

铋镓共掺的高浓度掺铒石英基光纤中 铒离子团簇率的实验研究^{*}

常德远^{1)†} 郑凯¹⁾ 卫延¹⁾ 李彬¹⁾ 傅永军¹⁾ 魏淮¹⁾ 简水生¹⁾

1) 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

2) 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2007 年 3 月 20 日收到, 2007 年 5 月 21 日收到修改稿)

使用 MCVD 法结合溶液掺杂技术制作了铋镓共掺的石英基光纤. 根据光纤吸收谱, 得出其中铒离子浓度是 $5.24 \times 10^{25} / \text{m}^3$. 然后提出了一种新的利用透射率测定掺铒光纤的团簇率的实验方法, 该方法相比于以前的方法更简单有效. 利用该方法, 测得了自制铋镓共掺光纤中团簇率. 通过与前人的结果相比较, 充分说明铋和镓的掺入大大提高了铒离子在石英基光纤中的溶解度, 抑制了铒离子形成团簇.

关键词: 掺铒光纤, 石英基光纤, 团簇, 高浓度

PACC: 7630K, 3640, 3250F

1. 引言

为了减小掺铒光纤器件的长度, 要求光纤中掺入的铒离子浓度必须足够高. 但高的掺杂浓度, 会因为多个铒离子共享非桥接氧而形成团簇, 也会因为 OH^- 等杂质离子的存在, 使得多个铒离子与杂质离子形成团簇. 在这些团簇内, 能量转移速率非常快, 在 ns 量级, 是浓度猝灭最重要的机理之一^[1]. 降低铒离子团簇率是高浓度掺铒光纤制作的难点, 一直是人们的研究热点^[1-3]. 通过选择合适的基质材料可以实现低团簇率的高浓度铒离子掺杂; 常见的几种基质材料有磷酸盐玻璃^[4]、氟化物玻璃^[5]、亚碲酸盐玻璃^[6]、碲酸盐玻璃^[7]、铋基玻璃^[8,9]等.

但在光纤通信系统中, 上述基质的掺铒光纤由于与石英光纤熔接困难等原因很难实际应用. 而石英基掺铒光纤具有与传统光纤兼容性好、熔接损耗小、耐热性好等优点. 为了既能提高铒离子在光纤中的溶解度, 又能保持石英光纤的优点, 可以在石英基光纤中掺入一些金属元素, 从而改变铒离子周围的近邻结构, 以此来实现石英基光纤中铒离子的高掺杂^[10,11]. 我们选用金属元素铋和镓, 采用 MCVD 法结合溶液浸泡法自制了铋镓共掺的高浓度掺铒石英基

光纤(ErBiGa 光纤)^[12].

本文提出了一种新的测试稀土离子团簇率的实验方法, 并利用该方法测试得到了所研制的 ErBiGa 光纤中的铒离子团簇率, 从实验角度证明了铋和镓的掺入有助于提高铒离子在石英基光纤中的溶解度, 铋和镓抑制了铒离子团簇, 使掺入的铒离子浓度大大提高.

2. 测试原理

利用透射率来测试掺杂光纤中稀土离子团簇率的方法目前有两种. 一种是根据透射率与抽运功率的关系曲线并结合速率方程进行数值拟合, 得出团簇率^[13,14], 但因为此方法忽略了光纤的背景损耗和耦合损耗, 且需事先知道稀土离子浓度、吸收截面和发射截面等参数进行数值拟合, 如参数选择不当容易引入较大误差; 对于 MCVD 法结合溶液浸泡法制作的掺稀土光纤, 精确测试稀土离子浓度还需要昂贵的设备. 另一种是文献[3]中的非破坏性实验方法, 该方法考虑了光纤中的背景损耗、耦合损耗, 相对于第一种方法更简单而精确, 但此方法需要插值估算铒离子吸收带内的背景损耗和耦合损耗, 这样易引入误差; 且求解团簇率 k 的式子中消去了两个

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2004AA31G200 资助的课题.

[†] E-mail: cader8@163.com

测试波长处耦合损耗的差值项, 如果两个波长相距较远(根据文献[3]), 两个测试波长间隔一般都需要~80 nm), 这个消去项也会引入系统误差。

为更简单有效的通过实验测得光纤中的团簇率, 本文提出了一种新的实验方法, 该方法相比文献[3]的方法更简单有效。

团簇率 k 的定义为^[3]

$$k = N_q / N_0, \quad (1)$$

其中, N_q 是因为团簇而猝灭的铈离子浓度, N_0 是光纤中总的铈离子浓度。

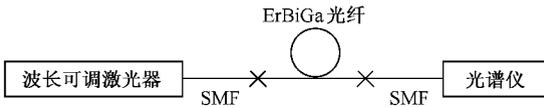


图1 光纤相对透射率测试装置图(SMF表示普通单模光纤)

测量实验装置如图1, 需测试两个邻近波长处的相对透射率。相对透射率定义为 $T = P_2 / P_1$ ^[3], 其中 P_1 和 P_2 分别是激光器的输出功率和经过光纤后光谱仪接收的功率。激光器输出功率 P_1 很小时得到低功率相对透射率 T_L , P_1 增大到使铈离子反转率达到饱和时得到高功率相对透射率 T_H 。激光器和光纤的耦合损耗、待测的 ErBiGa 光纤和普通单模光纤的熔接损耗以及 ErBiGa 光纤自身的吸收损耗和背景损耗等因素都会影响 T 的值。

实验步骤如下:

1) 测定不同激光器输出功率下吸收带内的波长 λ_1 处对应的相对透射率值。激光器输出功率从最小输出到最大输出改变, 测定吸收带内的波长 λ_1 处对应的相对透射率值。

2) 依第1)步相同的方法测定吸收带内与 λ_1 波长间隔较小 ($\Delta\lambda \leq 10$ nm) 的波长 λ_2 处的不同激光器输出功率下对应的相对透射率值。

3) 经过数据处理得到两个波长处的高功率相对透射率 $T_H(\lambda_1)$, $T_H(\lambda_2)$ 与低功率相对透射率 $T_L(\lambda_1)$, $T_L(\lambda_2)$ 。依据文献[3], 激光器小功率输出下相对透射率曲线接近一水平值, 这一水平值即 T_L , 而大功率下铈离子饱和反转时相对透射率曲线也接近一水平值, 这一水平值即 T_H 。

以上所测定的四个量可表示如下^[3]:

$$T_H(\lambda_1) = \exp(-\delta_1) \exp(-\sigma_1 \Gamma_1 N_q L) \exp(-\alpha_1 L), \quad (2)$$

$$T_L(\lambda_1) = \exp(-\delta_1) \exp(-\sigma_1 \Gamma_1 N_0 L) \exp(-\alpha_1 L), \quad (3)$$

$$T_H(\lambda_2) = \exp(-\delta_2) \exp(-\sigma_2 \Gamma_2 N_q L) \exp(-\alpha_2 L), \quad (4)$$

$$T_L(\lambda_2) = \exp(-\delta_2) \exp(-\sigma_2 \Gamma_2 N_0 L) \exp(-\alpha_2 L), \quad (5)$$

式中 δ_1, δ_2 分别是 λ_1, λ_2 波长处的耦合损耗与熔接损耗之和; α_1, α_2 分别是两波长处的背景损耗; σ_1, σ_2 和 Γ_1, Γ_2 表示对应波长处的吸收截面与重叠积分; L 是掺铈光纤的长度。

由(1)到(5)式, 提出了有别于文献[3]的团簇率 k 的另一个表达式:

$$k = \frac{\ln[T_H(\lambda_1) T_H(\lambda_2)] + \Delta}{\ln[T_L(\lambda_1) T_L(\lambda_2)] + \Delta} = \frac{(\sigma_2 \Gamma_2 - \sigma_1 \Gamma_1) N_q L}{(\sigma_2 \Gamma_2 - \sigma_1 \Gamma_1) N_0 L}, \quad (6)$$

其中 $\Delta = (\delta_1 - \delta_2) + (\alpha_1 - \alpha_2) L$ 。由于两个测试波长 λ_1, λ_2 间隔较小 ($\Delta\lambda \leq 10$ nm), 因此 $\delta_1 \approx \delta_2, \alpha_1 \approx \alpha_2$, 即 $\Delta \approx 0$ 。此时, 团簇率 k 即可通过下式得到:

$$k = \frac{\ln[T_H(\lambda_1) T_H(\lambda_2)]}{\ln[T_L(\lambda_1) T_L(\lambda_2)]}. \quad (7)$$

因此不需要测定背景损耗等其他参数即可得到团簇率 k 。实验中的测试波长 λ_1, λ_2 的选取会严重影响实验结果, λ_1, λ_2 尽量接近可更好满足近似条件 $\Delta \approx 0$, 但如相距太近, 吸收截面 σ_1 与 σ_2 之间的差值就会很小, 由(2)~(5)式可知, 测得的 $T_H(\lambda_1)$ 与 $T_H(\lambda_2)$, $T_L(\lambda_1)$ 与 $T_L(\lambda_2)$ 之间的差值也会很小, 很容易湮没在仪器的测量误差中, 这时根据(7)式就得不到正确的团簇率, λ_1 与 λ_2 的选取标准是

1) 使 σ_1 与 σ_2 的差值尽量大;

2) $\Delta\lambda \leq 10$ nm。

另外, 因为 ErBiGa 光纤中铈离子浓度高, 测试时光纤长度 L 的选择也至关重要。如果 L 选得太短, 那么激光器的最低输出功率就能使光纤中未成团铈离子几乎全部反转而达到饱和, 从而测不到正确的 T_L ; 反之, 如果 L 选得太长, 使铈离子完全反转达到饱和状态所需的激光器功率会超过激光器最高输出功率, 同样得不到正确的 T_H 。光纤长度 L 和测试波长 λ_1, λ_2 合理选取的重要性在下面的实验结果中会有进一步说明。

3. 实验及结果分析

首先采用 MCVD 法结合溶液掺杂技术制作出了

ErBiGa 光纤,用 Photon Kinetics 公司的 PK2210 谱损耗分析仪测试得 ErBiGa 光纤在 1450—1600 nm 的吸收谱,见图 2.

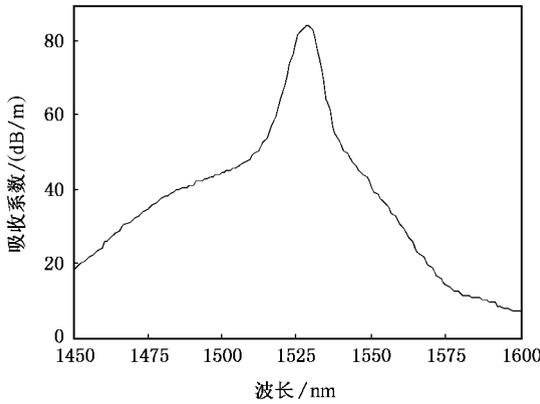


图 2 BiGaEr 光纤的吸收谱

通过光纤吸收系数 α 和铒离子吸收截面 σ 、重叠积分因子 Γ 和总铒离子浓度 N_0 的关系式来估算总的铒离子浓度^[15]:

$$\alpha = \sigma * \Gamma * N_0. \quad (8)$$

从图 2 的吸收谱中读得光纤 1550 nm 的吸收系数是 41 dB/m,铒离子 1550 nm 处吸收截面值^[15]取 $3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,重叠积分因子取 0.6,可以估算得铒离子浓度大约是 $5.24 \times 10^{25} / \text{m}^3$.

用图 1 所示的装置测试光纤的相对透射率.光谱仪使用 ANDO 公司的 AQ6319.可调波长激光器用 Agilent 公司的 Agilent8164A.此激光器的输出功率范围是 -10 dBm—10 dBm.从图 2 的吸收谱看到,1530 nm 附近的吸收谱曲线非常陡峭,根据前述测试波长选择标准, λ_1, λ_2 应在 1530 nm 左右 10 nm 范围内选取.由于 ErBiGa 光纤吸收系数很大,为在现有激光

器的 mW 级输出功率条件下使铒离子反转率达到饱和,光纤长度只能选 cm 量级.

为说明如何选取光纤长度 L 和测试波长 λ_1, λ_2 ,选取了两段不同长度光纤分别在 1530 nm,1535 nm 和 1538 nm 三个波长处测试了光纤的相对透射率.一段光纤长 3.7 cm,一段光纤长 1.2 cm,分别测得的光纤相对透射率随激光器输出功率的变化如图 3 所示.在激光器的输出功率范围内,1.2 cm 长的光纤三个波长各自的相对透射率的值没有大的陡降,如图 3(b)所示;这是因为 1.2 cm 光纤太短,如前述原因,无法得到正确的 T_L .而由图 3(a)可看出,在每个波长处,3.7 cm 光纤在激光器输出功率很小时所测得相对透射率值均趋于一致,此时即小功率输入状态,取此状态下相对透射率的平均值,得到 T_L .随着激光器输出功率逐渐增大,测得相对透射率的值跃升到另一平台,即饱和状态,取此状态下相对透射率的平均值,得 T_H .结果如表 1 所示.

表 1 3.7 cm 长 ErBiGa 光纤在三个波长处测得的高、低相对透射率

光纤长度/cm	波长/nm	T_H	T_L
3.7	1530	0.5258	0.326
	1535	0.5425	0.374
	1538	0.5445	0.401

用 3.7 cm 长的光纤来测定团簇率 k ,有三个波长选取方案,结果如下:

- 1) $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}, \lambda_2 = 1535 \text{ nm}$,团簇率 $k_1 = 0.24$.
 - 2) $\lambda_1 = 1530 \text{ nm}, \lambda_2 = 1538 \text{ nm}$,得到 $k_2 = 0.18$.
 - 3) $\lambda_1 = 1535 \text{ nm}, \lambda_2 = 1538 \text{ nm}$,得到 $k_2 = 0.05$.
- 前两个波长选取方案求得的团簇率较接近,分

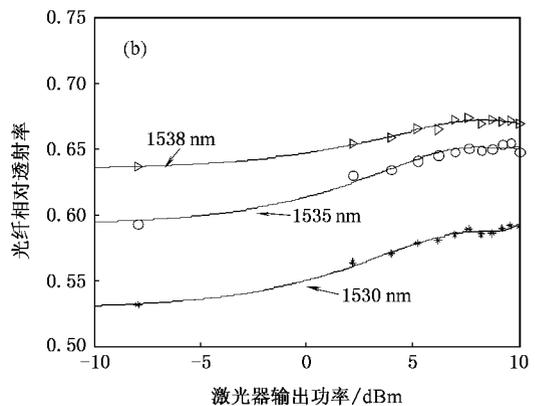
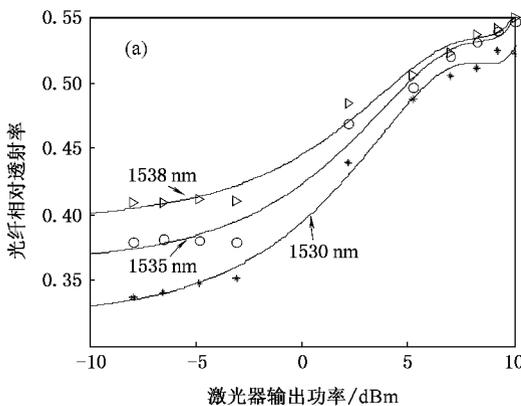


图 3 光纤相对透射率随激光器输出功率变化的实验数据和拟合曲线(3 阶) (a) 光纤长度为 3.7 cm (b) 光纤长度为 1.2 cm

别是 0.24 与 0.18. 而第三个方案相差太大, 仅为 0.05; 从图 2 的吸收谱可看到 ErBiGa 光纤在 1535 nm 和 1538 nm 处的吸收系数相差较小, 根据(1)~(4)式, 这两波长处的相对透射率相近, 由于仪器的误差, 图 3(a)中这两波长处光纤相对透射率的数值已相互重叠, 从而求得错误的团簇率, 说明第三个波长选择方案是不合理的. 前两个波长选择方案被选波长的吸收系数相差都比较大, 都满足近似条件 $\Delta \approx 0$, 这里认为激光器输出功率的波动以及光谱仪的漂移等因素造成了两个方案的结果差异, 自制 ErBiGa 光纤团簇率的结果取两个结果的平均得 0.21. 测试结果的详细的数据处理过程与误差分析将另文讨论.

文献 [1] 中, 铈离子浓度是 $1.6 \times 10^{25}/\text{m}^3$ 时的团簇率是 0.22, 自制的 ErBiGa 光纤在铈离子浓度提高到 $5.24 \times 10^{25}/\text{m}^3$ 高浓度的情况下团簇率也仅为 0.21. 这说明铋和镓的掺入的确有利于提高铈离子在 SiO_2 玻璃网络中的溶解度, 降低铈离子的团簇率. 如对铋和镓的掺入浓度和制棒过程进行优化, 应可进一步降低铈离子的团簇率或者提高铈离子的掺入浓度.

4. 结 论

本文经公式推导提出了一种简单的测试铈离子团簇率的方法, 只需要测定两个邻近波长的高、低功率相对透射率即可得到光纤中铈离子的团簇率. 与文献 [3] 的方法相比, 步骤简单, 不需要测试小信号的透射率, 也不需进行插值, 而且在一定程度上消除了文献 [3] 中测试方法引入的系统误差. 与文献 [13] 中的数值拟合法相比, 不需知道光纤中的稀土离子浓度、吸收截面、发射截面、背景损耗等重要参数即可通过简单测试求出团簇率的值. 此方法在测定高浓度掺稀土光波导的团簇率方面具有广阔的用途.

自行研制的 ErBiGa 光纤中的铈离子浓度达到了 $5.24 \times 10^{25}/\text{m}^3$. 利用自主提出的方法测试得 ErBiGa 光纤的铈离子团簇率为 0.21, 相对较低. 说明掺铋、镓有助于提高石英基光纤中铈离子的溶解浓度, 这就为高浓度掺铈石英基光纤的研制提供了一个行之有效的办法. 这种 ErBiGa 光纤在制作光纤通信用放大器和单频窄带激光器方面有着良好的应用前景.

-
- [1] Deleuaque E, Georges T, Monerie M et al 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 73
- [2] Wagener J L, Wysocki P F, Digonnet M J F, Shaw H J et al 1993 *Opt. Lett.* **18** 2014
- [3] Ye C C, Jaskorzynska B, Helmfriid S et al 1998 *App. Opt.* **37** 6362
- [4] Hwang B C, Jiang S, Luo T et al 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 197
- [5] Scott S H, Akasaka Y, Kubota Y et al 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 425
- [6] Mori A, Kobayashi K, Yamada M 1998 *IEEE Eletro. Lett.* **34** 887
- [7] Chen B Y, Liu Y H, Chen D D et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2374 (in Chinese) [陈炳炎、刘粤惠、陈东丹等 2005 物理学报 **54** 2374]
- [8] Yang J H, Dai S X, Wen L et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 508 (in Chinese) [杨建虎、戴世勋、温 磊等 2003 物理学报 **52** 508]
- [9] Tanabe S, Sugimoto N, Ito S et al 2000 *J. Luminescence* **87-89** 670
- [10] Philips J E 2005 *Ph. D. thesis* (New Brunswick: Rutgers University), 2
- [11] Tanabe S 1999 *J. Non-Cryst. Solids* **311** 107
- [12] Zheng K, Chang D Y, Fu Y J et al 2007 *Chinese Physics* **16** 478
- [13] Davis M K, Digonnet M J F, Pantell R H 1995 *IEEE J. Lightwave Technol.* **13** 120
- [14] Feng Z H, Zheng Z Q, Liu Z G et al 2006 *Chinese J. Lasers* **33** 914 (in Chinese) [冯卓宏、郑志强、刘志高等 2006 中国激光 **33** 914]
- [15] Giles C R, Desurvire E 1991 *IEEE J. Lightwave Technol.* **9** 271

Experimental research on the degree of clustering in Bi^{3+} - Ga^{3+} co-doped high concentration Er^{3+} -doped silica-based fiber^{*}

Chang De-Yuan^{1,2,†} Zheng Kai¹⁾ Wei Yan¹⁾ Li Bin¹⁾ Fu Yong-Jun¹⁾ Wei Huai¹⁾ Jian Shui-Sheng¹⁾

1) (Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 20 March 2007; revised manuscript received 21 May 2007)

Abstract

In order to obtain high-concentration doped erbium ions in silica-based fiber, we manufactured Er^{3+} - Bi^{3+} - Ga^{3+} co-doped fiber using MCVD and solution doping technique. The concentration of Er^{3+} in the fiber was about $5.24 \times 10^{25}/\text{m}^3$. We described a new method to measure the degree of clustering in the Er^{3+} - Bi^{3+} - Ga^{3+} co-doped fiber using fiber transmission experiment. Compared with other methods, the new method is simpler and more accurate. By the new method, the degree of clustering in Er^{3+} - Bi^{3+} - Ga^{3+} co-doped fiber was determined. It was shown that co-doped Bi^{3+} - Ga^{3+} strongly increased the Er^{3+} solubility in the silica-based fiber.

Keywords : erbium-doped fiber, silica-based fiber, cluster, high concentration

PACC : 7630K, 3640, 3250F

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2004AA31G200).

[†] E-mail: cader8@163.com