

空芯光纤中介质层材料色散的研究

隋可融 朱晓松* 汤晓黎 石艺尉

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要 提出一种根据实验测量的损耗谱曲线,通过曲线拟合等方法获得空芯光纤中介质层薄膜材料色散性质的方法,并使用此方法得到了数种空芯光纤中常用的介质层材料在可见光与近红外区域的色散柯西公式。将得到的介质层材料色散引入到空芯光纤传输损耗谱的理论计算中之后,相对于不考虑材料色散或者使用文献中提供的色散数据进行计算的结果,理论计算结果能更好地符合实验测量结果,从而能够在理论上更加准确地预估空芯光纤在可见光与近红外区域的低损耗窗口的位置。所获得的材料色散柯西公式对于空芯光纤的高性能化设计有重要的辅助作用。

关键词 光纤光学;材料色散;曲线拟合;空芯光纤

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082811.2062

Study on Material Dispersion of Dielectric Layer in Hollow Fiber

Sui Kerong Zhu Xiaosong Tang Xiaoli Shi Yiwei

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

Abstract A method is proposed to evaluate the material dispersion property of the dielectric film in the dielectric-coated hollow fiber from the measured loss spectra of the hollow fibers by curve fitting. Cauchy relations for several commonly-used materials are obtained in the visible and near-infrared regions. By taking into consideration of the material dispersion, the theoretically calculated loss spectra of hollow fiber agree better with the measured ones than the calculated results neglecting material dispersion or adopting dispersion data from other references, and the wavelengths of the low-loss window in the visible and near-infrared regions can be predicted more accurately. The derived Cauchy relations are important to the design of hollow fiber with high performance.

Key words fiber optics; material dispersion; curve fitting; hollow fiber

1 引 言

空芯光纤是一种有发展应用前景的红外激光传输光纤^[1~3],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。其中,使用较多的是单层介质-金属膜结构泄漏型空芯光纤^[4~5]。这类光纤可以通过改变介质膜厚度调节光纤低损耗窗口对应的波长,并且在红外波段有较大的功率阈值以及平坦的传输特性,在 $2.94\ \mu\text{m}$ (Er:YAG 激光)与 $10.6\ \mu\text{m}$ (CO₂ 激光)波长已初步实现实用化^[6,7]。

随着空芯光纤高性能化研究的深入,空芯光纤的多波长传输成为近年的研究热点之一。具有均匀光滑介质薄膜的空芯光纤存在多个低损耗窗口,适当调整介质薄膜的厚度,使需要传输的各个目标波长均位于损耗谱曲线的低损耗窗口中,可以实现多波长的低损耗传输。然而由于空芯光纤中薄膜材料色散的影响,采用固定折射率计算得到的空芯光纤损耗谱曲线与实际测量结果存在一定的误差。特别是在可见光至近红外区域,材料折射率的变化幅度较中红外区域更大,对空芯光纤的低损耗窗口的位置影响更为显著。而且不同的空芯光纤制造工艺下

收稿日期:2008-01-16;收到修改稿日期:2008-07-03

基金项目:国家自然科学基金(60608013)和浦江人才计划(07pj14012)资助课题。

作者简介:隋可融(1985-),男,硕士研究生,主要从事空芯光纤方面的研究。E-mail: 072021087@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: E-mail: zhuxiaosong@fudan.edu.cn

介质层材料的色散情况会有所差异,一些已有文献[8]中的光学常数并不能很好地反映制作空芯光纤的介质层材料色散情况。

本文通过对空芯光纤的损耗谱曲线进行分析和曲线拟合的方法,得到了几种空芯光纤制作中常用介质层材料在可见光至近红外区域的材料色散。使用该结果,能在空芯光纤的高性能化设计中,更加准确地预估空芯光纤在可见光至近红外区域内的低损耗窗口的位置,为设计和制造多波长低损耗传输的空芯光纤提供了依据。

2 理论计算

为了明确空芯光纤中介质层薄膜材料对泄漏型空芯光纤传输特性的影响,使用几何光学方法^[9~12]分析空芯光纤传输损耗,可以计算得到空芯光纤的传输损耗谱曲线。图 1 是空芯光纤内部光传播示意图。

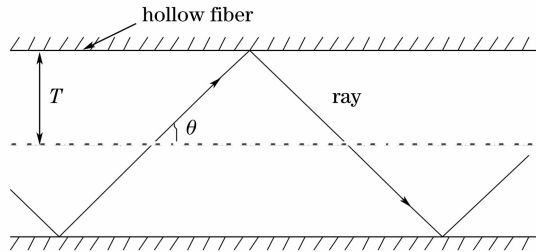


图 1 空芯光纤内部光线传播示意图

Fig. 1 Ray transmission model in hollow fiber

在空芯光纤的半径远远大于传输光的波长,光源是非相干且任意极化的情况下,如果入射光的入射角较小,则此入射光的损耗与通过子午线并具有相同入射角的光线的损耗相等。即图 1 中入射光的损耗计算公式为

$$\alpha(\theta) = \frac{1 - R(\theta)}{2a \tan \theta}, \quad (1)$$

其中 $R(\theta)$ 为入射光的 p 光和 s 光的反射系数的平均:

$$R(\theta) = \frac{R_s(\theta) + R_p(\theta)}{2}. \quad (2)$$

在入射光是高斯光时,通过光纤后的能量为

$$P(z) = \int_0^{\theta_{\max}} P_0(\theta) \exp[-\alpha(\theta)z] \sin \theta d\theta; \\ = \int_0^{\theta_{\max}} P_0(\theta) \exp\left[-\frac{1 - R(\theta)}{2a \tan \theta} z\right] \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

其中 $R(\theta)$ 是空芯光纤内部空气与介质层交界处的相对反射率。图 2 是单层介质膜泄漏型空芯光纤内表面的光线反射情况模型。

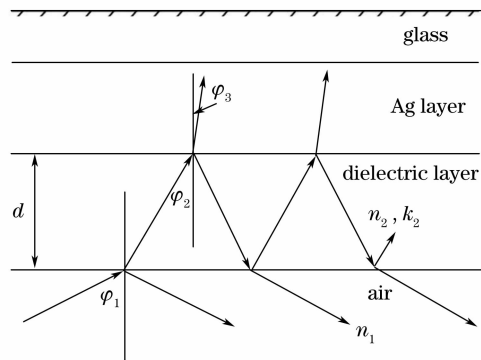


图 2 单层介质膜泄漏型空芯光纤内表面的光线反射模型

Fig. 2 Reflection model on the internal surface of dielectric-coated leakage silver hollow fiber

使用文献[12]中方法可通过菲涅尔公式与多层结构反射模型计算得到相对反射率 R_s 和 R_p , 代入(1)~(3)式计算即可得到不同介质层膜厚对应的损耗谱曲线。由此得到空芯光纤传输损耗与介质薄膜材料折射率之间的关系。

3 空芯光纤介质层薄膜材料色散计算方法

首先,通过实验测量获得多条不同介质层膜厚的空芯光纤传输损耗谱曲线。在各条损耗谱曲线中,将对应波长最长的峰的阶数记为 1, 往短波长方向其余的峰依次称为 2 阶峰、3 阶峰……。

以计算碘化银(AgI)介质薄膜在可见光与近红外区域的材料色散为例,对于获得的损耗谱曲线,计算薄膜材料色散的过程如下:

1) 在第一次迭代中,使用文献[8]中 AgI 材料在近中红外波长处的折射率数值,找到损耗谱曲线阶数为 1 的峰所在波长处的 AgI 折射率 n_{AgI} 。(在之后的迭代中,通过前一轮得到的 AgI 材料色散柯西公式计算获得所在波长的折射率 n_{AgI})

2) 通过调整 AgI 的膜厚参数 d , 使理论计算获得的损耗谱曲线中 1 阶峰与实验测量曲线重合,该厚度 d 则是第一次计算中 AgI 的薄膜厚度参数。

3) 固定 AgI 介质膜厚度参数 d_{AgI} 为步骤 2) 中获得的厚度 d , 调整理论计算中 AgI 的折射率数值,使计算获得的损耗谱曲线中 2 阶峰与实验测量的曲线重合,记下该峰对应的波长以及调整后该波长处的 AgI 折射率数值。

4) 使用步骤 3) 的方法,调整 AgI 折射率,使计算得到的损耗谱曲线中其他位于可见光至近红外区域的峰与实验测量得到的损耗谱曲线的对应干涉峰

重合,从而获得在损耗谱各峰位所对应波长处的 AgI 折射率数值。

5) 重复步骤 1)~4), 计算多条不同厚度的损耗谱曲线, 获得多个不同波长的 AgI 折射率数值。

6) 对获得的所有 AgI 材料波长-折射率数据, 用柯西公式 $n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ ^[13] 进行曲线拟合。得到参数 A、B、C, 从而获得该材料在可见光至近红外区域的材料色散经验公式。

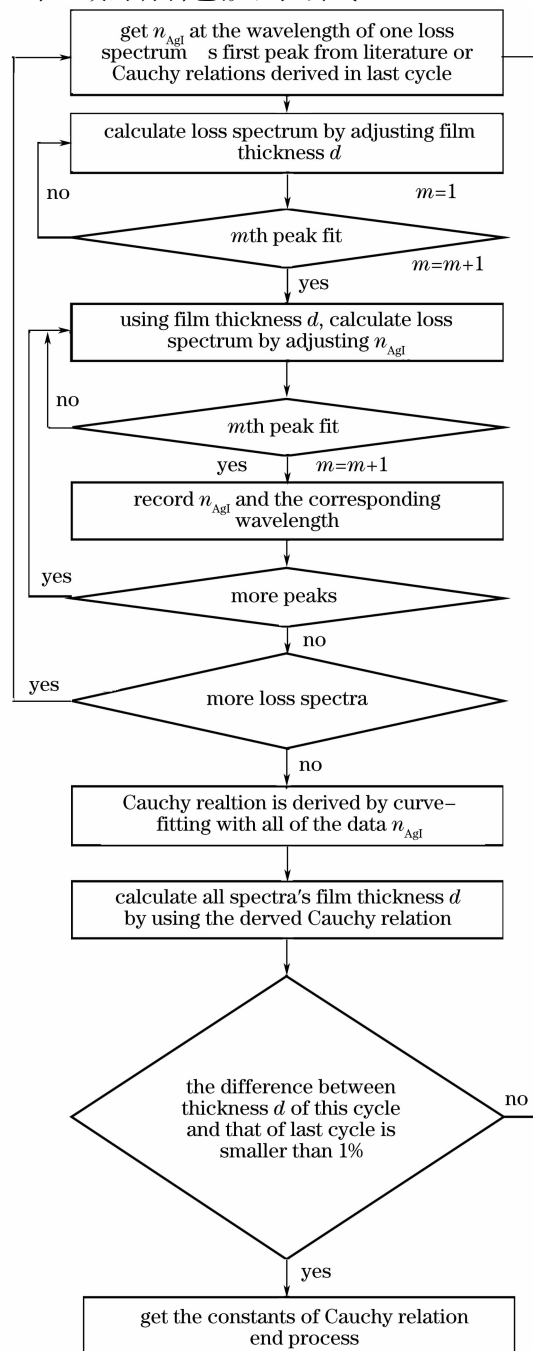


图 3 空芯光纤中介质膜材料色散计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of the material dispersion for the dielectric film in hollow fiber

7) 根据步骤 6) 获得的 AgI 薄膜的材料色散公式, 重复步骤 1)~6), 进行下一次迭代, 得到新的 AgI 材料色散柯西公式。当所有的损耗谱曲线在步骤 2) 中得到薄膜厚度参数与前一次迭代的结果相差小于 1% 时, 停止迭代。

经过以上的步骤, 最终可以得到单层介质膜泄漏型空芯光纤中 AgI 薄膜的材料色散公式 $n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ 。

整个计算过程的流程图如图 3 所示。

4 计算结果

使用第 3 节方法得到四种常用空芯光纤介质层材料^[14~17]在可见光和近红外区域的色散柯西公式。公式中相应参数如表 1 所列。

表 1 四种常用空芯光纤介质层材料的色散公式参数
Table 1 Dispersion parameters of four kinds of dielectric layer materials in hollow fiber

Material	A	B	C
SiO ₂	1.42614	0.02729	0.0001
Arton	1.52743	0.01855	0.00028
COP	1.50815	0.01653	-0.00026
AgI	2.0216	0.0878	-0.0024

为了验证计算所得数据的合理性, 首先比较了获得的 SiO₂ 的折射率曲线与文献[8]中提供的 SiO₂ 折射率数值。图 4 中的曲线 1 为采用第 3 节中方法拟合得到的 SiO₂ 折射率曲线, 曲线 2 为根据参考文献[8]中的数据采用柯西公式拟合的结果。可以看到, 两条曲线在可见光与近红外区域折射率都随着波长的减小而增加, 而本方法获得的曲线随波长变化更为显著。这是因为空芯光纤中 SiO₂ 是采用溶胶-凝胶工艺制备的光学薄膜^[14], 其光学特性与常见的块状 SiO₂ 有所不同, 会导致两者在折射

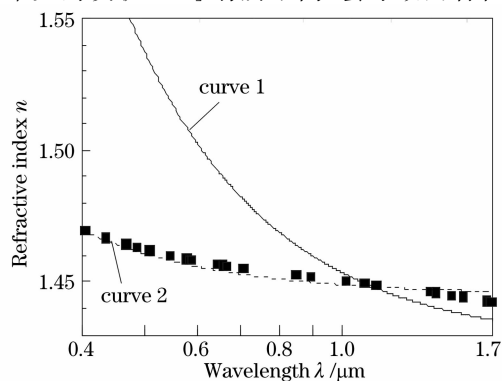


图 4 可见光与近红外波长 SiO₂ 材料色散曲线
Fig. 4 Material dispersion of SiO₂ in the visible and near-infrared regions

率数值上存在差异。图 5 中曲线 1 为采用上述方法得到的色散公式进行计算获得的损耗谱曲线, 曲线 2、3 分别是根据文献[8]中薄膜介质的材料色散以及不考虑材料色散情况下计算得到的结果。图 5 中实际测量的损耗谱曲线未参与到材料色散的计算过程中。从图 5 中可以看到曲线 1 和实际测量结果非常接近, 而曲线 2 与曲线 3 无法在可见光区域内准确地对空芯光纤的性能进行预估。

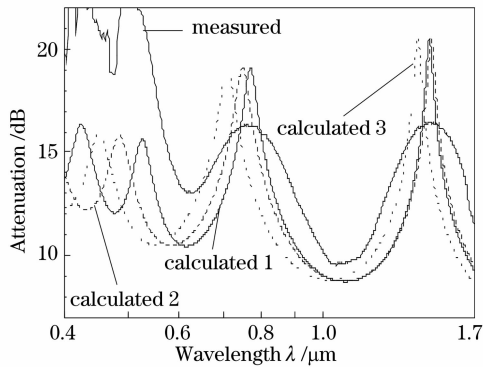


图 5 不同材料色散公式情况下的 SiO_2/Ag 空芯光纤损耗谱

Fig. 5 Loss spectra of SiO_2/Ag hollow fiber calculated by using different material dispersion formula. Measured loss spectrum is also shown for comparison

图 6~图 8 是使用获得的耐热透明树脂 (Arton)^[15]、环状丙烯树脂 (COP)^[16]、 AgI ^[17] 三种材料的色散公式计算得到的折射率曲线, 以及将其代入(3)式计算得到的空芯光纤损耗谱曲线和实验测量的损耗谱曲线。可以看到, 计算结果和实验测量结果在可见光与近红外区域的低损耗窗口位置一

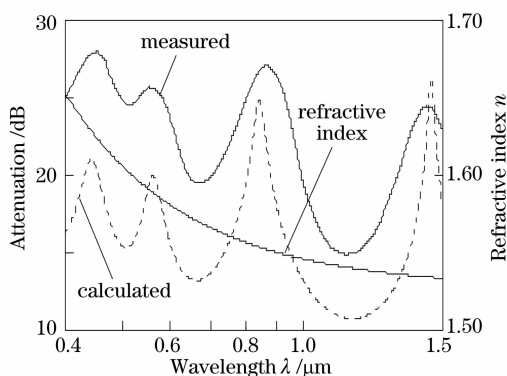


图 6 Arton 在可见光与近红外区域的材料色散及使用该结果计算的 Arton/Ag 空芯光纤损耗谱, 实测的损耗谱同样列出用于比较 SiO_2/Ag 空芯光纤损耗谱

Fig. 6 Refractive index of Arton in the visible and near-infrared regions and the calculated and measured loss spectra of Arton/Ag hollow fiber

致。说明采用本方法获得的材料色散公式, 能够更准确地预估空芯光纤在可见光与近红外区域内低损耗窗口的位置, 从而在多波长传输空芯光纤的设计过程中, 准确设计所需的空芯光纤介质层厚度参数。

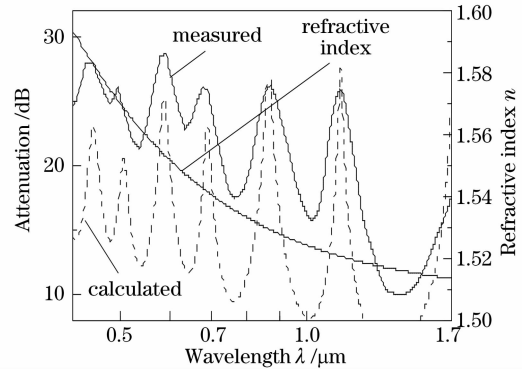


图 7 COP 在可见光与近红外区域的材料色散及使用该结果计算的 COP/Ag 空芯光纤损耗谱, 实测的损耗谱同样列出用于比较

Fig. 7 Refractive index of COP in visible and near-infrared regions and the calculated and measured loss spectra of COP/Ag hollow fiber

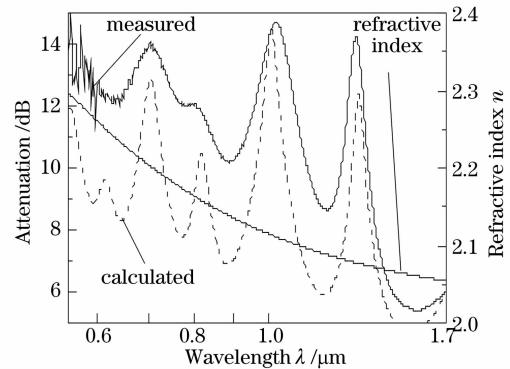


图 8 AgI 在可见光与近红外区域的材料色散及使用该结果计算的 AgI/Ag 空芯光纤损耗谱, 实测的损耗谱同样列出用于比较

Fig. 8 Refractive index of AgI in the visible and near-infrared regions and the calculated and measured loss spectra of AgI/Ag hollow fiber

5 结 论

本文针对现有文献和资料无法准确提供空芯光纤中介质层材料在可见光与近红外的材料色散情况的问题, 提出了一种能够更准确计算空芯光纤介质层材料折射率的方法。并使用该方法获得了 SiO_2 、Arton、COP、 AgI 四种材料在可见光与近红外区域的材料色散经验公式。使用该结果, 能够更精确地预估空芯光纤在可见光与近红外区域的低损耗窗口的位

置,并确定多波长传输空芯光纤设计时的介质层厚度参数,对空芯光纤的高性能化有重要的辅助作用。

参 考 文 献

- 1 James A. Harrington. A review of IR transmitting, hollow waveguides [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, **19**: 211~227
- 2 Cheng Tong-lei, Li Shu-guang, Zhou Gui-yao *et al.*. Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 249~254(in Chinese)
程同蕾, 李曙光, 周桂耀等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 249~254
- 3 Mingyang Chen, Rongjin Yu, Zhenguo Tian *et al.*. Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 63~65
- 4 M. Alaluf, J. Dror, R. Dahan *et al.*. Plastic hollow fibers as a selective infrared radiation transmitting medium [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(9): 3878~3883
- 5 Michal Němec, Helena Jelínková, Martin Fibrich *et al.*. Modification of midinfrared radiation spatial profile delivered by COP/Ag hollow glass waveguide [J]. *Laser Physics Letter*, 2007, **4**(10): 761~767
- 6 Zhu Xiaosong, Zhou Zhiyun, Shi Yiwei. Flexible infrared hollow fiber used in endoscopic laser light delivery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2123~2127(in Chinese)
朱晓松, 周志云, 石艺尉. 内窥镜的红外激光传输用柔性空芯光纤的研制[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2123~2127
- 7 Yukio Abe, Yuji Matsuura, Yi-Wei Shi *et al.*. Polymer-coated hollow fiber for CO₂ laser delivery [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 89~90
- 8 E. D. Palik. Handbook of optical constants of solids [M]. London: Academic Press, 1985
- 9 Yuji Matsuura, James A. Harrington. Hollow glass waveguides with three-layer dielectric coating fabricated by chemical vapor deposition [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(6): 1255~1259
- 10 Shen Weidong, Liu Xu, Ye Hui *et al.*. A new method for determination of the optical constants and thickness of thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 885~889(in Chinese)
沈伟东, 刘旭, 叶辉等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 885~889
- 11 Chen Yan-ping, Yu Fei-hong. Test methods for film thickness and optical constants [J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(6): 84~88(in Chinese)
陈燕平, 余飞鸿. 薄膜厚度与光学常数的主要测试方法[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(6): 84~88
- 12 Yuji Matsuura, Mitsunori Saito, Mitsunobu Miyagi *et al.*. Loss characteristics of circular hollow waveguides for incoherent infrared light [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(3): 423~427
- 13 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics, 7th edition [M]. Cambridge Univ. Press, 1999, Chap. 2: 94~98
- 14 Katsumasa Iwai, Mitsunobu Miyagi, Yi-Wei Shi *et al.*. Infrared hollow fiber with a vitreous film as the dielectric inner coating layer [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(23): 3420~3422
- 15 Song Ouyang, Yi-Wei Shi, Yuji Matsuura *et al.*. Rugged distal tips for CO₂ laser medicine [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2003, **35**: 65~68
- 16 Yi-Wei Shi, Kentaro Ito, Lin Ma *et al.*. Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(26): 6736~6740
- 17 Roshan George, James A. Harrington. Infrared transmissive, hollow plastic waveguides with inner Ag-AgI coatings [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30): 6449~6455