

文章编号: 1001-3806(2009)05-558-03

一种新型折射率掺镱双包层光纤

潘志勇,任军江,黄剑平,何耀基,顾劲忆,邢美术
(中国电子科技集团公司第23研究所,上海201900)

摘要: 为了提高光纤放大器单纤输出功率,设计了一种新型折射率掺镱双包层光纤,纤芯直径 $30\mu\text{m}$,包层直径 $125\mu\text{m}$ 。采用一种改良的高温气相掺杂技术和改进的化学气相沉积法制作,纤芯折射率分布为凹陷型结构,掺杂区为低折射率区。对光纤的荧光特性、模场特性以及放大特性进行了测试。试验结果表明,该新型折射率分布设计有利于纤芯对抽运光吸收,荧光输出平坦,对光纤进行弯曲处理可实现平坦模场的能量输出,5m光纤实现了40dB高功率飞秒信号光放大,输出功率30kW。

关键词: 光纤光学;掺镱双包层光纤;高温气相掺杂;折射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.033

A double clad Yb-doped fiber in a new refractive index profile

PAN Zhi-yong, REN Jun-jiang, HUANG Jian-ping, HE Yao-ji, GU Shao-yi, XING Mei-shu

(The 23rd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to increase output power of a single fiber amplifier, a double clad Yb-doped fiber in a new refractive index profile was designed with a core diameter of $30\mu\text{m}$ and a cladding diameter of $125\mu\text{m}$. The fiber, prepared with modified chemical vapor deposition (MCVD) process and improved high temperature vapor deposition, has a hollow refractive index profile with lower refractive index in the doped area. The fluorescence, mode field and amplification characteristics of the fiber were tested. The test results show that the pump power can be absorbed effectively and fluorescent spectrum curve becomes smooth for this new kind fiber. It is realized that smooth mode field energy can output by bending the fiber. 40dB high power fs signal light was amplified in a 5m fiber with output power up to 30kW.

Key words: fiber optics; double clad Yb-doped fiber; high temperature vapor deposition; refractive index

引言

光纤激光器的发展方向为高功率以及高光束质量。提高单纤输出功率的方法为增加纤芯直径、降低数值孔径^[1],但纤芯增大时光纤传输模式增多,光束质量降低。激光在光纤中传输时能量集中在纤芯中心,引起受激喇曼散射和受激布里渊散射等非线性效应损伤光纤,从而降低了光纤可传输功率。非线性效应和光纤的非线性折射率系数、传输功率以及模场分布有关。非线性折射率系数取决于非线性折射率和面积。GHATAK^[2]等人提出了一种大模场平顶(large flattened mode, LFM)光纤,采用折射率分布的设计来改变光纤中基模模场分布,均化纤芯中的能量,降低光纤的非线性效应,从而提高光纤的输出功率。美国Lawrence国家实验室DAWSON^[3]等人研究了这种光

纤,在纤芯直径为 $30\mu\text{m}$ 的光纤中获得了0.7mJ(3ns)功率输出。国内ZHAO等人^[4-5]分析了LFM光纤中的模式和弯曲性能,但未进行详细的实验分析研究。LFM光纤可均化光纤纤芯的能量分布,在大功率光纤激光器和放大器中应用可实现高功率输出,有着巨大的应用和发展前景。

目前国外对该结构光纤都集中于大包层直径($400\mu\text{m}$)的研究,而这种规格和常用的标准光纤($125\mu\text{m}$)熔接难,提高了相关匹配器件的制作难度。如果制作 $125\mu\text{m}$ 包层直径的有源光纤能很好地解决这些因光纤尺寸而产生的匹配问题,但小包层直径的大芯/包比例光纤预制棒制作工艺难度很大。利用改进的化学气相沉积法(modified chemical vapor deposition, MCVD)和高温气相掺杂工艺制作出了这种新型折射率分布的掺镱双包层光纤,光纤纤芯直径 $30\mu\text{m}$,包层直径 $125\mu\text{m}$ 。研究表明:这种新型折射率分布设计有利于纤芯对抽运光吸收,荧光输出平坦,光强输出分布平坦;采用5m光纤,在4W的980nm抽运下实现了40dB高功率飞秒信号光放大,输出功率达30kW。

作者简介:潘志勇(1977-),男,工程师,主要从事掺稀土特种光纤的研制。

E-mail: panzy168@163.com

收稿日期:2008-11-08;收到修改稿日期:2009-02-20

1 光纤折射率设计与理论分析

为均化纤芯能量分布,降低纤芯中心的能量密度,减少光纤的非线性效应,实现光纤的平顶模场及高功率输出,通过优化折射率分布,设计的光纤结构如图1所示,在纤芯边缘沉积一个折射率高于纤芯正中的芯环。折射率高环直径和凹陷纤芯直径为特定比例,高环和凹陷纤芯区域相对包层折射率差可在一定范围内控制,纤芯直径 $30\mu\text{m}$ 。

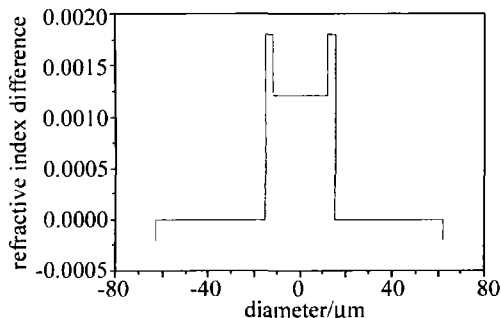


Fig. 1 Refractive index design of a fiber

光纤纤芯直径增大时,纤芯的传输模式增加。根据截止波长 λ 计算公式:

$$\lambda = \frac{2\pi a d_{NA}}{\nu} \quad (1)$$

式中, λ 为截止波长; a 为纤芯直径; d_{NA} 为光纤数值孔径; ν 为归一化频率。可知,当纤芯直径 $30\mu\text{m}$, 数值孔径 0.06 时,光纤在 1053nm 波长的 $\nu = 5.4$, 光纤中的传输模式多达 16 个。则光纤的 $M^2 > 3$, 光束质量不理想。

采用如图1所示的纤芯折射率分布设计,可消除因纤芯直径变大光纤模式变多的影响。光在该纤芯中传输时,由于边缘的折射率高于纤芯的折射率,将发生干涉和反射现象,部分光能量(高阶模)泄漏,光沿光纤传输时,由于纤芯的高折射率环有利于包层中泄漏的高阶模光重新进入纤芯高折射率环,进行能量再分布,最后在纤芯形成平坦、强度均匀分布的模场^[6]。

2 光纤制作

这种新型折射率设计的掺镱双包层光纤预制棒采用一种高温气相掺杂技术与 MCVD 结合的工艺研制。这种气相掺杂工艺不像液相掺杂,管内的直接氧化物沉积使镱离子因温度挥发量相当小,应用气态 $\text{Al}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺技术提高了光纤的掺镱浓度以及掺杂均匀性,工艺过程不会引入水分及其它杂质,光纤损耗小,特别是气相掺杂的多层掺杂技术可实现纤芯的特殊折射率分布沉积^[7-8],并制作大纤芯直径的掺镱光纤预制棒。

预制棒制作完成后,光学冷加工预制棒内包层为异八面形,拉丝的一次涂覆材料采用低折射率光纤涂

覆树脂,实现光纤的双包层结构。

3 试验结果与讨论

3.1 光纤折射率分布

光纤折射率分布采用 NR9200 光纤分析仪测试,测试结果如图2所示。可以看出,制作的光纤结构和设计的结构基本相似。光纤拉丝过程对折射率分布没有明显的影响。

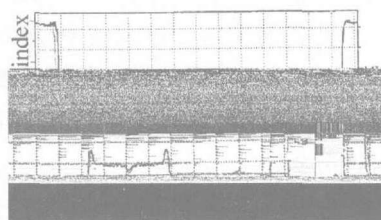


Fig. 2 Refractive index of a fiber

3.2 光谱特性分析

光纤与 980nm 抽运光源通过匹配的单模光纤直接熔接,用 AQ6319 型光谱仪对光纤进行荧光光谱测试。实验中通过弯曲不同长度光纤来分析光纤的光谱特性。

图3中曲线 A 为 1m 光纤的荧光谱,由于使用长

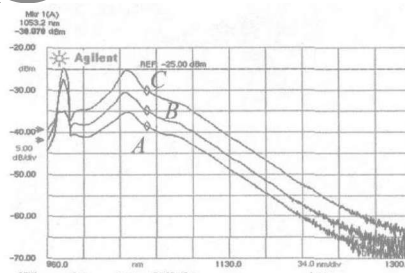


Fig. 3 The fluorescent spectrum of 1m fiber

度短,抽运光没能完全吸收,能看到高于荧光谱线的 980nm 抽运光。当把光纤弯曲两个直径为 5cm 的圈时,光纤荧光谱线为图3中曲线 B,弯曲直径为 3cm 圈时的光纤荧光谱线为图3中曲线 C。由图可知,随光纤弯曲半径的减少,抽运光功率减少而荧光功率提高。纤芯数值孔径 0.06,弯曲后纤芯损耗应当增大,由于光纤为双包层结构,石英内包层的高数值孔径限制了光的泄漏。试验过程中荧光功率反而提高的原因可能是光纤的特殊结构,包层抽运光耦合进纤芯后在弯曲时,高折射率环阻止了纤芯光的泄漏,还有利于包层光进入纤芯,使荧光输出功率变大。由此可见,光纤的新型折射率设计能提高光纤对抽运光的耦合效率,提高荧光输出功率。

6m 光纤绕成直径 8cm 圈时的荧光输出谱如图4所示,图中 A, B, C 分别为抽运功率 0.5W , 1W , 1.5W 时的荧光输出谱线。从图中可以看出, 980nm 抽运光在谱线图上没有明显的峰,基本被纤芯吸收,随着抽运功率的提高,荧光功率加大,荧光谱谱线也更趋平坦。

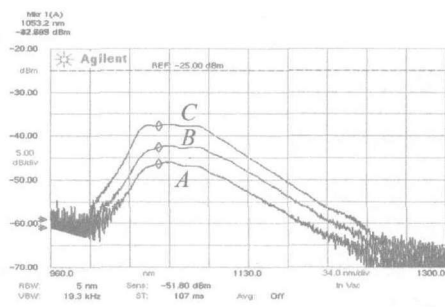


Fig. 4 The fluorescent spectrum of 6m fiber

可见,光纤的特殊折射率设计以及高浓度掺杂,使光纤在 1.5W,980nm 抽运功率下的最佳使用长度小于 6m。图 4 中曲线 C 更接近光纤的理论荧光输出谱线。

3.3 模场特性分析

采用 CCD 分析光纤输出 1053nm 光的光强,和常规的阶跃型光纤(相同纤芯直径)进行比较,以研究这种新型折射率分布结构设计光纤的模场特性。图 5a 为新型折射率分布结构设计光纤经过弯曲直径 3cm 圈后输出光通过 CCD 测试出的光强分布;图 5b 为常

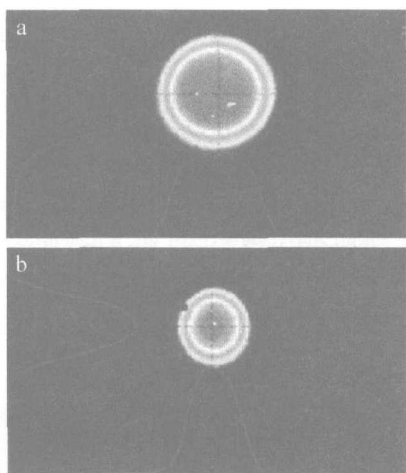


Fig. 5 The mode field of a fiber

规阶跃型光纤的光强分布。比较得出,这种新型折射率光纤模场输出较常规光纤平坦,且模场面积大。

3.4 光纤放大特性

把光纤应用于光纤放大器,把 5m 光纤绕成直径

8cm 的圈,试验中 30dB 飞秒信号光通过 4W 的 980nm 抽运光进行功率放大,实现了增益 40dB 的飞秒信号光输出,输出功率达 30kW。受实验条件限制,未能进行更高抽运光功率的光信号放大实验。

4 结论

通过对这种新型折射率设计的掺镱双包层光纤的初步研究,得出 5 点结论:(1)基本实现了光纤的结构设计;(2)光纤荧光光谱平坦;(3)光纤的新型折射率设计有利于对抽运光的吸收;(4)弯曲光纤可实现平坦光强输出;(5)具有良好的光放大性能,实现 40dB 飞秒信号光放大,输出功率 30kW。

光纤的这种新型折射率设计能有效减少非线性效应对光纤的影响,可提高光纤的输出功率,实现平坦光强输出。采用改良的高温气相掺杂工艺进行高浓度掺杂后,该光纤预计可应用于高功率光纤放大器及高功率光纤激光器。

参考文献

- [1] FERMAN M E. Single mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulse [J]. Opt Lett, 1998, 23(1): 52-56.
- [2] GHATAK A K, GOYAL I C, JINDAL R. Design of waveguide refractive index profile to obtain flat modal field [J]. SPIE, 1998, 3666: 40-44.
- [3] DAWSON J W, BEACH R J, JOVANOVIĆ I, et al. Large flattened mode optical fiber for reduction of nonlinear effects in optical fiber lasers [J]. SPIE, 2004, 5335: 132-135.
- [4] ZHAO Ch J, PENG R W, TANG Zh X, et al. Design and analysis of a kind of large flattened mode optical fiber [J]. Chinese Physics, 2006, 15(7): 1838-1842.
- [5] ZHAO Ch J, PENG R W, TANG Zh X, et al. Modal fields and bending loss analyses of three-layer large flattened mode fibers [J]. Opt Commun, 2006, 266(1): 175-180.
- [6] HOTOLEANU M, SÖDERLUND M, HOFFMAN H J, et al. Coiling effects on high order mode suppression of a radially doped LMA fiber [J]. SPIE, 2007, 5485: 1247-1256.
- [7] POOLE S B, PAYNE D N, FERMAN M E. Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions [J]. Electron Lett, 1985, 21(17): 737-738.
- [8] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(9): 1435-1446.

(上接第 557 页)

参考文献

- [1] WANG Sh Y, LIN D Y, WANG Ch. Recent progress of fiber [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 657-661 (in Chinese).
- [2] XIAO R, HOU J, JIANG Ch F. Coherent combining of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 516-518 (in Chinese).
- [3] LI Y Zh, QIAN L J, LU D Q, et al. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(5): 957-963.
- [4] GAPONTSEV V, GAPONTSEV D, PLATONOV N, et al. 2kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]// Conference on Lasers and Electro-Optics Europe. Munich: IEEE, 2005: 508-510.
- [5] CHENG Zh L, HOU J, JIANG Ch F. Theoretical study on thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser [J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 544-547 (in Chinese).
- [6] LIAO Y B. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 153-158 (in Chinese).
- [7] HILL C A, HALL D R. Coupling loss theory of single-mode waveguide resonators [J]. Appl Opt, 1985, 24(9): 1283-1290.
- [8] FU Y Q, FENG G Y, ZHANG D Y, et al. M^2 factor of linear polarization modes in a step-index fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(7): 1342-1345 (in Chinese).
- [9] XIAO R, ZHOU P, HOU J, et al. Effect of partial coherence of laser has on the irradiance distribution of coherent combining of fiber laser arrays in far field [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(2): 819-823 (in Chinese).