cm的Ag/SiO₂/AgI/SiO₂三层介质膜空芯光纤.根据制作过程中损耗谱特性的测量结果,膜厚分别为700nm,650nm和600nm.实测曲线和理论计算结果如图8所示.该三层膜空芯光纤在4~5μm有低损耗,适合传输CO激光.如理论计算一样,三层膜结构的损耗谱曲线在4~5μm低损耗区域两侧,生成了几个干涉峰.在8~10μm波段,因为SiO₂的吸收而形成的吸收峰仍然存在.说明在目标波长存在较大吸收的材料不宜选择作为空芯光纤介质膜的材料.理论曲线中粗糙度σ为0.03μm,和图8中的粗糙度大致相同,说明制作工艺的一致性.从图9可以看出,三层膜空芯光纤因为介质膜表面粗糙度的影响,损耗性能和单层膜光纤并没有明显改善.该结果与图7的理论预测结果一致.虽然多层膜结构从理论上可以得到低损耗性能,但是实际制作工艺的限制与理想值还相差甚远.需要说明的是,以上计算均基于光纤的损耗谱特性,光源有非相干宽谱特性,因而损耗的绝对值较大.用于激光传输时,目前单层膜光纤的损耗在0.1~0.5dB/m.如果薄膜表面粗糙度为0.03μm,则3层膜光纤的损耗应该在同一量级.但是由于多层膜光纤的禁带效应而具有较小的弯曲附加损耗.在需要输出功率稳定或光纤需要处于弯曲状态等应用场合,多层膜光纤远优于单层膜光纤.

4 结论

使用几何光学方法分析空芯光纤传输损耗,考虑了各层介质膜的材料色散特性,引入了各层介质

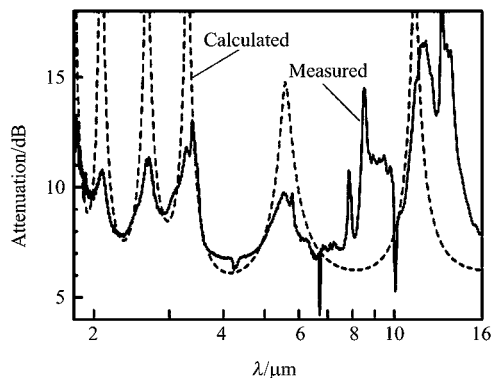


图9 Ag/SiO₂/AgI/SiO₂空芯光纤损耗谱
Fig.9 Loss spectra of Ag/SiO₂/AgI/SiO₂ hollow fiber

膜粗糙度,建立了多层介质膜空芯光纤的传输损耗模型.理论计算的损耗谱曲线与实测曲线一致性良好.利用该模型,可以间接测算多层膜空芯光纤内部各层介质膜厚,比较准确地反映了光纤的总体光学特性.

理论计算证明,采用多层介质膜—金属结构比单层膜空芯光纤能有效降低损耗,并且优化的多层周期介质膜在目标波长呈现禁带特性.但是各个介质层表面的粗糙度会极大影响多层介质膜空芯光纤的传输损耗.当粗糙度增加时,多层膜结构的损耗将接近甚至超过单层膜结构光纤.

利用该模型,可以为实际制作过程中为镀膜工艺参数的调整和各层介质膜厚度的控制提供理论依据.高折射率介质层的膜厚误差、表面粗糙度对空芯光纤的传输损耗会有很大的影响,接近基底的底部介质层成膜质量对损耗的影响小于顶部介质层.采用液相镀膜法根据模型计算结果控制膜厚,制作了长度为15cm的Ag/SiO₂/AgI/SiO₂三层介质膜空芯光纤,在中红外波段获得了低损耗特性.

REFERENCES

- [1] George R, Harrington J A. Infrared transmissive, hollow plastic waveguides with inner Ag-AgI coatings[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(30): 6449—6455.
- [2] 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.
- [3] Karagiri T, Matsuura Y, Miyagi M. Metal-covered photonic bandgap multilayer for infrared hollow waveguide[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(36): 7603—7606.
- [4] Gopal V, Harrington J A. Deposition and characterization of metal sulfide dielectric coatings for hollow glass waveguides[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(24): 3182—3187.
- [5] Matsuura Y, Saito M, Miyagi M. Loss characteristics of circular hollow waveguides for incoherent infrared light[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1989, **6**(3): 423—427.
- [6] SUI K R, ZHU X S, Tang X L, et al. Method for evaluating material dispersion of dielectric film in the hollow fiber[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**: 6340—6344.
- [7] Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. Seventh Edition. England: Cambridge University Press, 1999: 45—63.
- [8] Tsang L, Kong J A, Ding K H. *Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications* [M]. USA: John Wiley-Interscience, 2000: 390—400.
- [9] Matsuura Y J, Harrington J A. Hollow glass waveguides with three-layer dielectric coating fabricated by chemical vapor deposition [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, **14**(6): 1255—1259.