

石英基掺 Yb^{3+} 光纤中 Al^{3+} 共掺特性的研究*

延凤平† 王 琳 魏 淮 傅永军 简 伟 郑 凯 毛向桥 李 坚 刘利松 彭 健 简水生

(全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2007 年 11 月 28 日收到,2008 年 1 月 3 日收到修改稿)

基于实验测试结果分析了用于大功率光纤激光器的石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤中 Al^{3+} 共掺的特性.揭示出在高掺 Yb^{3+} 的石英基光纤中,共掺 Al^{3+} 的摩尔浓度为 Yb^{3+} 摩尔浓度的 9—11 倍时既可以减小 Yb^{3+} 的浓度猝灭概率,又可以获得高吸收系数,同时还可更好地满足数值孔径的要求的结论.在此基础上利用 MCVD 设备并结合湿法掺杂工艺制作出多根石英基掺 Yb^{3+} 光纤预制棒,对拉丝后光纤的相关参数测试表明,通过精确控制疏松层的沉积温度,掺 Yb^{3+} 光纤在 976 nm 波长的吸收系数可高达 620 dB/m,且重复性好.这一结论为共掺 Al^{3+} 的掺 Yb^{3+} 光纤制作提供了良好的借鉴作用.

关键词:石英基掺 Yb^{3+} 光纤, Al^{3+} 共掺,吸收系数,浓度猝灭

PACC:4281B,4281C,7630K

1. 引 言

利用中心工作波长为 976 nm 或 914 nm 的大功率激光器(LD)作为抽运源,对可承载高光功率的石英基掺 Yb^{3+} 光纤进行包层抽运,可获得输出功率达到 kW 级的掺 Yb^{3+} 包层抽运光纤激光器(YDFL)^[1-4].影响大功率石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤激光器输出功率的主要因素有抽运激光器功率、热效应及受激拉曼散射等,当抽运激光器工作在 976 nm 波长时,石英基掺 Yb^{3+} 光纤具有对抽运光很强的吸收效应和较小的量子数亏损,因而具有对抽运光相当高的功率转换效率(>80%),同时其热损耗功率一般在 20 W/m 以下.但是,由于 Yb^{3+} 在 976 nm 处的吸收峰非常尖锐,因此当抽运激光中心工作波长距 976 nm 稍有偏离时, Yb^{3+} 对抽运光的吸收效率就会显著下降,严重降低对抽运光的功率转换效率.当抽运激光器工作于 914 nm 波长时,虽然石英基掺 Yb^{3+} 光纤对其具有比 976 nm 波长处低得多的吸收效率(在 914 nm 处的吸收 dB 数约为 976 nm 处吸收 dB 数的 0.33 倍),但是由于此时石英基掺 Yb^{3+} 光纤对抽运光的吸收峰较为平坦,因此抽运激光器工作波长的稍许偏离不会导致其对抽运光的吸收效率的显著下降.因此在抽运激光器工作波长较

为稳定的场合,可选择 976 nm 作为其工作波长.而当抽运激光器工作波长不稳定的场合,需要选择 914 nm 作为其工作波长.另外,为了减少受激拉曼散射等非线性效应,在保证光束质量的前提下应尽量增大芯径.因此,用于大功率光纤激光器的石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤不仅要吸收系数高、荧光寿命长,而且其数值孔径(NA)应尽量低,从而减少传输模式的数量.

制作上述高性能的用于大功率光纤激光器的石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤需要引入共掺质,如 Al_2O_3 , P_2O_5 等.其目的是利用 Al^{3+} 和 P^{5+} 等离子形成网格,将稀土离子 Yb^{3+} 隔开,不仅可以防止稀土离子的浓度猝灭,提高其溶解度,便于高浓度掺杂,而且还可以提高石英基光纤的折射率^[5,6].另外, Al_2O_3 , P_2O_5 等作为石英共掺质还可以改变稀土离子的发射截面特性^[5],便于光纤放大器增益谱的扩展和平坦化.因此,共掺质对于高性能的高浓度稀土离子掺杂光纤的制作和参数优化极其重要.有关文献中已经深入分析了 Al_2O_3 , P_2O_5 等共掺质对石英基掺 Nd^{3+} , Er^{3+} 光纤的影响^[7-10],而从理论和实验等方面深入分析这些共掺质对石英基掺 Yb^{3+} 光纤的影响鲜有报道.

本文基于实验测试结果分析了用于大功率光纤

* 国家自然科学基金(批准号:60577034)资助的课题.

† E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

激光器的石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤中的 Al^{3+} 共掺特性,给出为了减小 Yb^{3+} 的浓度猝灭必须共掺 Al^{3+} 的最佳比例.同时,为了制作具有光敏性的光纤,还给出共掺 Ge 的浓度随共掺 Al^{3+} 的比例及要求的相对折射率差而变化的特性.

2. 实验分析

2.1. 实验装置及测试

利用改进的化学气相沉积法(MCVD)设备并结合湿法掺杂工艺制作不同 Al^{3+} 浓度和 Ge 含量的石英基掺 Yb^{3+} 光纤预制棒.由于高掺 Al^{3+} 后光纤预制棒的芯区折射率会大幅度提高,同时改变光纤预制棒芯区 Ge 含量也会导致其芯区折射率的急剧变化.因此在沉积光纤预制棒疏松层时采用 F 共掺工艺,以调整光纤预制棒芯区的折射率,从而控制所制作的光纤在规定截止波长下的芯径、数值孔径与模场直径等参数.采用这种方法设计并控制沉积光纤预制棒疏松层时 F,Ge 掺入比例,以及对应的掺杂溶液中 Al^{3+} , Yb^{3+} 的摩尔百分比,制作出四根不同 Al^{3+} , Yb^{3+} , F,Ge 含量的光纤预制棒.采用 USA PK 公司的 P104 光纤预制棒分析仪测试其对应的芯区折射率及其几何尺寸.根据所测参数计算,实施合适的套棒工艺并拉丝制成 1064nm 处单模工作的掺 Yb^{3+} 光纤,分别称为 YDF1#, YDF2#, YDF3# 和 YDF4#.使用 EXFO 公司的 NR9200 光纤分析仪和 USA PK 公司的 PK2210 光纤分析系统分别测试了这四种掺 Yb^{3+} 光纤的几何尺寸、折射率分布及吸收系数.结果分别如图 1 和图 2 所示.

四种石英基掺 Yb^{3+} 光纤的纤芯与包层折射率差及其在 914 nm 与 976 nm 处的吸收系数由表 1 列出.其中, YDF1# 为无共掺质的掺 Yb^{3+} 光纤; YDF2#, YDF3# 和 YDF4# 为共掺铝的掺 Yb^{3+} 光纤,具有相同的 Al^{3+} 浓度,但疏松层的沉积温度不同.

表 1 四种石英基掺 Yb^{3+} 光纤的纤芯与包层折射率差及对应的吸收系数

	折射率差/ 10^{-3}	914 nm 处的吸收系数/(dB/m)	976 nm 处的吸收系数/(dB/m)
YDF1#	10.6	98.760	265.906
YDF2#	8.1	182.404	352.808
YDF3#	11.5	129.758	333.298
YDF4#	13.8	258.566	606.577

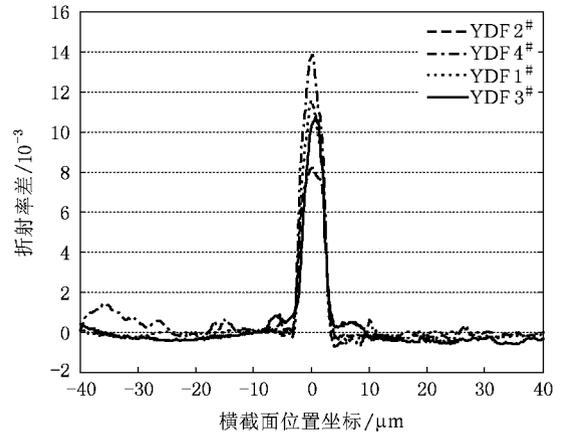


图 1 四种掺 Yb^{3+} 光纤的折射率分布

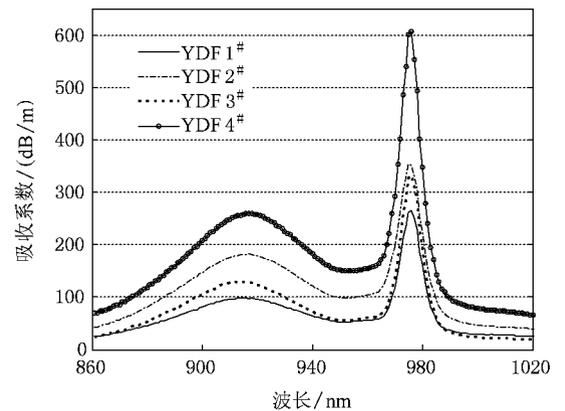


图 2 四种掺 Yb^{3+} 光纤的吸收谱

2.2. Al^{3+} 的摩尔百分比对石英基掺 Yb^{3+} 光纤性能影响的分析

由图 1,图 2 和表 1 所示可以看出,石英基掺 Yb^{3+} 光纤的纤芯与包层折射率差和吸收谱与 Al^{3+} 浓度以及疏松层的沉积温度等因素有关.

在失去 6s 层的两个电子和 4f 层的一个电子后, Yb 原子以正三价离子 Yb^{3+} 的形式作为网络改善离子填隙于网络中.当 Yb^{3+} 的浓度超出其在 SiO_2 基质中的溶解度时,会产生浓度偏析, Yb^{3+} 便形成原子簇以分享不足的非氧桥,导致析晶现象的发生.在这种情况下,预制棒的芯区呈不透明的白色状态,由此大大增加光纤的传输损耗并严重削弱光纤中 Yb^{3+} 的活性,以至于使掺光纤丧失在抽运光作用下的受激辐射性能.但是,由于在高功率光纤激光器的使用中要求光纤具有尽可能高的对抽运光功率的转换能

力和尽可能短的长度,这也就要求光纤在保持一定量的背景吸收系数的前提下,尽可能提高其中 Yb^{3+} 的浓度.因此,如何改善 Yb^{3+} 在 SiO_2 基质中的溶解度,既能实现光纤预制棒芯区尽可能高的 Yb^{3+} 掺杂浓度,又避免芯区出现析晶现象就成为摆在高功率掺 Yb^{3+} 光纤激光器研究中的一个关键技术难题.

经研究发现,采用 Al_2O_3 、 P_2O_5 等网络修饰因子可以防止 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 等稀土离子的浓度猝灭和析晶现象的发生^[11-13].就掺 Yb^{3+} 光纤来说,其机理是在高浓度掺 Yb^{3+} 的光纤纤芯中采用 Al_2O_3 、 P_2O_5 等网络修饰因子使相邻的 Yb^{3+} 离子彼此之间分割开来,从而抑制了 Yb^{3+} 离子成簇,阻止了 Yb^{3+} 离子的浓度猝灭和析晶现象的发生,在一定程度上提高了其溶解度^[14,15].如图 1 所示,与 YDF1# 相比, YDF2# 因共掺 Al^{3+} 而使吸收系数大大提高.然而,从图 2 中可以看出, YDF2# 因共掺 Al^{3+} 而使相对折射率差变大,这对于要求低数值孔径的大功率光纤激光器是不利的因素.因此,在保证较高的吸收系数前提下,为了控制相对折射率差,保持纯石英基玻璃的高 UV 透明度、低热膨胀系数等优良性能,应尽可能的减少 Al^{3+} 的掺入量.为此,本文实际制作出了具有不同 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 比例的掺 Yb^{3+} 光纤,测得的吸收系数随 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 比例变化的结果如图 3 所示.

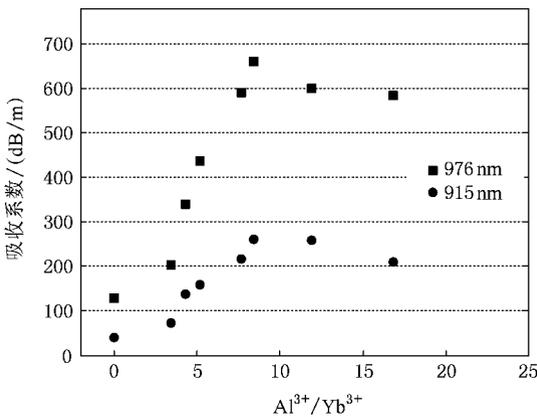


图 3 石英基掺 Yb^{3+} 光纤吸收系数随 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 变化的关系

从图 3 可以看出,当 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 为 9—11 时,在 914 nm 和 976 nm 波长处的吸收系数达到最大值.此后随着 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的进一步增加,在 914 nm 和 976 nm 波长处的吸收系数反而会下降.因此, Al^{3+} 的掺入量为 Yb^{3+} 的 9—11 倍为最佳参数,此时 Yb^{3+} 的溶解度达到最大,在获得高吸收系数的同时还可更好的满足数值孔径的要求.

2.3. 疏松层温度对掺 Yb^{3+} 光纤性能的影响

从表 1 可以看出,与 YDF2# 相比, YDF3# 虽具有与之相同的 Al^{3+} 浓度,但其吸收系数有所减小.究其原因,是由于掺 Yb^{3+} 光纤在 914 nm 和 976 nm 波长处的吸收系数不仅与共掺质有关,而且与疏松层的沉积温度有关.由于疏松层的沉积温度直接决定了疏松层的致密度,亦即疏松层中微孔的直径和分布状态,因此说疏松层的沉积温度直接影响了其特性.如果疏松层的沉积温度过高,则疏松层中的微孔直径变大,同时微孔周边的基质材料特别是靠近阻挡层的部分将接近透明化.这固然有利于溶液浸泡,但是也会引起预制棒芯区掺杂的不均匀性,甚至出现析晶现象.如果疏松层沉积温度过低,则疏松层中的微孔直径变得极小,并且使其中 SiO_2 颗粒间的相互结合松弛,特别是其靠近阻挡层的部分与阻挡层的附着性能变差.这一方面不利于溶液浸泡,另一方面极易使疏松层在脱水和透明化工艺过程中从阻挡层的内壁脱落.因此在疏松层的沉积过程中要尽可能选择最佳温度,从而有效控制疏松芯层的致密程度,使其保持良好的稀土离子掺杂均匀性并且避免析晶现象的发生.实验中通过对环形石墨炉功率、气体流速、车床转速及其车速进行精确控制来使疏松层沉积过程中的温度保持在最佳温度,并尽可能减小温度波动,从而制作出高质量的疏松层.

实际操作过程中,通过多次实验的数据分析和比较来最终确定最佳的疏松层沉积温度.图 4 所示为石英基掺 Yb^{3+} 光纤在 976 nm 波长处的吸收系数随疏松层沉积温度变化的关系.从图中可以看出,当疏松层沉积温度低于 1310℃ 时,疏松层与管壁黏附

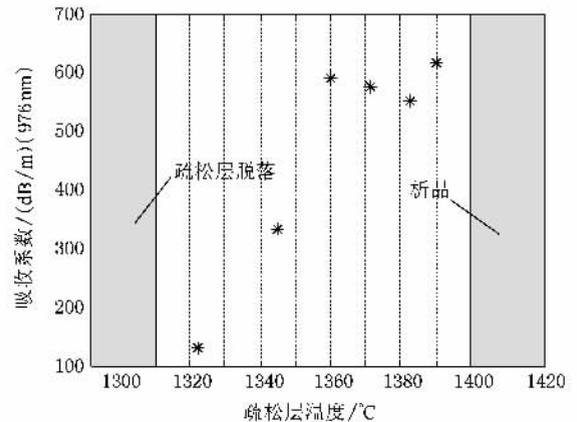


图 4 石英基掺 Yb^{3+} 光纤在 976 nm 波长处的吸收系数随疏松层沉积温度变化的关系

性较差,易造成疏松层脱落;当疏松层沉积温度高于1400℃时,易产生析晶现象.对应于确定的掺杂溶液离子浓度,疏松层沉积温度在1360—1390℃范围内时制作出的石英基掺 Yb^{3+} 光纤在976 nm波长处的吸收系数均超过500 dB/m,且重复性较好,因此确定1360—1390℃为制作疏松层的最佳温度.

3. 结 论

本文利用 MCVD 设备并结合湿法掺杂工艺制作

了不同 Al^{3+} 浓度和 Ge 含量的石英基掺 Yb^{3+} 光纤,基于实验测试结果分析了用于大功率光纤激光器的石英基包层抽运掺 Yb^{3+} 光纤中 Al^{3+} 共掺的特性,揭示出为了减小 Yb^{3+} 的浓度猝灭, Al^{3+} 的掺入量为 Yb^{3+} 的 9—11 倍为最佳参数,在获得高吸收系数的同时还可更好的满足数值孔径的要求.同时,为了精确控制疏松层沉积温度,在不同沉积温度下制作出多根光纤预制棒.拉丝后光纤的相关参数测试表明,疏松层的最佳温度应控制在 1360—1390℃ 之间,此范围内的吸收系数超过 500 dB/m,且重复性较好.

-
- [1] Wang S M , Du S F , Lu J *et al* 2007 *Chin. Phys.* **16** 1786
- [2] Jeong Y , Sahu J K , Payne D N *et al* 2004 *Electron. Lett.* **40** 470
- [3] Pedrazza U , Romano V , Lüthy W 2007 *Optical Materials* **29** 905
- [4] Steven J A , Jinendra K R , Fan T Y , Antonio S 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1707
- [5] Keiser G 1991 *Optical Fiber Communications* second edition (New York :McGraw-Hill)
- [6] Tan N , Zhang Q Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2165
- [7] Desurvive E , Zyskind J L , Simpson J R 1990 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2** 246
- [8] Wang X D , Zhao Z W , Xu X D *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4358 (in Chinese) [王晓丹、赵志伟、徐晓东等 2006 物理学报 **55** 4358]
- [9] Ainslie B J 1991 *IEEE Lightwave Tech.* **9** 220
- [10] Federighi M , Di Pasquale F 1995 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **7** 303
- [11] Kim Y H , Paek U C , Han W T 2002 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **14** 1710
- [12] William L B , Richard I L , Eleanor J T *et al* 1991 *IEEE Quantum Electro.* **27** 1004
- [13] Huang X J , Liu Y Z , Sui Z *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1191 (in Chinese) [黄绣江、刘永智、隋展等 2006 物理学报 **55** 1191]
- [14] Christof S , Albert P 2003 *Optical Materials* **21** 705
- [15] Pedrazza U , Romano V , Lüthy W *et al* 2005 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*

Investigation of co-doping Al³⁺ in ytterbium-doped silica-based fiber^{*}

Yan Feng-Ping[†] Wang Lin Wei Huai Fu Yong-Jun Jian Wei Zheng Kai Mao Xiang-Qiao
Li Jian Liu Li-Song Peng Jian Jian Shui-Sheng

(*Key-Laboratory of All-Optical networks & Advanced Communications Networks , Ministry of Education ,
China , Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)

(Received 28 November 2007 ; revised manuscript received 3 January 2008)

Abstract

The characteristics of co-doping Al³⁺ in ytterbium-doped silica-based fiber used for high-power cladding pumped laser were analyzed based on experimental analysis. The results show that the optimum mole percent of Al³⁺ to Yb³⁺ is 9—11 for high concentration of ytterbium-doped silica-based fiber at which low concentration quenching probability , high absorption coefficient and proper numerical aperture can be obtained. Meanwhile , ytterbium-doped silica-based fiber preforms were fabricated by MCVD and special solution doping technique. By soot layer temperature experiment and test of the related parameters of the drawn fiber , the results show that the optimum temperature for making soot layer can be accurately controlled and the absorption coefficient at 976 nm was as high as 620 dB/m with good repeatability. This conclusion makes a useful reference for fabrication of ytterbium-doped Al³⁺ co-doped fiber.

Keywords : ytterbium-doped silica-based fiber , aluminum co-doping , absorption coefficient , concentration quenching

PACC : 4281B , 4281C , 7630K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60577034).

[†] E-mail : fpyan@bjtu.edu.cn