

氟化物玻璃光纤非本征散射损耗 的理论分析

刘备战* 李锡善 程瑞华

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

详细论述了存在于氟化物玻璃光纤中的散射缺陷所引起的非本征散射损耗, 计算并讨论了它与波长及缺陷尺寸的关系, 得出了一些有益的结论。

关键词 氟化物玻璃光纤, 光纤损耗。

1 引 言

以石英光纤为基础的光纤通信发展迅猛, 目前已进入第四代^[1]: 中继距离达近百公里, 在 $1.55\mu\text{m}$ 处的最低损耗已降至 0.2dB/km , 基本上接近理论极限损耗值 0.1dB/km . 因此, 就石英光纤而言, 很难再进一步降低其损耗以实现远距离(跨洋, 跨洲)的无中继光通信。

以氟锆酸盐为代表的氟化物玻璃光纤具有较宽的透光范围和较好的物理化学性质, 尤其是它在 $2\sim 3\mu\text{m}$ 波段的理论损耗可小于 0.01dB/km ^[2], 中继距离可达 4600km . 但是, 氟化物玻璃光纤的损耗在目前还比较大, 距理论值还比较远, 在 110m 长的光纤上测得的最好结果为 $0.65\text{dB/km}(2.95\mu\text{m})$.

光纤损耗一般包括吸收损耗和散射损耗, 散射损耗又包括由材料密度起伏所引起的瑞利散射损耗和由光纤中的散射缺陷所引起的非本征散射损耗. 从已有的研究结果^[3~5]来看, 非本征散射损耗是影响氟化物玻璃光纤损耗进一步降低的主要原因. 引起非本征散射损耗的散射缺陷的主要有微小的析晶、分相、未熔的氟化物等固体夹杂物和气泡等, 常见的固体夹杂物有 $\beta\text{-BaZrF}_6$, LaF_3 , AlF_3 , ZrF_4 和 ZrO_2 等晶体, 以及从坩埚上侵蚀下来的铂金颗粒. 对这些散射缺陷的散射行为进行分析和研究, 将有助于采取措施使光纤损耗进一步降低.

本文借助米氏散射理论^[6]对光纤的非本征散射损耗进行详细的分析和研究。

2 物理模型及讨论

图1是由米氏散射理论建立的简单模型^[7,8]. 假设: 折射率为 n_0 的均匀介质中包含着一些半径为 a , 折射率为 n_1 的球形颗粒, 而且单位体积内的颗粒数 n 很少, 使不同小球间的散射互不影响. 这里, 均匀介质代表氟化物玻璃光纤纤芯, 球形颗粒代表散射缺陷. 定义下

收稿日期: 1991年10月15日; 收到修改稿日期: 1992年1月20日

* 现在中国建筑材料研究院石英所工作, 北京 100024.

列参数^[9]: 相对折射率 $m = n_1/n_0$, 相对尺寸 $x = 2\pi a(n_0/\lambda_0)$, 相位移 $\rho = 2x(m-1)$.



Fig. 1 Model of fluoride glasses fiber containing scattering defects

米氏散射理论中的一个关键参数是散射效率因子 Q , 即真正的散射截面与几何散射截面的比, 它与散射消光系数 ε (即散射系数) 的关系为^[7]:

$$\varepsilon = n\pi a^2 Q \quad (1)$$

若入射光强为 I_0 , 出射光强为 I , 则:

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon) = I_0 \exp(-n\pi a^2 Q) \quad (2)$$

该模型的散射损耗系数为 α (dB/km)

$$\alpha = N/L(10/\ln 10)(a/r)^2 Q \quad (3)$$

式中: L (km) 为光纤总长度, r 为光纤芯径, N 为在此长度内总的散射缺陷数.

光纤中单个粒子的散射损耗为 α_p

$$\alpha_p = (10/\ln 10)(a/r)^2 Q \quad (\text{dB/particle}) \quad (4)$$

则光纤中的散射损耗可以写成

$$\alpha_s = (N/L)\alpha_p \quad (5)$$

Q 的大小与光波的波长、散射颗粒与介质的相对折射率及颗粒的尺寸有关. 下面就几种与氟化物玻璃光纤有关的情形分别进行讨论:

1) 很小的球形颗粒, 中等折射率, 即 $x \ll 1$, m 为各向同性, 则

$$Q = 8/3 x^4 |(m^2 - 1)/(m^2 + 1)|^2 \quad (6)$$

这便是大家熟悉的瑞利散射, 与波长的 4 次方成反比.

2) 中等尺寸的球形颗粒, 即 m 接近于 1, $1 \ll x \ll 1/2|m-1|$, 且 $|m-1| \ll 1$, 则

$$Q = 2(m-1)^2 x^2 \quad (7)$$

3) 中等尺寸的球形颗粒, m 为各向同性, 当 $m < 2$ 时,

$$Q = 2 - (4/\rho)\sin \rho + (4/\rho^2)(1 - \cos \rho) \quad (8)$$

这其中又可分为两种情形: 当 $\rho \gg 1$ 时, $Q = 2$; 当 ρ 为中等数值大小时 ($\rho < 1$), $Q = \rho^2/2$.

4) 金属球形颗粒 (如铂金颗粒), 必须利用复折射率进行计算, Q 表达式可写成:

$$Q = Q_{\text{scatter}} + Q_{\text{absorption}} \quad (9)$$

3 计算结果

根据上面的模型, 视 ZBLAN 光纤为均匀介质, 对其中可能存在的几种散射缺陷的非本征散射损耗进行计算和分析.

ZBLAN 光纤的折射率 $n_2 = 1.5$, 芯径 $r = 100 \mu\text{m}$. 表 1 列出了存在的散射缺陷的种类和特性, 表 2 列出了不同尺寸的种种散射缺陷的散射损耗系数与波长的关系, 表 3 列出了在 $2.55 \mu\text{m}$ 处散射缺陷的尺寸与散射损耗系数 α_p 的关系. 图 2 给出了在 $2 \mu\text{m}$ 处各种散射缺陷的散射效率因子 Q 相对尺寸 x 的关系, 图 3 给出了散射损耗系数与散射颗粒尺寸之间的关系.

Table 1 The type and properties of scattering defects in ZBLAN glass fiber

defect	n_1	m	Size (μm)	relation with λ
ZrF ₄	1.59	1.06	1~5	λ^{-2}
ZrO ₂	2.18	1.453	10	λ^0
LaF ₃	1.60	1.07	>3	λ^{-2}, λ^0
β -BaZrF ₈	1.515	1.01	50~100	λ^0
Gas Bubble	1.00	0.67	0.3~50	λ^{-2}, λ^0
P_1 particle	$n-ik$		0.1~0.5	λ^0

Table 2 The relations between scattering factors of the defects and wavelength

	α_p	α_p	α_p	α_p
Size (μm)	$2_a=0.01$	$2_a=0.1$	$2_a=1$	$2_a=10$
ZrF ₄	$3.24 \times 10^{-16}/\lambda^4$	$2.24 \times 10^{-10}/\lambda^4$	$1.74 \times 10^{-5}/\lambda^2$	0.022
ZrO ₂	$1.04 \times 10^{-14}/\lambda^4$	$1.04 \times 10^{-8}/\lambda^4$	$9.9 \times 10^{-4}/\lambda^2$	0.022
LaF ₃	$2.78 \times 10^{-16}/\lambda^4$	$2.78 \times 10^{-10}/\lambda^4$	$2.17 \times 10^{-5}/\lambda^2$	0.022
β -BaZrF ₈	$6.32 \times 10^{-18}/\lambda^4$	$6.32 \times 10^{-12}/\lambda^4$	$4.82 \times 10^{-7}/\lambda^2$	0.022
Gas Bubble	$7.37 \times 10^{-15}/\lambda^4$	$7.39 \times 10^{-9}/\lambda^4$	$5.36 \times 10^{-4}/\lambda^2$	0.022

Table 3 The relations between scattering loss factor and defect size in several kinds of defects at 2550 nm

	α_p	α_p	α_p
	$a < 0.27 \mu\text{m}$	$0.27 \mu\text{m} < a < 8.3 \mu\text{m}$	$a > 8.3 \mu\text{m}$
ZrF ₄	$3.38 \times 10^{-4} a^4$	$4.27 \times 10^{-5} a^2$	$8.69 \times 10^{-4} a^2$
ZrO ₂	$1.59 \times 10^{-2} a^2$	$2.44 \times 10^{-3} a^2$	$8.69 \times 10^{-4} a^2$
LaF ₃	$4.21 \times 10^{-4} a^4$	$5.33 \times 10^{-5} a^2$	$8.69 \times 10^{-4} a^2$
β -BaZrF ₈	$9.57 \times 10^{-6} a^4$	$1.19 \times 10^{-6} a^2$	$8.69 \times 10^{-4} a^2$
Gas Bubble	$1.09 \times 10^{-2} a^4$	$1.29 \times 10^{-3} a^2$	$8.69 \times 10^{-4} a^2$

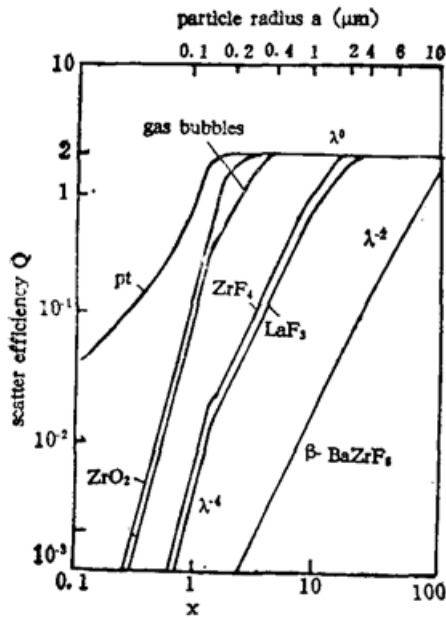


Fig. 2 The relations between scattering efficiency factors Q and X in several kinds of defects

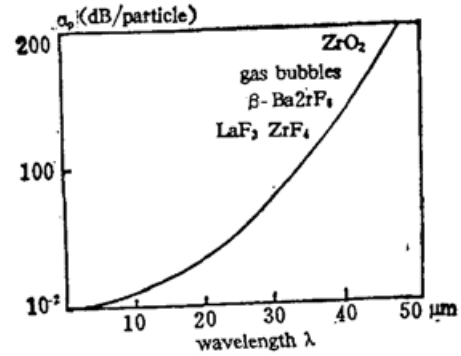


Fig. 3 The relations between scattering loss factor and size of defect at 2550 nm

4 结 论

根据计算结果和绘出的曲线, 得到结论如下:

1) 在氟化物玻璃光纤中, 相对折射率较大的散射缺陷所引起的散射损耗比较大, 如 ZrO_2 , Gas Bubbles 和 Pt 粒子等是主要的散射源. LaF_3 和 ZrF_4 析晶颗粒的相对折射率比较小, 因而由它们引起的散射损耗也比较小.

2) 随着散射缺陷尺寸的增大, 散射损耗与波长的关系逐渐由瑞利散射转变为瑞利-汉斯散射, 当尺寸增大到一定程度时, 便成为与波长无关的散射.

3) 在红外波段, 本征散射比较小, 影响氟锆酸盐玻璃光纤散射损耗的主要机制为瑞利-汉斯散射及与波长无关的散射, 这一点从目前光纤所存在的散射缺陷的尺寸分布可以得到证实(参见表 2).

本文对氟化物玻璃光纤非本征散射损耗的理论分析, 对于改进光纤拉制工艺, 降低光纤损耗具有一定的指导意义.

参 考 文 献

- [1] 张 煦. 光纤通信的发展过程和应用前景. 电子学报, 1988, 16 (4): 109~112
- [2] S. Shibata, M. Horiguchi, K. Jinguji, *et al.*, Prediction of Loss Minima in Infrared Optical Fibers. *Electron. Lett.*, 1981, 17 (21): 775
- [3] S. F. Carter, P. W. France, J. R. Williams, Origins of Scattering Centers in ZrF_4 -Based Infrared Fibers, and Reduction of Loss. *7th Int. Symp. on Halide Glasses*, Australia, Lorne: Monash University, 1991, Apr. 17~21: 8.35~8.36
- [4] I. Aggarwal, J. S. Sanghera, B. Harbison, *et al.*, Origin and Reduction of Scattering Losses In Fluoride Glasses and Fibers. *6th Int. Symp. on Halide Glasses*, (Germany, Berlin: Technical University of Clausthal-Zellerfeld, 1989, Oct. 1~5: 25~34
- [5] M. W. Moore, P. W. France, S. F. Carter *et al.*, Scattering Losses in Fluoride Glass Fiber. *6th Int. Symp. on Halide Glasses*, Germany, Berlin: Technical University of Clausthal-Zellerfeld, 1989, Oct. 1~5: 6~15

- [6] P. W. France, S. F. Carter, M. W. Moore *et al.*, Ultimate Realistic Losses of ZrF₄-Based IR Fibers. *Proc. SPIE*, 1986, **618**: 51~57
- [7] G. Mie, *Ann., Physik*, 1908, **25**: 377
- [8] H. C. Van de Hulst, Light Scattering By Small Particles, Dover, New York, 1981. Chap. 9.
- [9] Hideo Hattori, Shigeki Sakaguchi, Teruoshi Kanamori *et al.*, Scattering characteristics of crystallites in fluoride optical fibers. *Appl. Opt.*, 1987, **26** (18): 2683~2687

Theoretical analyses of extrinsic scattering loss in fluoride glass fiber

LIU BEIZHAN LI XISHAN CHENG RUIHUA

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 15 October 1991; revised 20 January 1992)

Abstract

In this paper, the extrinsic scattering loss induced by the defects in fluoride fiber has been described in detail. The relationship among the extrinsic scattering loss and the optical wavelength and size of defects has been discussed and some new conclusions have been drawn. These work leads to some directions for improving the fiber drawing technique and decreasing the fiber loss.

Key words the fluoride glass fiber, fiber loss.