

高性能 1018 nm 光纤及激光器实验研究*

王一礪¹⁾ 陈瑰¹⁾ 谢璐¹⁾ 蒋作文¹⁾²⁾ 李进延^{1)2)†}

1) (华中科技大学光电子科学与技术学院, 武汉 430074)

2) (武汉国家光电实验室, 武汉 430074)

(2012年7月20日收到; 2012年9月11日收到修改稿)

对光纤预制棒制备过程中沉积的气体流量、管内压强等参数和光纤掺杂组分进行了研究. 研究发现通过共掺其他元素, 可以使掺镱光纤的荧光谱发生移动. 基于此, 制备了有利于 1018 nm 激光输出的掺镱双包层光纤. 在增益光纤长度为 7 m 时, 实现了 22.8 W 的 1018 nm 激光输出, 光 - 光效率接近 70%, 并且没有观察到明显的自发辐射和饱和现象.

关键词: 光纤激光器, 双包层掺镱光纤, 1018 nm

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.70.Hj, 42.81.Cn

DOI: 10.7498/aps.62.064210

1 引言

与传统的固体激光器相比, 光纤激光器有其独特的优点, 例如结构紧凑、有利于散热、抽运效率高等等. 在 20 世纪 80 年代末美国 Polaroid 公司提出双包层光纤之后, 光纤激光器得到了飞速发展^[1-5]. 近年来, 掺镱光纤激光器由于转换效率高、无浓度猝灭等优点, 逐渐在光纤激光器领域里扮演着重要角色, 其输出功率由毫瓦量级增长到现在的万瓦量级. 无论在工业、医学还是军事等领域, 高功率掺镱光纤激光器都有着广泛的应用前景.

然而在追求高功率的过程中, 热效应逐渐成为一个极大的制约因素, 除了改进抽运光的耦合方式以减小耦合热损耗外, 由于光纤本身的损耗带来的热问题也同样影响到激光器的稳定运转. 同带级联抽运可以减小光纤激光器的量子亏损, 从而减少热效应的影响. 2009 年 6 月, IPG 公司推出了一台 10 kW 的连续单模掺镱光纤激光器, 它所采用的就是同带级联抽运的结构^[6]. 该激光器先由 975 nm 的 LD 抽运出 1018 nm 的激光, 再用 1018 nm 抽运放大 1 kW 的 1070 nm 种子源. 由于 1018

nm 的光纤激光器光束质量好、亮度高, 因此其放大级抽运光利用率高. 受激离子的量子亏损被定义为 $\eta = 1 - hv_1/hv_2$, 其中 h 是普朗克常数, v_1 和 v_2 分别是激光频率和抽运光频率. 当抽运波长和激光波长相差较大时, v_1 和 v_2 也相差较大, 这样就增加了量子亏损. 由于激光器中的大部分热都来自于量子亏损, 因此, 降低量子亏损是热管理的有效途径. 相比于 975 nm 抽运, 1018 nm 抽运 1070 nm 时量子亏损小, 在热管理方面有着极大的优势. 因此, 1018 nm 光纤激光器的研究成为重要课题. 近期, 国内有很多科研单位进行了这方面的研究^[7,8]. 2012 年, 国防科技大学报道了 113 W 主振荡功率放大结构的 1018 nm 全光纤激光器^[9]. 然而目前所报道的 1018 nm 光纤激光器效率不高, 这极大程度上要归因于增益光纤的选取. 传统的掺镱光纤在 1018 nm 处的发射截面很小, 因此不适合作为 1018 nm 光纤激光器的增益介质. 主振荡功率放大的结构固然可以提高输出功率, 但不能从根本上摆脱增益介质的限制. 本文利用改进化学气相沉积 (MCVD) 工艺和气相 - 液相复合掺杂的方法, 通过对工艺参数和掺杂组分的不断改进, 使光纤的荧光次峰蓝移, 并得到了 1018 nm 激光的高效率输出.

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

† 通讯作者. E-mail: ljj@mail.hust.edu.cn

2 原理及制备

Yb^{3+} 离子的能级结构很简单, 只包括 $2F_{5/2}$ 和 $2F_{7/2}$ 两个多重态, 因此不存在激发态吸收, 并且光转化效率高. 在光纤中, Yb^{3+} 离子的这两个能级在基质的影响下会产生 Stark 分裂, 其周围电场的非均匀分布消除了能级简并, 因此对于给定的电子跃迁, 将出现精细结构. Yb^{3+} 离子在 915 nm 和 975 nm 处有两个吸收峰, 在 975 nm 和 1036 nm 处有两个发射峰.

在玻璃系统中, Yb^{3+} 离子处于网络修饰体的位置且与六个氧原子连接, 每个氧原子的另一端连接着网络构成体. 如果这些网络构成体拥有不同的场强、极化率或氧配位数时, Yb^{3+} 离子就处于一个非对称的环境中 (图 1). 这些差别越大, 环境的非对称度就越大, 将导致更大的发射截面^[10]. 同时, 基质还会引起声子加宽, 当两个能级之间发生跃迁时, 会伴随着声子的能量传递, 在一定条件下, 这将引起 Yb^{3+} 离子吸收和发射谱的扩展, 并改变吸收和发射谱的中心波长. 为了增加 1018 nm 激光输出的斜率效率, 就要通过改变掺杂成分将 Yb^{3+} 离子的发射次峰蓝移并增加 1018 nm 处的发射截面. 研究表明, 共掺 P, Al 等离子可以使得 Yb^{3+} 离子周围环境对称度降低, 增加声子加宽, 增大发射截面并改变荧光峰的位置^[11,12].

Yb^{3+} 离子不存在浓度猝灭, 因此其掺杂浓度主要取决于 Yb^{3+} 离子在基质中的溶解度. 石英光纤中 Yb^{3+} 离子容易发生团簇, 使得预制棒芯部出现析晶现象. 研究发现掺入 P 和 Al 可以增加石英光纤中 Yb^{3+} 离子的溶解度. 当 Al_2O_3 作为网络形成体时, 是以 $[\text{AlO}]$ 四面体的形式存在的, 相比于 $[\text{SiO}]$ 四面体, $[\text{AlO}]$ 四面体拥有负电价, 因此要吸附阳离子以保持电中性, 这样就提高了 Yb^{3+} 离子的溶解度. 当 P_2O_5 作为网络形成体时, 情况与 Al_2O_3 不同. P 和 O 构成 $[\text{PO}]$ 四面体, 其中有一个键是双键, 双键的另一端没有其他离子 (图 2), 这个通过双键与 P 链接的氧原子称为非桥氧. Yb^{3+} 离子作为网络修饰体, 填隙于玻璃网络中, 这使得非桥氧得到增加. 这种结构可以提高 Yb^{3+} 离子的溶解度^[13]. 根据以上理论, 经过综合考虑, 确定了以 P 和 Al 为基本共掺元素, 并配以其他元素, 以达到改变 Yb^{3+} 离子周围环境对称性从而改变掺镜光纤荧光次峰位置的目的.

传统的掺镜光纤是单掺 Al 类的, 一般采用

MCVD 工艺和液相掺杂的方法. 本实验的光纤预制棒的制备方法为 MCVD 工艺和气相-液相复合掺杂法, 其大体过程为: 1) 首先在较高的温度下于纯石英反应管内壁沉积一层透明的包层, 这一层沉积的主要是 SiO_2 ; 2) 然后在较低温度下沉积疏松层, 由于反应温度较低, 所以这一层颗粒之间存在大量空隙, 为不透明状, 在这一步, 由于 POCl_3 常温下为液体, 所以可以通过氧气鼓泡将 POCl_3 蒸气带入反应管进行反应沉积 P_2O_5 ; 3) 再将共掺 Al 等元素的 Yb^{3+} 溶液倒入反应管, Yb^{3+} 等离子会扩散到疏松层的空隙当中; 4) 最后在高温下将反应管缩实.

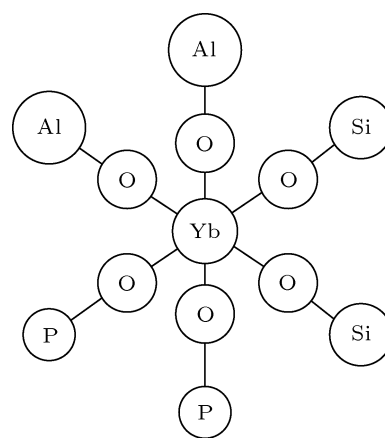


图 1 Yb^{3+} 离子周围非对称环境

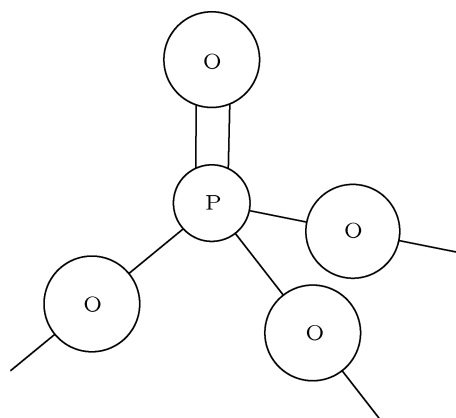


图 2 $[\text{PO}]$ 四面体

由于 P_2O_5 的挥发温度很低, 所以在预制棒制备过程中, P_2O_5 极易挥发, 因此高浓度掺杂磷成为一个难题. 目前 MCVD 过程中, 一般采用正向沉积进行掺杂 (图 3(a)). 在此过程中, 氧化物会在火焰的上游沉积, 当火焰经过上游的沉积物时, 会将其烧结. 而我们采用反向沉积 (图 3(b)) 工艺, 因为在此过程中, 氧化物会在火焰的下游沉积, 这样就没有

了烧结的过程, 避免了 P_2O_5 的过度挥发, 从而使疏松层的厚度得到了保证. 其难点在于要合理地调整沉积温度、气体流量、管内压强、火焰移动速度等参数, 使疏松层的致密度恰到好处, 不能过于致密, 否则溶液掺杂时 Yb^{3+} 离子无法进入疏松层; 又不能过于疏松, 否则沉积物容易脱落.

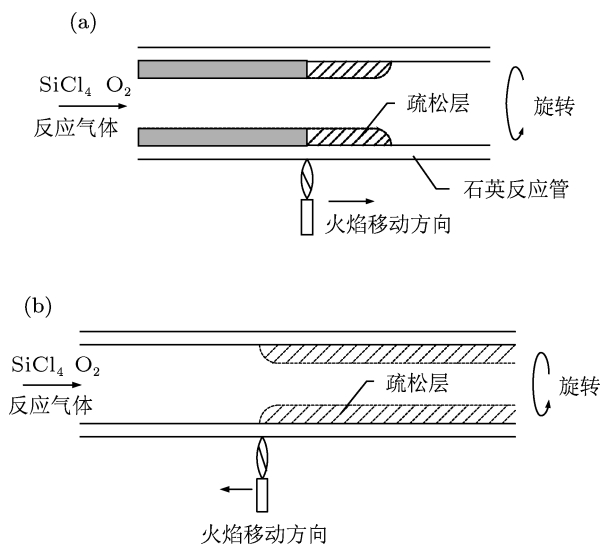


图3 沉积示意图 (a) 正向沉积; (b) 反向沉积

3 实验结果与分析

首先对特制的掺镱光纤预制棒切片和普通单掺铝的掺镱光纤预制棒切片进行了荧光测试, 得到的荧光光谱如图4所示. 相比于普通掺镱光纤预制棒切片的 1025 nm, 很明显特制的掺镱光纤预制棒切片的荧光次峰位置发生了蓝移, 其中心波长在 1008 nm. 而且还可以从图中看出荧光光谱得到了展宽, 这是因为在共掺多种元素的情况下, Yb^{3+} 周围的配位场的对称度降低, 使得 Stark 分裂和能级展宽加剧.

将预制棒拉制成双包层光纤, 芯径为 15 μm , 内包层直径为 130 μm . 在不加光栅的情况下对不同长度的增益光纤进行了自由运转测试, 观察其自发辐射的强度和自激波长. 研究发现, 在不同增益光纤长度的情况下, 均可以自激, 并且随着光纤长度的减小, 自激波长逐渐蓝移. 图5给出了增益光纤长度与自激波长的关系. 通过理论推导, 光纤长度与激射波长的关系可以用公式表示为

$$1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{ul} - hc\lambda^{-1}}{KT}\right) = \exp\left\{N_l \sigma_{ap} L - \ln\left[\frac{\sigma_{ap}}{(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})} \frac{I_p(0)}{I_c}\right]\right\}, \quad (1)$$

其中 Z_u 和 Z_l 分别为激光上下能级簇的函数, E_{ul} 为激光上下能级 Stark 分裂而形成的两能级簇的最低能级差, K 为玻尔兹曼常数, T 为温度, h 为普朗克常数, λ 为激射波长, L 为光纤长度, N_l 为掺杂浓度, σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别为抽运波长的吸收和发射截面, I_p 和 I_c 分别为抽运光强和饱和抽运光强.

由此可知, 较大的 L 会激发出更长的波长的激光. 另外, 在实验中发现, 与自激强度相比, 自发辐射强度很小, 相差有 30 dB 以上.

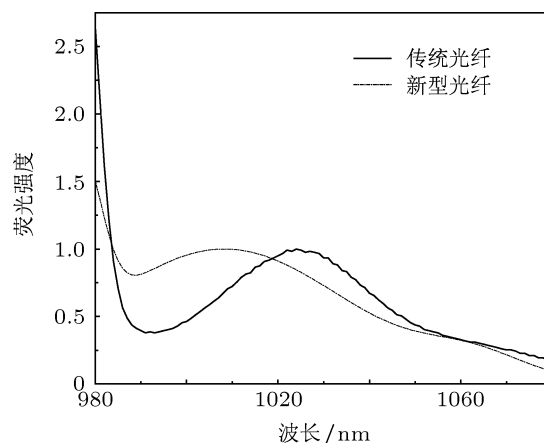


图4 预制棒切片荧光光谱

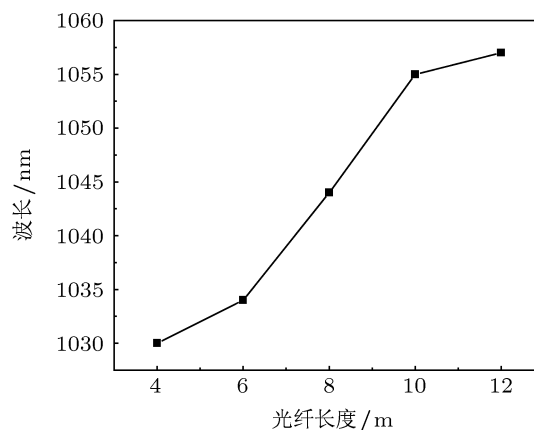


图5 光纤长度与自激波长的关系

激光器结构如图6所示, 采用全光纤结构, 由 975 nm 半导体激光器抽运, 一对中心波长在 1018 nm 的光纤光栅构成谐振腔, 其中一个光栅在 1018 nm 处的反射率为 98%, 另一个光栅用作输出端, 在 1018 nm 处的发射率为 24%. 将谐振腔尾端的一段光纤的外包层剥除, 外表涂上高折射率涂料以滤除抽运光. 光纤输出端面切成了 8° 倾角防止反射光对系统造成损伤.

我们尝试了不同长度的增益光纤. 依据上述

实验结果, 将增益光纤长度选取为更有利于短波长激射的 4, 6 和 8 m. 测得滤除抽运光前后的输出功率, 得到了 1018 nm 输出功率和剩余抽运光功率 (图 7(a)—(c)). 观察可知, 光纤长为 6 m 时激光功率最大, 而光纤长为 8 m 时剩余抽运光最少. 其原因在于 6 m 的增益光纤没有充分吸收抽运光, 使得很多抽运功率被浪费, 而 8 m 的增益光纤虽然吸收了更多的抽运光, 但由于不利于短波长激光的激射, 造成激光输出功率下降. 在此基础上, 对 7 m

的增益光纤进行了测试 (图 7(d)), 与上述结果对比发现, 在增益光纤长度为 7 m 时, 输出功率最大, 并且剩余抽运光较少, 因此确定最佳长度为 7 m. 当抽运光功率为 22 W 时, 有 13.6 W 的激光输出, 光 - 光效率达到了 68%; 当抽运功率为 44 W 时, 输出功率为 22.8 W, 光 - 光效率为 62.8%. 在实验过程中, 没有明显的自发辐射和饱和现象. 抽运光功率为 47 W 时, 激光输出的光谱如图 8(a) 所示, 中心波长为 1018.3 nm, 谱宽为 0.076 nm.

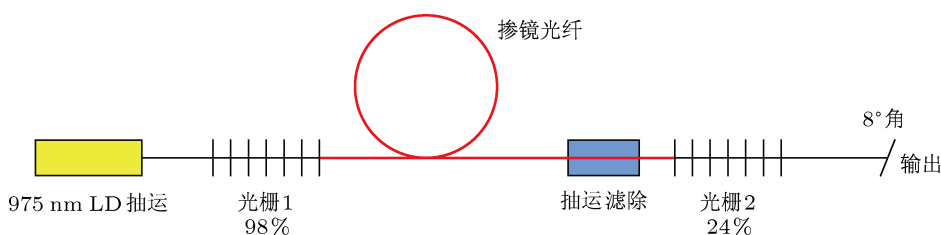


图 6 激光器结构示意图

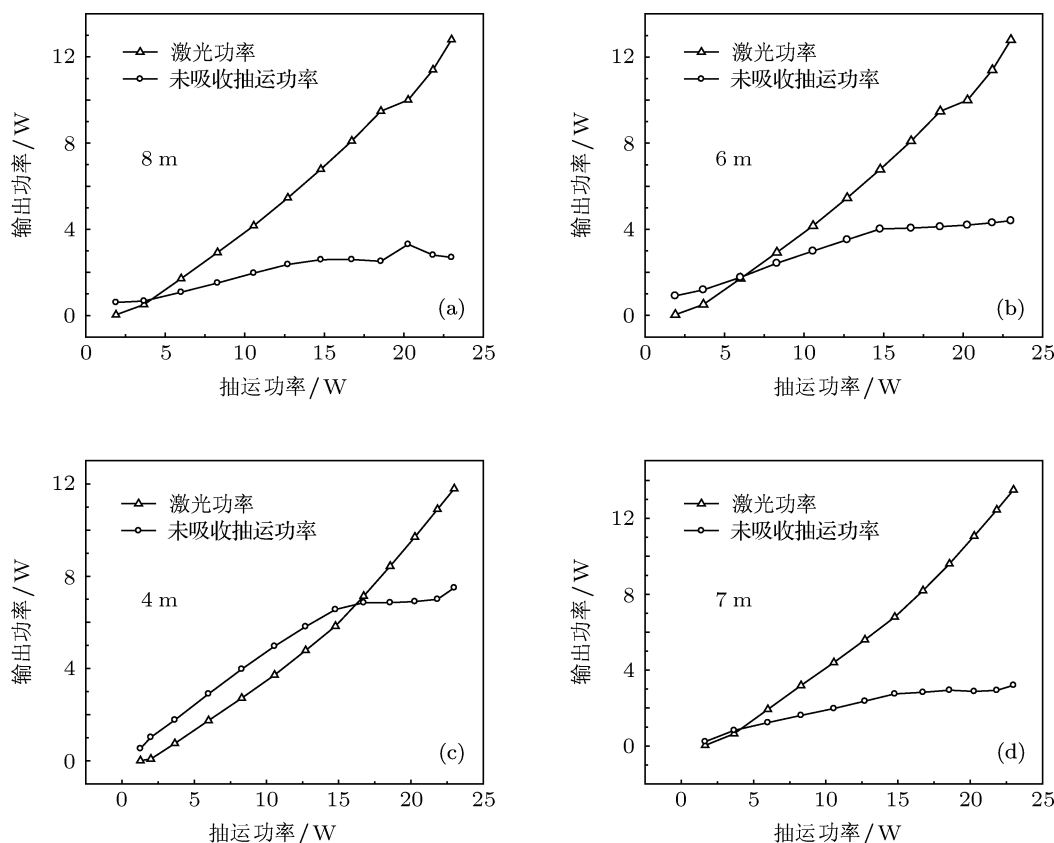


图 7 不同长度光纤的激光输出功率和剩余抽运光功率

利用同样的结构对传统的掺镜光纤进行了激光测试, 得到了在最佳长度情况下的激光光谱. 与我们制备的光纤进行对比 (如图 8) 可以看出, 新型光纤的信噪比远远优于传统光纤. 另外将输出功率

和剩余抽运光功率也进行了测试, 与之前测得的结果进行对比 (如图 9 和图 10) 可以看出, 新型的掺镜光纤输出功率更高, 而且剩余抽运光更少, 从而减少了光纤内部的残余热量, 有利于热管理.

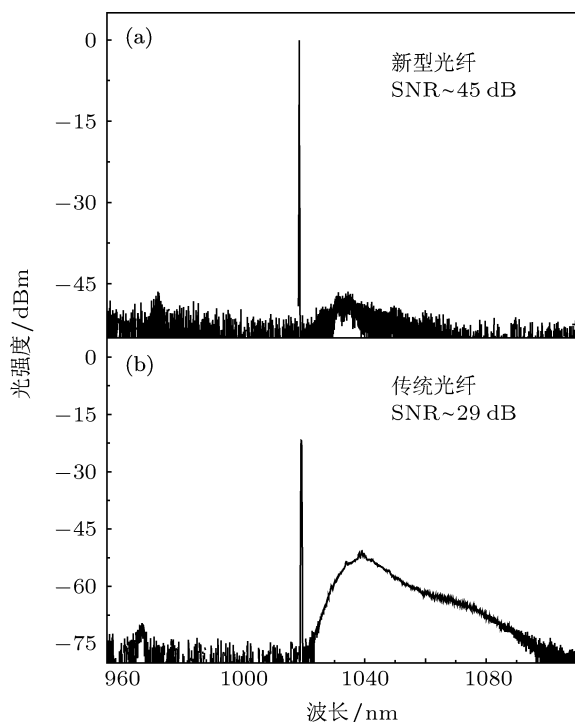


图8 传统掺镱光纤与新型掺镱光纤激光光谱对比

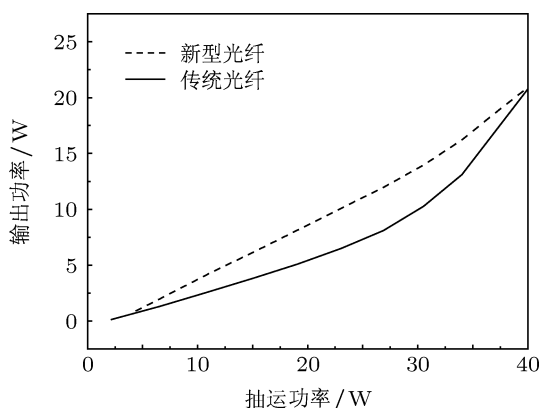


图9 传统掺镱光纤与新型掺镱光纤输出功率对比

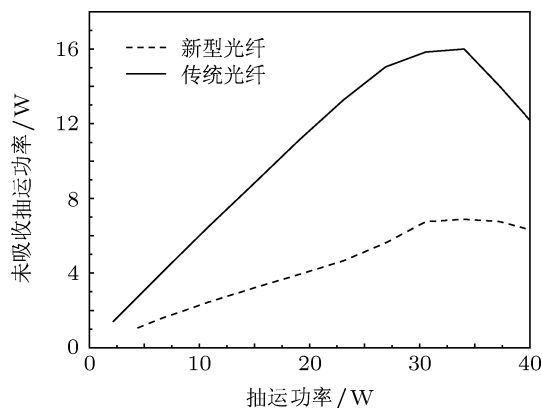


图10 传统掺镱光纤与新型掺镱光纤剩余抽运功率对比

4 结论

针对同带抽运光纤激光器的要求, 通过调整掺镱光纤纤芯材料组分和改进光纤制备工艺进行了 1018 nm 激光输出的实验研究. 实验结果表明, 制备的有利于 1018 nm 激光输出的双包层掺镱光纤, 光光效率接近 70%, 且没有明显的自发辐射和饱和现象. 在 44 W 抽运时输出功率达到 22.8 W, 信噪比为 36 dB. 这一系列结果均为首次报道. 与传统掺镱光纤进行对比得知, 这种光纤在 1018 nm 处具有更高的转化效率, 而且有利于减少光纤内的热负载. 通过光纤材料的优化设计和制备工艺的进一步改进, 有望进一步提高在 1018 nm 的激光输出效率.

感谢上海光机所周军老师和王建华博士在激光测试方面的大力协助.

[1] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C, Reekie L, Russell P S J, Townsend J E, Tropper A C 1994 *Electron. Lett.* **30** 863
 [2] Zellemer H, Willamowski U, Tünnermann A, Welling H 1995 *Opt. Lett.* **20** 578
 [3] Zellmer H, Tünnermann A, Welling H, Reichel V 1997 *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA)* Victoria, Canada, July 21, 1997
 [4] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, Sanders S, Bicknese S, Dohle R, Wolak E, Yeh P S, Zucke E 1999 *Electron. Lett.* **35** 1158
 [5] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Exp.* **12** 6088
 [6] Richardson D, Nilsson J, Clarkson W 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 63
 [7] Xiao H, Leng J Y, Wu W M, Wang X L, Ma Y X, Zhou P, Xu X J, Zhao G M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124207 (in Chinese) [肖虎, 冷进勇, 吴武明, 王小林, 马阎星, 周朴, 许晓军, 赵国民 2011 物理学报 **60** 124207]
 [8] Li Z, Zhou J, He B, Wei Y R, Dong J X, Lou Q H 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 091401
 [9] Liu Z J, Xiao H, Zhou P, Wang X L, Chen J B 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0305009 (in Chinese) [刘泽金, 肖虎, 周朴, 王小林, 陈金宝 2012 中国激光 **39** 0305009]
 [10] Zou X L, Toratani H 1995 *Phys. Rev. B* **52** 889
 [11] Kirchhof J, Unger S 1999 *Optical Fiber Communication Conference 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. OFC/IOOC '99. Technical Digest* San Diego, CA, Feb 21-26 1999, 196
 [12] Kirchhof J, Unger S, Schwuchow A, Jetschke S, Knappe B 2005 *SPIE* Bellingham, WA, 2005 261
 [13] Vienne G G, Caplen J E, Dong L, Minely J D, Nilsson J, Payne D N 1998 *J. Lightwave Technol.* **16** 1990

Experimental research of high performance fiber and fiber laser at 1018 nm*

Wang Yi-Bo¹⁾ Chen Gui¹⁾ Xie Lu¹⁾ Jiang Zuo-Wen¹⁾²⁾ Li Jin-Yan¹⁾²⁾

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

2) (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

(Received 20 July 2012; revised manuscript received 11 September 2012)

Abstract

The effects of codopants and the deposition parameters such as gas flowrate and pressure in tube during the fabrication of fiber performs are studied. It is found that the fluorescence spectrum of Yb^{3+} can shift when codoping other elements, according to which, a double cladding Yb^{3+} -doped fiber that is beneficial for 1018 nm laser is fabricated for the first time. When the fiber length is 7 m, an output of 22.8 W at 1018 nm is obtained. The optical-optical conversion efficiency is approximately 70%, and there are neither spontaneous radiation nor saturation.

Keywords: fiber laser, double cladding Yb^{3+} -doped fiber, 1018 nm

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.70.Hj, 42.81.Cn

DOI: 10.7498/aps.62.064210

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

† Corresponding author. E-mail: lji@mail.hust.edu.cn