

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0387-03

掺 Yb^{3+} 的双包层光纤

戴能利¹ 胡丽丽¹ 白喻²

(¹ 中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 武汉科技大学, 武汉 430081)

提要 简要介绍了掺 Yb^{3+} 双包层光纤发展背景, 制造工艺, 影响光纤主要性能的基本因素, 以及掺 Yb^{3+} 双包层光纤在光纤激光器中的应用。

关键词 Yb^{3+} 掺杂, 双包层光纤, 光纤激光器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Yb^{3+} -Doped Double-cladding Fiber

DAI Neng-li¹ HU Li-li¹ BAI Yu²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract A brief review on the history, fabrication and application of Yb^{3+} -doped double-cladding fiber is given. Several factors affecting the properties of Yb^{3+} -doped double-cladding fiber are discussed.

Key words Yb^{3+} -doped, double-cladding fiber, fiber laser

1 引言

与传统的单包层光纤相比, 双包层光纤具有对抽运光吸收效率高, 激光输出功率大, 光-光转换效率高优点^[1], 因此被广泛应用在光通讯、军工、远距离传感、医疗和印刷等方面。1988年研制成功掺 Yb^{3+} 光纤放大器(YDFA)^[2], 同年, 美国宝丽来公司 Snitzer 等^[3] 发明了具有内包层结构的掺 Nd^{3+} 双包层光纤激光器, 多模抽运光可以在内包层中传输, 然后不断地耦合到掺 Nd 离子的芯层中, 最后输出单模激光。1994年, Pask 等^[4] 首次研制成功掺杂 Yb^{3+} 双包层光纤, 并用来制作 $1\sim 1.15\ \mu\text{m}$ 输出波长可调的光纤激光器。在当时, 这是光转换效率最高的光纤激光器。在这以后, 随着大功率半导体激光器制造技术的日趋成熟, 用掺 Yb^{3+} 双包层光纤制作的大功率激光器有了很大的发展。从1994年输出功率 500 mW 发展到1997年的 20 W 和 35 W, 1998年的 55 W 和1999年的 110 W^[4-7]。目前, 商用掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出已经发展到 10~20 W 的水平。

本文旨在简要介绍各国研究者对 Yb 双包层光

纤及 Yb 光纤激光器的研究成果, 主要包括掺 Yb 双包层光纤的生产工艺、光纤特性及其主要影响因素。

2 Yb^{3+} 双包层光纤的制作工艺

2.1 MCVD 法制作反应棒

先按常规工艺沉积隔离层, 然后降低火焰温度至适宜范围沉积 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 芯层, 使芯层不被烧结, 未烧结的芯层呈不透明的疏松多孔状。

2.2 掺杂 Yb^{3+} 离子

将稀土离子掺杂到预制棒中有多种方法: 溶解法^[8]、掺杂体载流子腔法、烧结棒法、气相轴向沉积法和棒入管法。目前, 采用较多的方法是溶解法。

将上述带有疏松芯层的反应管浸入预先配制好的 YbCl_3 溶液中, 在适宜的温度下, 浸泡至足够时间, 使 Yb^{3+} 均匀地吸附在疏松芯层上。Townsend^[9] 的研究表明: 芯体中稀土离子浓度与溶液中 Yb^{3+} 离子浓度、溶液温度和浸泡时间有关系。

2.3 MCVD 工艺脱水成棒

将浸渍稀土离子的反应管重新置于玻璃车床上, 在较低温度下通入高纯 Cl_2 与 O_2 的混合气体进

行脱水、干燥。有研究表明^[9]:除水程度与气体组成比例、除水温度及除水时间等因素有关。除水过程结束后,在近 2000 °C 下烧结芯层,收缩成透明的光纤预制棒。脱水是降低光纤损耗的关键工序。

2.4 拉制光纤

在拉丝塔上通过 2000 °C 左右的高温使棒熔融并拉制成直径符合要求的裸光纤,对于非圆内包层的光纤要严格控制拉丝温度,使拉好丝后的光纤内包层形状符合设计要求。

3 Yb³⁺ 双包层光纤的吸收特性及影响因素

双包层光纤输出功率大小和光-光转换效率,都与其对抽运光的吸收性能密切相关,吸收效率是影响光纤性能的主要因素。根据以往的文献报道,影响 Yb³⁺ 双包层光纤对抽运光吸收效率的主要因素有:内包层结构^[10],Yb³⁺ 掺杂浓度,光纤长度,剖面折射率分布,外包层的背底损耗。以下从这几个方面来讨论光纤的吸收效率。

3.1 内包层结构

由于在其他影响因素一定的情况下,不同的内包层形状对光纤的吸收效率有很大影响,国外多采用非圆的内包层结构。Anping Liu 等^[11]根据理论光路计算,用二维方法对如图 1(a),(d),(c),三种内包层形状的吸收特征作了计算,结果表明长方形内包层(c)吸收效率最高,圆形内包层(a)吸收效率最低。

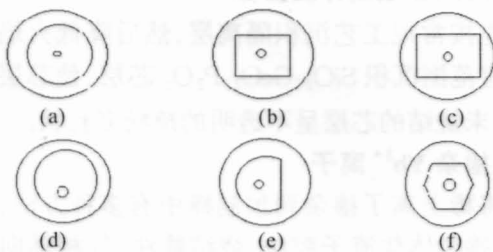


图 1 双包层光纤剖面的几何结构

Fig. 1 Cross section geometry structures of DCF

俄罗斯普通物理研究所^[10]曾对 Yb³⁺ 双包层光纤内包层的形状和尺寸对纤芯的吸收效率影响作了系统研究,非圆的内包层光纤对抽运光的吸收达到 100%,而圆形内包层光纤的吸收效率很低。据分析^[12]这是由于抽运光在圆形内包层中产生螺旋光导致不能有效耦合到芯层中去。

3.2 Yb³⁺ 掺杂浓度

Yb 离子掺杂浓度高低对双包层光纤的吸收特性有很大影响:掺杂浓度太低,则吸收效率不高,掺杂浓度太大,则会引起芯层析晶失透,造成过高损耗。因此,必须适当选择掺杂量,以满足光纤性能的要求。

图 2 显示国内外近年来 Yb 离子掺杂浓度的发展趋势,国外目前最大的 Yb³⁺ 掺杂浓度达到 $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ^[13],对抽运光的吸收几乎达到 100%。由于掺杂浓度高,只需 8 m 长的光纤就可以满足对抽运光完全吸收的要求。国内最大掺杂浓度为 $5.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ^[14],做光纤激光器时则需要 20 m 长的光纤。综合考虑 Yb³⁺ 离子掺杂浓度对吸收效率和光纤损耗的影响,Yb³⁺ 离子浓度的适宜范围为 $(0.7 \sim 1.4) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

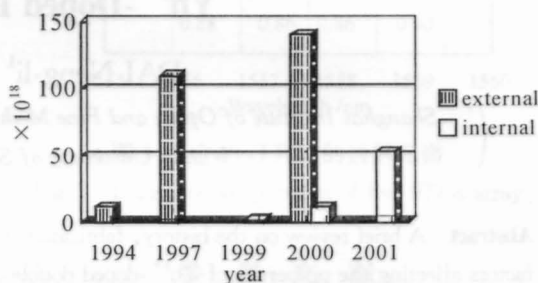


图 2 Yb 离子掺杂浓度的发展

Fig. 2 Yb³⁺ concentration of Yb³⁺ doped DCF

3.3 光纤折射率剖面

在单模传输条件下,光纤的截止波长 λ_c ,数值孔径 NA,纤芯直径 $2a$ 应满足以下的关系,

$$\lambda_c = \pi 2a NA / V_c, \quad NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

双包层光纤折射率剖面在发展过程中有两个变化:内包层的数值孔径增加;内包层的截面积增大。这两种变化都是基于提高双包层光纤对抽运光的吸收,提高光-光转换效率。1994 研制的 Yb³⁺ 双包层光纤内包层数值孔径为 0.15^[4],芯直径为 12.75 μm ,1999 年研制的内包层数值孔径达到 0.46^[7],尺寸为 170 $\mu\text{m} \times 330 \mu\text{m}$,对抽运光的吸收达到 95% (915 nm)。

3.4 双包层光纤基质材料组成

掺 Yb³⁺ 双包层光纤的纤芯是由掺 Yb³⁺ 离子的石英玻璃构成,芯层中还掺入 GeO₂, P₂O₅ 来提高芯层的折射率。芯层^[10]中共掺 Al₂O₃ 可以降低光纤的传输损耗,Yb³⁺ 离子浓度最好在 $(0.7 \sim 1.0) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,超过这个值,将会带来较大的传输损耗。内包层的材料为纯石英,外包层是折射率低于石英的聚合物,要求对抽运光有较小的背底损耗。一般采用的是硅橡胶 (silicon ribbon) 和聚四氟乙稀 (AF

Teflon)^[11], 这要根据抽运功率大小做适当的选择。

4 光在 Yb³⁺ 双包层光纤中的传输损耗

光在双包层光纤中传输时有两种情况: 一是抽运光在内包层和芯层中传输, 二是激光在芯层中传输。在芯层中同时存在抽运光和激光, 此时, 对抽运光的吸收主要取决于 Yb³⁺ 离子掺杂浓度。激光在芯层中传输产生损耗的主要原因有: Yb³⁺ 离子浓度, OH⁻ 吸收的影响。在内包层, 抽运光损耗的主要原因是外包层带来的背底损耗。

5 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器

5.1 多抽运源大功率输出的激光器

典型的装置是 Dominic 等^[7] 采用 4×45 W 半导体激光抽运源阵列, 这个装置实现了 110 W 的激光输出。用光纤作为激活介质, 对于光纤激光器, 这是迄今为止在实验室所能得到的最大功率的激光输出, 纤芯的能量密度高达 300 MW/cm²。

5.2 带布喇格光栅光纤的激光器

Kurkov 等^[10] 设计的拉曼放大器采用这种结构, 在装置前部分是 Yb³⁺ 双包层激光器, 在抽运源尾纤与双包层光纤连接处采用了一个特殊接头 (Taper), 在双包层光纤两头都有光纤光栅。在输出端, 输出 $\lambda = 1049$ nm 的激光。

5.3 简易双包层激光器

装置中用准直-聚焦的透镜耦合系统将抽运光耦合进双包层光纤, 用一个二色镜置于光纤抽运光输入端, 用光纤另一端面作输出镜构成光学谐振腔, 输出光用光谱仪和功率计进行测量。李乙钢等人^[13] 利用这种装置实现了入纤功率为 435 mW, 出纤功率 228 mW, 激光器的斜率效率为 60%。

6 结 论

本工作简要报道了近年来国内外在掺 Yb³⁺ 双包层光纤和光纤激光器方面的进展, 结果表明为实现大功率光纤激光器应用目标, Yb³⁺ 双包层光纤结构设计应采用非圆形内包层结构, 大的内包层截面以及数值孔径, 以增大双包层光纤吸收效率, 提高光-光转换效率。芯层掺 Yb³⁺ 浓度最好控制在 (0.7~

1.4) × 10²⁰ cm⁻³ 范围内。共掺 Al₂O₃ 可以减小光传输损耗。由于掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器实现了高效率和大功率激光输出, 为其在激光加工、拉曼放大器方面的应用提供了广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 David C. Brown, Hanna J. Hoffman. Thermal stress and thermal optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37** (12): 207~217
- 2 J. E. Townsend, A. C. Tropper. Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1988, **24**: 1111~1113
- 3 Snitzer E., Po. H. Hakimi, F. Tumminelli, Mccollum B. C. Double-clad, offset core Nd fiber laser. *Optical Fiber Communication conf.*, 1988, PD5
- 4 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μ m regions. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~865
- 5 M. Muedel, B. Engstrom, D. Kea et al.. 35-Watt cw singlemode ytterbium fiber laser at 1.1 μ m. *Proc. CLEO*, 1997, Post-deadline paper CPD30-1
- 6 Boggavarapu D, Caffey D, He. X et al.. Ultrahigh-power laser diode array pump source for fiber lasers. *Tech. Dig. OFC '98*, San Jose, CA, 1998, paper TuH7:47~48
- 7 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts et al.. 110 W fiber laser. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1158~1160
- 8 Nie Qihua. *Fiber Laser and Amplifier Tech.* Electron Indus. Press, 1997. 10~12
- 9 J. E. Townsend, S. B. Poole, D. N. Payne. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(7): 329~331
- 10 A. S. Kurkov, A. Yu. Laptev, E. M. Dianov et al.. Yb³⁺-doped double-clad fibers and lasers. *Proc. SPIE*, 2000, **4083**: 118~126
- 11 Anping Liu, Kenichi Ueda. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers. *Opt. Comm.*, 1996, **132**: 511~518
- 12 Li Yigang, Fu Chengpeng, Su Hongxin et al.. Investigation of double-clad fiber laser. 2001 'China Confer. for Photoelectron Apparatus and Integration, Guilin. 2001. 368~371 (in Chinese)
- 13 V. Reichel, S. Unger, V. Hagemann et al.. 8 W highly-efficient Yb-doped Fiber-Laser. *Proc. SPIE*, 2000. **3889**: 160~169
- 14 Ning Ding, Li Yigang, Sun Jianjun et al.. Yb-doped double-clad fiber laser with novel shape of inner cladding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4): 300 (in Chinese)