

双包层掺 Bi 光纤的制备及其光谱特性研究*

王岩山 蒋作文 栾怀训 张泽学 彭景刚 杨旅云 李进延 戴能利†

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2011 年 7 月 20 日收到; 2011 年 10 月 31 日收到修改稿)

用改进的化学气相沉积方法和溶液掺杂方法制备了掺 Bi 双包层石英基光纤. 测试了掺 Bi 光纤预制棒切片的吸收光谱和掺 Bi 光纤在特定波长下的吸收系数, 在不同波长的激光激发下, 研究了掺 Bi 光纤的近红外荧光光谱. 掺 Bi 光纤在 976 nm 激光激发下, 其荧光光谱范围在 1000—1400 nm 之间, 荧光峰的峰值位于 1140 nm 附近, 半高宽约为 130 nm; 在 793 和 808 nm 激光激发下得到了 1000—1700 nm 的超宽带近红外荧光, 半高宽超过 250 nm. 通过对掺 Bi 光纤预制棒切片进行 900 °C 保温 1 h 的热处理后, 发现在 808 nm 激光激发下预制棒切片的荧光强度增加了近 4 倍. 研究表明, 具有超宽带荧光特性的双包层掺 Bi 光纤有望作为超短脉冲激光器和可调谐激光器的增益介质.

关键词: 掺 Bi 光纤, 超宽带发光, 双包层光纤, 热处理

PACS: 42.81.Bm, 42.70.Hj, 42.70.Km, 81.40.Gh

1 引言

可调谐光纤激光器和飞秒光纤激光器在众多领域(如光通信、全息光谱学、等离子体物理、生物学等)都有着重要的应用. 可调谐光纤激光器的调谐范围受光纤中掺杂离子荧光波长范围的制约, 一般而言, 常规的石英基掺稀土光纤激光器的可调谐范围不超过 100 nm, 而且缺乏在 1150—1500 nm 波长范围内的掺稀土光纤激光器. 光纤飞秒激光器是基于锁模原理实现超短脉冲输出的, 以光纤作为增益介质, 利用光纤中的色散和非线性效应可实现被动锁模工作. 通常情况下, 自启动被动锁模光纤激光器已经可以实现飞秒量级的超短脉冲输出. 光纤飞秒激光器具有工作稳定、效率高、可输出较高的平均功率等优点, 从而受到研究者的广泛关注^[1-4]. 由于锁模激光器的锁模脉冲宽度反比于增益线宽, 而增益线宽正比于光纤中激活介质的发光带宽, 所以常规的掺稀土光纤由于其较窄的发光带宽限制了光纤激光器的极限脉冲宽度.

近年来, 一种可在 1000—1600 nm 波段实现宽带发光的掺杂光纤引起了人们的兴趣. 2001 年,

Fujimoto 等^[5]报道了 Bi, Al 共掺的硅酸盐玻璃中 Bi 的近红外发光, 发现在波长为 800 nm 激光的激发下它可以发出峰值位于 1250 nm 附近, 半高宽约为 300 nm 的超宽带近红外荧光. 2003 年, Fujimoto 等^[6]在掺 Bi 硅酸盐玻璃中成功实现了光放大. 此后文献^[7-10]报道了在不同基质和掺杂成分下掺 Bi 玻璃在 1000—1600 nm 波段的超宽带近红外发光. 2005 年, Dvoyrin 等^[11]和 Haruna 等^[12]分别报道了第一根单包层掺 Bi 光纤, 但他们在光纤中并没有得到像掺 Bi 玻璃那样的超宽带近红外发光. 同年, Dianov 等^[13]在掺 Bi 光纤中成功实现了激光输出. 随后, 经过科研人员的不断研究和探索, 不同组分的掺 Bi 光纤激光器和放大器也逐渐被报道, 目前掺 Bi 光纤在不同波长的激光激发下, 可实现 1100—1550 nm 波段的激光输出和光放大^[13-19]. 2011 年, 吴金东等^[20]报道了 Bi 掺杂的纤芯组成为 SiO₂-Al₂O₃-GeO₂ 单包层光纤, 发现在 808 nm 激光激发下掺 Bi 光纤的荧光半高宽达到 495 nm.

与单包层光纤激光器相比较, 双包层光纤激光器采用具有双包层结构的掺杂光纤作为增益介质,

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA030201)资助的课题.

† E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn

抽运光在内包层中传输,内包层具有大的数值孔径和横向尺寸,这使得光纤的耦合效率得到了极大的提高. D形双包层光纤制作工艺简单,且与内包层为圆形的双包层光纤相比又有较高的吸收效率(可达90%以上). 因此,双包层掺Bi光纤有着极其重要的研究价值^[16]. 本文研究了D形双包层掺Bi光纤的吸收和荧光特性以及热处理对预制棒切片荧光的影响,可为发展新型结构的掺Bi光纤和掺Bi光纤激光器提供实验数据和理论基础.

2 实验

用改进的化学气相沉积(MCVD)方法和溶液掺杂方法制备了掺Bi光纤预制棒. 在高纯石英玻璃管内沉积一层疏松层,其成分是SiO₂,将疏松层浸泡于含有Bi离子和Al离子的溶液中,使Bi离子和Al离子充分吸附于疏松层表面,其中Bi离子和Al离子的掺杂浓度分别为0.2—1.0 mol/L和0.1—0.5 mol/L. 将浸泡后的预制棒置于MCVD车床上进行除水、玻璃化,最后在2000—2200 °C温度下缩棒形成了掺Bi光纤预制棒. 然后将预制棒加工成D形,在2100 °C左右的温度下进行拉丝. 在拉丝过程中,先在D形光纤表面涂覆一层低折射率涂料,经紫外灯固化,然后再涂覆保护层,经过固化形成了掺Bi双包层光纤,拉丝速率保持在10 m/min左右.

本文所研究的掺Bi双包层光纤内包层形状为D形,内包层直径为400 μm. 光纤截面照片如图1所示,光纤纤芯呈红色,但是纤芯中心由于在缩棒时有很高的温度,导致中心处大量的Bi离子挥发而颜色较淡. 内包层的数值孔径为0.46,纤芯的数值孔径小于0.1.

预制棒切片打磨抛光成直径为14 mm,厚度

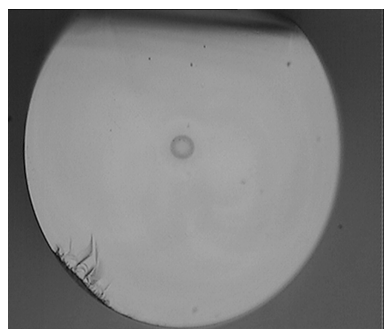


图1 掺Bi光纤的截面图

为6 mm后进行实验. 预制棒切片的热处理采用以硅钼棒为加热元件的高温炉加热. 预制棒切片的吸收光谱采用美国Perkin Elmer公司生产的Lambda 35型分光光度计测量(测量波长范围为200—1100 nm); 光纤的荧光光谱采用ZOLIX公司生产的Omni-λ5007型荧光光谱仪测量(测量波长范围为300—2200 nm). 激发源是波长为793, 808, 976 nm的半导体激光器.

3 结果及讨论

3.1 掺Bi光纤预制棒切片的吸收特性

图2给出了掺Bi光纤预制棒切片的吸收光谱. 从图2可以,看出预制棒切片中Bi离子的吸收峰分别位于300, 500, 700, 912 nm处,其中500和700 nm处的吸收比较明显,而912 nm处的吸收强度较弱. 吸收峰的位置相比于文献[20]所报道的单掺Bi光纤有所不同,文献[20]给出的吸收峰分别位于450, 530, 580, 700 nm处,同时在800—1050 nm范围内具有较宽的吸收带,其中530和700 nm处为两个较宽的吸收带,450和580 nm处为两个较窄的吸收带.

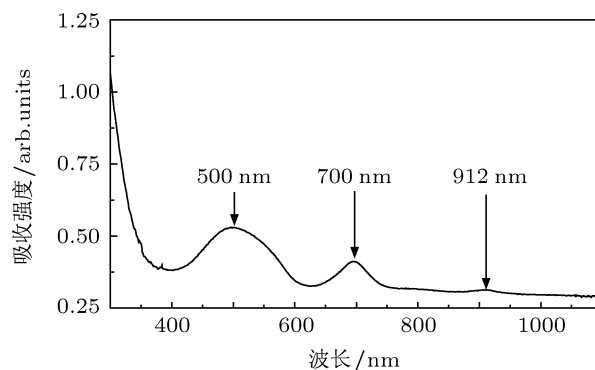


图2 掺Bi光纤预制棒切片的吸收光谱

用截断法测量了掺Bi光纤在常用的793, 808, 976 nm波长激光激发下的吸收系数. 吸收系数 α 可表示为

$$\alpha = 10 \log(P_{L_2}/P_{L_1})/\Delta L, \quad (1)$$

式中, L_1 为截断前光纤长度, L_2 为截断后光纤长度, P_{L_1} 为截断前光纤尾端的输出功率, P_{L_2} 为截断后光纤尾端的输出功率, $\Delta L = L_1 - L_2$ 为所截光纤长度. 表1列出了掺Bi光纤在793, 808, 976 nm波长处的吸收系数. 从表1可以看出,掺Bi光纤在793和808 nm波长处的吸收系数比较接近,而976 nm

波长处的吸收为 808 nm 波长处的一半. 本文制备的掺 Bi 光纤和文献 [19] 中报道的单包层掺 Bi 光纤相比, 在 793, 808, 976 nm 波长处的吸收系数要小于文献 [19] 中的吸收系数. 其原因可能有以下两点: 本文所用掺 Bi 光纤的 Bi 离子掺杂浓度较低; 双包层光纤由于大部分光都在内包层中传输, 在内包层中反射多次再穿过纤芯, 这也可能会导致吸收系数偏低.

表 1 掺 Bi 光纤在 793, 808, 976 nm 波长处的吸收系数

波长/nm	P_{L1}/W	P_{L2}/W	L_1/m	L_2/m	$\Delta L/m$	$\alpha/dB \cdot m^{-1}$
793	0.45	1.35	20	0.2	19.8	0.24
808	0.74	2.03	20	0.2	19.8	0.22
976	0.91	1.51	20	0.2	19.8	0.11

3.2 双包层掺 Bi 光纤的荧光光谱

图 3 给出了掺 Bi 双包层光纤的荧光光谱, 在波长为 793 和 808 nm 激光激发下, 掺 Bi 双包层光纤具有超宽带的近红外荧光, 荧光波长范围为 1000—1700 nm, 半高宽超过 250 nm, 荧光峰峰值位于 1250 nm 附近. 由图 3 可见, 1240 和 1380 nm 处的峰谷为 OH^- 吸收, 由于 OH^- 吸收范围过大, 所以不能确定具体的荧光峰峰位和半高宽. 从图 3 还可以看出, 由于 793 和 808 nm 波长较为接近, 所以用波长为 793 和 808 nm 激光激发时其荧光光谱形状也接近. 这表明虽然在不同波长的激光激发下, 但它们的跃迁能级完全相同. 在 976 nm 激光激发下, 其荧光波长范围在 1000—1400 nm 之间, 要明显小于在 793 或 808 nm 激光激发下的荧光波长范围, 荧光峰峰值位于 1140 nm 附近, 半高宽约为 130 nm. 图 4 给出了在 808 nm 激光激发下不同

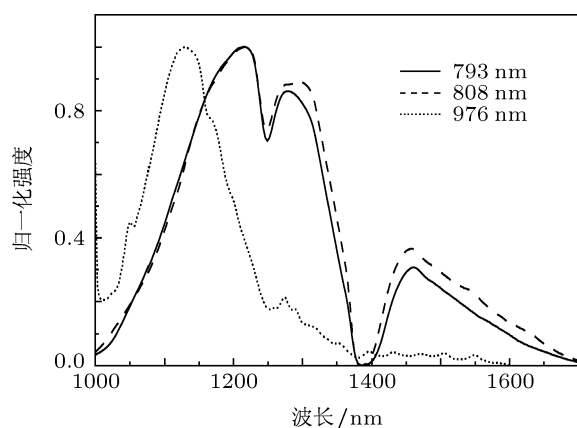


图 3 掺 Bi 光纤的归一化荧光光谱 激发波长分别为 793, 808, 976 nm

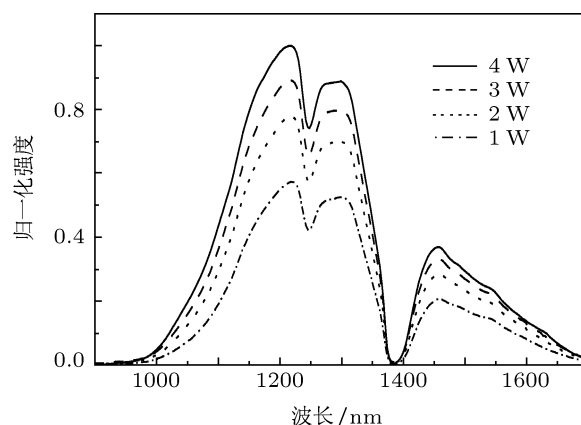


图 4 激发功率为 1, 2, 3, 4 W 时掺 Bi 光纤的归一化荧光光谱 激发波长为 808 nm

入纤功率时掺 Bi 光纤的荧光光谱. 从图 4 可以看出, 随着入纤功率的增强, 掺 Bi 光纤的荧光强度也逐渐增强, 未出现功率增加导致荧光强度饱和的现象.

3.3 热处理对掺 Bi 预制棒荧光特性的影响

由于 Bi 离子发光中心的形成对温度比较敏感, 因此对掺 Bi 预制棒切片进行了热处理实验, 以研究热处理对预制棒切片荧光特性的影响 [21]. 将预制棒切片置于高温炉中 0.5 h 升温至 900 °C, 然后在 900 °C 保温 1 h. 对比其 900 °C 热处理前后的结果发现, 在波长为 808 nm 激光激发下预制棒切片的荧光强度增加了近 4 倍, 其荧光光谱如图 5 所示. 实验结果表明, 有效的热处理将极大地增强掺 Bi 光纤预制棒切片的荧光强度. 这是由于在 MCVD 车床上烧结成预制棒时烧结时间过短 (不到 0.5 h) 且都是局部烧结, 所以可能是过短的烧结时间不能充分形成 Bi 活性中心. 通过对预制棒进行适当的

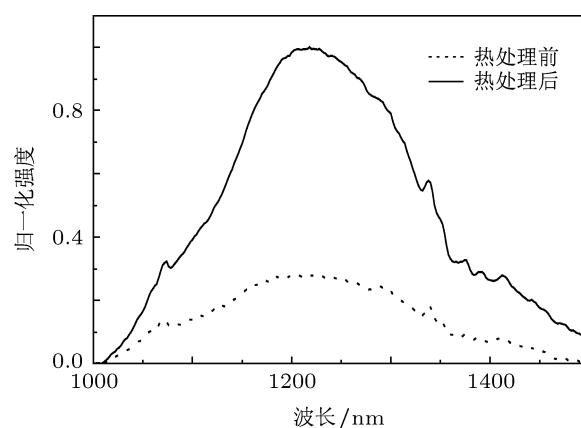


图 5 预制棒切片在 900 °C 热处理前后的归一化荧光光谱 激发波长为 808 nm

热处理,将有助于更多 Bi 离子活性中心的形成,可使掺 Bi 光纤预制棒切片的荧光强度增强.

4 结论

采用 MCVD 方法制备了 D 形双包层掺 Bi 光纤,并对其光谱特性进行了实验研究.在 793, 808 nm 激光激发下,在掺 Bi 光纤中产生了超宽带近红外荧光,其波长范围在 1000—1700 nm 之间,半高宽超过 250 nm,荧光峰峰值位于 1250 nm 附近.在 976 nm 激光激发下其荧光波长范围为

1000—1400 nm,荧光峰峰值位于 1140 nm 附近,半高宽约为 130 nm.在 808 nm 激光激发下,随着入纤功率的增强,其荧光强度也逐渐增强,未出现激发功率增加导致荧光强度饱和的现象.通过对掺 Bi 光纤预制棒在 900 °C 的热处理,发现热处理后在 808 nm 激光激发下预制棒切片的荧光强度增加了近 4 倍,可能是由于在 900 °C 进行热处理时预制棒芯部形成了更多的 Bi 活性中心的缘故.实验结果表明,双包层掺 Bi 光纤将有可能作为飞秒脉冲和可调谐激光器的放大增益介质.

- [1] Li S G, Zhou G Y, Xing G L, Hou L T, Wang Q Y, Li Y F, Hu M L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1599 (in Chinese) [李曙光,周桂耀,邢光龙,侯蓝田,王清月,栗岩峰,胡明列 2005 物理学报 **54** 1599]
- [2] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建,胡明列,刘博文,柴路,王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [3] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese) [刘博文,胡明列,宋有建,柴路,王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [4] Liu H G, Hu M L, Liu B W, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3979 (in Chinese) [刘华刚,胡明列,刘博文,宋有建,柴路,王清月 2010 物理学报 **59** 3979]
- [5] Fujimoto Y, Nakatsuka M 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L279
- [6] Fujimoto Y, Nakatsuka M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3325
- [7] Meng X G, Qiu J R, Peng M Y, Chen D P, Zhao Q Z, Jiang X W, Zhu C S 2005 *Opt. Express* **13** 1628
- [8] Suzuki T, Ohishi Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 191912
- [9] Hughes M, Suzuki T, Ohishi Y 2008 *Opt. Lett.* **25** 1380
- [10] Dai N L, Xu B, Jiang Z W, Peng J G, Li H Q, Luan H X, Yang L Y, Li J Y 2010 *Opt. Express* **18** 18642
- [11] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M, Umnikov A A, Yashkov M V, Guryanov A N 2005 *European Conference on Optical Communications* (Glasgow: IEEE) pp949—950
- [12] Haruna T, Kakui M, Taru T, Ishikawa S, Onishi M 2005 *Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting* (Budapest: Optical Society of American) MC3
- [13] Dianov E M, Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Umnikov A A, Yashkov M V, Guryanov A N 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 1083
- [14] Kalita M P, Yoo S, Sahu J 2008 *Opt. Express* **16** 21032
- [15] Mashinsky V M, Dvoyrin V V, Dianov E M 2008 *Optical Fiber Communication Conference* (San Diego: Optical Society of American) OThN1
- [16] Yoo S, Kalita M P, Sahu J K, Nilsson J, Payne D 2008 *The Conference on Lasers and Electro-Optics* (San Jose: Optical Society of American) CFL4
- [17] Kalita M P, Yoo S, Sahu J 2009 *The Conference on Lasers and Electro-Optics* (Baltimore: Optical Society of American) CThGG2
- [18] Dvoyrin V V, Kiryanov A V, Mashinsky V M, Medvedkov O I, Umnikov A, Guryanov A N, Dianov E M 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 182
- [19] Bufetova I A, Melkumov M A, Khopin V F, Firstova S V, Shubina A V, Medvedkova O I, Guryanov A N, Dianov E M 2010 *Proc. SPIE* **7580** 758014
- [20] Wu J D, Chen D P, Wu X K, Qiu J R 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 071601
- [21] Denker B I, Galagan B I, Osiko V V, Shulman I L, Sverchkov S E, Dianov E M 2010 *Appl. Phys. B* **98** 455

Preparation and spectral characteristics of Bi-doped double cladding optical fiber*

Wang Yan-Shan Jiang Zuo-Wen Luan Huan-Xun Zhang Ze-Xue Peng Jing-Gang
Yang Lü-Yun Li Jin-Yan Dai Neng-Li[†]

(College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 20 July 2011; revised manuscript received 31 October 2011)

Abstract

Bi-doped double cladding fiber preform is prepared by modified chemical vapor deposition and solution doping process. The absorption spectrum of preform and the near-infrared (NIR) luminescence spectrum of fiber are experimentally investigated. The luminescence spectrum of the fiber shows a peak emission band at 1140 nm with a full-width at half-maximum (FWHM) of 130 nm under 976 nm LD exciting. Under 808 or 793 nm LD exciting, an ultra-broad NIR emission with an FWHM of more than 250 nm is observed in the Bi-doped fiber, and the range of luminescence spectrum is from 1000 to 1700 nm. After the heat treatment of the Bi-doped fiber preform slice under 900 °C for 1 h, under 808 nm LD exciting, the fluorescence intensity is about 4 times higher than that of the preform slice without heat treatment. The results indicate that the Bi-doped double cladding fiber is a promising gain medium used for ultrashort fiber lasers and tunable fiber lasers.

Keywords: Bi-doped fiber, ultra-broad emission, double-clad fiber, heat treatment

PACS: 42.81.Bm, 42.70.Hj, 42.70.Km, 81.40.Gh

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA030201).

[†] E-mail: dainl@mail.hust.edu.cn