

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1417-04

矩形内包层掺 Yb^{3+} 石英光纤的研制及其抽运性能^{*}

宁 鼎¹⁾²⁾ 李乙钢¹⁾ 董新永¹⁾ 黄榜才¹⁾ 孙建军²⁾ 吕可诚¹⁾ 吕福云¹⁾ 董孝义¹⁾

(1),南开大学现代光学研究所,天津 300071
(2),信息产业部电子材料研究所,天津 300220

摘要 : 利用改进的化学汽相沉积工艺加溶液掺杂法,配合光学加工技术,自行设计并研制出内包层为矩形等新结构的掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤,实现了上述光纤的包层抽运激光器的成功运转。矩形光纤在 1075.6 nm 波长处获得 84 mW 的最大激光输出功率,斜率效率达 77%。

关键词 : 矩形内包层;方形内包层; Yb^{3+} 掺杂;包层抽运;光纤激光器

中图分类号 : TN25 文献标识码 : A

1 引 言

目前,高功率光纤激光器中广泛地采用了掺稀土元素双包层光纤^[1-4],它极大地提升了光纤激光器的输出功率,拓宽了其在拉曼光纤放大器、空间光通信、工业加工等领域的应用。

传统的圆形内包层光纤的制作工艺相对简单,但由于固有的圆对称性会产生大量不穿越纤芯的螺旋光,从而降低了芯子的吸收效率,而矩形内包层光纤,不仅能与作为抽运源的激光二极管阵列很好地匹配,而且消除了螺旋光,提高了芯子的吸收效率。已有文章从射线光学出发,对上述两种光纤进行了分析,证明了矩形内包层光纤在诸多参数上的优越性^[5,6]。

本文报道了自行设计与研制的矩形和方形内包层掺 Yb^{3+} 石英光纤,内包层的数值孔径(NA)约为 0.36,芯子掺入 Yb_2O_3 的质量分数为 0.24%。利用上述两种光纤实现了包层抽运光纤激光器的成功运转,并对两者的阈值、斜率效率进行了分析和讨论。

2 基本原理

以射线光学为基础,对矩形内包层中的光线传输进行分析是简洁而实用的^[6]。如图 1 所示,横截面为 $2a \times 2b$ 、纤芯半径为 r_0 的矩形内包层光纤,在其输入端面上一组具有相同入射方向的光线,在

$P(x_0, y_0)$ 点以角度 θ 入射到内包层中,然后由 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 四个表面反射。假设所有反射面为平面,光线遵循平面反射镜规律,则光线的传输路径在相应的反射平面上可以按未折变的路径处理,同时纤芯和光纤的四个反射表面也相应扩展。经这样处理后,纤芯、光线和反射表面的相对位置未改变。

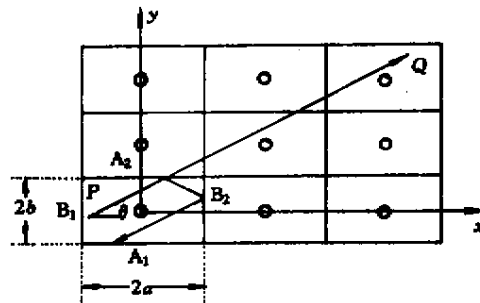


Fig. 1 The propagation paths of rays within a rectangular inner cladding

在图 1 的坐标系,未折变的光线 PQ 可用下式来表示 :

$$y - y_0 = (x - x_0) \tan \theta. \quad (1)$$

当光线被 A_1 与 A_2 反射了 m 次、 B_1 与 B_2 反射了 n 次之后,相应芯子坐标变为 $(2na, 2mb)$, m 和 n 为整数。因此,芯轴与光线之间的距离为

$$d_{mn} = \frac{\chi(na \tan \theta - mb) + y_0 - x_0 \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}. \quad (2)$$

(2) 式给出了经过 $m + n$ 次反射之后,光线与芯子之间的位置关系。当 $d_{mn} < r_0$ 时,吸收才能发生。可知 d_{mn} 不是常数,它随反射次数 m 和 n 而变化。光线的路径扫过内包层的整个横截面,在任何位置都有出现的可能。按照 (2) 式,几乎所有的光线都具有在

^{*} 国家自然科学基金(69877006)及天津市自然科学基金(003600911)资助课题。

$d_{mn} < r_0$ 的区域内出现的可能性,都是可被吸收的光线。下面的几种特殊情况是不经过纤芯的光线:

- 1) $\theta = 0$, 且 $|y_0| > r_0$;
- 2) $\theta = \pi/2$, 且 $|x_0| > r_0$;
- 3) $\tan\theta = \frac{b}{a}$, 且 P 点不在 $y = \pm \frac{b}{a}x \pm$

$\frac{r_0}{a} \sqrt{a^2 + b^2}$ 两条直线之间。

但在实际中,入射到内包层端面上的光线满足条件 1) ~ 3) 的极少。因此,我们能合理地得出结论:矩形内包层光纤的可吸收功率比接近于均匀不变。另外,依据上述分析和(2)式, a/b 的比例对于吸收效率并无显著影响,正方形是矩形在 $a = b$ 时的特例,所以两者应该没有本质区别。为了获得最佳的耦合效率,矩形内包层的横截面形状可依据抽运源的情况来设计。

3 光纤的制作

采用改进的化学汽相沉积(MCVD)工艺加溶液掺杂法^[7,8]制作了芯子中掺 Yb^{3+} 、包层为 SiO_2 的圆形单模光纤预制棒,外径 20.3 mm,掺 Yb^{3+} 芯子直径 0.65 mm。从棒上截取相邻的两段,进行研磨与抛光。经加工后,棒的截面形状为矩形和正方形,几何尺寸分别为 $16.82 \text{ mm} \times 11.34 \text{ mm}$ 和 $14.26 \text{ mm} \times 14.26 \text{ mm}$,其中矩形截面的边长比控制在约 3:2。

在通用拉丝塔上拉丝并在线涂覆聚合物外包层与保护层。为了减小预制棒在高温熔融状态下发生的形变,整个拉丝工艺应在低温、低速的条件下进行。通常控制熔棒温度低于 $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 、拉丝速度低于 20 m/min 。我们在拉制正方形光纤的过程中,熔棒温度偏高,造成了光纤截面的变形。在随后进行的矩形光纤拉制中,将熔棒温度降低了 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,未发现形变。选用一种折射率低于石英的紫外光固化涂料作外包层, $n = 1.42$,使内外包层之间的理论数值孔径约为 0.36,内包层成为传输抽运光的多模通道。最外面的保护涂层是高模量、高折射率($n = 1.52$)的紫外光固化涂料。图 2 给出了矩形和正方形内包层光纤的示意图。两种光纤的参数如下:内包层几何尺寸分别为 $100 \text{ } \mu\text{m} \times 70 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $85 \text{ } \mu\text{m} \times 85 \text{ } \mu\text{m}$,通过截断法测出 976 nm 波长下抽运光在内包层中的传输损耗分别为 73 dB/km 、 65 dB/km 。在矩形光纤中相互垂直的两个方向上,数值孔径分别为 0.360、0.343,正方形光纤的数值孔径为 0.358。单

模芯子的掺 Yb^{3+} 的质量分数为 0.24%,模场直径为 $(5.0 \pm 0.5) \text{ } \mu\text{m}$,截止波长约 900 nm ,能够保证波长大于 1000 nm 的激光单模传输。这种掺 Yb^{3+} 双层包层光纤具有大的几何尺寸、大的数值孔径且内包层形状新颖。

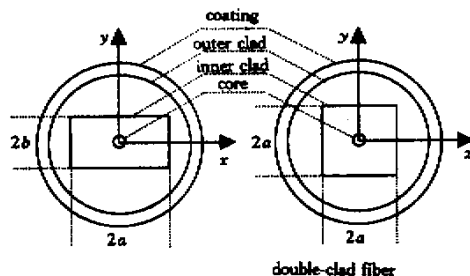


Fig.2 Sketch maps of rectangular and square inner cladding fibers

4 实验与结果

实验装置如图 3 所示。抽运源采用了带多模尾纤输出的二极管激光器,中心波长为 976 nm ,尾纤的直径为 $100 \text{ } \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22,最大出纤功率约 500 mW 。抽运光经准直-聚焦的透镜耦合系统注入光纤,紧贴光纤的前端面上放置一个二色镜(对 976 nm 光,透射率 T 约为 85%;对 $1020 \text{ nm} \sim 1100 \text{ nm}$ 光,反射率 R 大于 99.9%)作为前腔镜,后腔镜利用了光纤解理后端面的菲涅耳反射(约 4%),两者构成典型的法布里-珀罗激光谐振腔。使用量热型光功率计测量输出的激光功率,激光光谱用 MS9001B1 光谱仪测量。

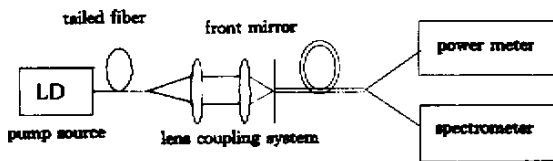


Fig.3 Experimental setup

首先,以 20 m 矩形内包层光纤构成激光谐振腔,测量激光输出功率随抽运源工作电流的变化,在最大工作电流为 2.0 A (对应于最大抽运功率)时,用光谱仪观测了激光输出光谱。图 4 给出矩形内包层光纤激光器的光谱特性,激光的中心波长为 1075.6 nm ,谱宽(FWHM)很窄,小于 2 nm ,空间模式为基横模。图中未发现剩余抽运光。

图 5 中曲线 1 给出了矩形内包层光纤激光器的输出特性。发现对应于激光阈值的抽运源工作电流为 850 mA ,在最大抽运功率的条件下,激光输出为

84 mW, 斜率效率为 77%。

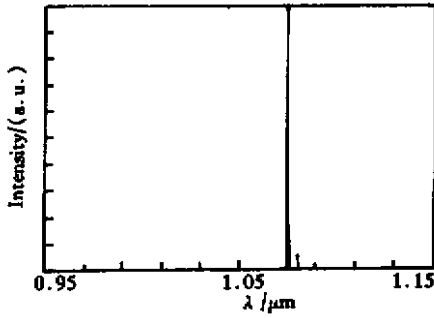


Fig. 4 Laser spectrum of rectangular inner clad fiber

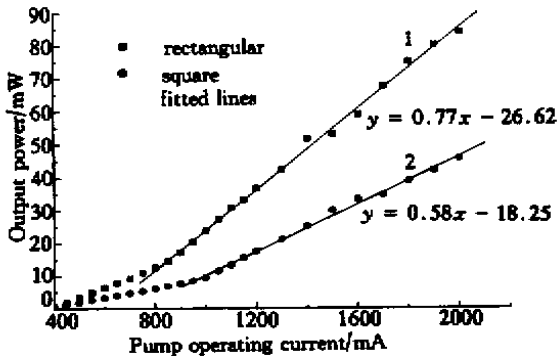


Fig. 5 The comparison of laser output between rectangular and square inner cladding fibers

以同样步骤对 20 m 正方形内包层的光纤进行了观测。图 6 给出正方形内包层光纤激光器的光谱特性, 激光中心波长为 1077.6 nm, 谱宽约 2 nm, 基横模输出。经过 20 m 光纤的吸收之后, 图中仍存在剩余抽运光。图 5 中曲线 2 给出了正方形内包层光纤激光器的激光输出特性。激光阈值对应的抽运源工作电流为 1000 mA, 在最大抽运功率条件下, 激光输出功率为 46 mW, 斜率效率为 58%。

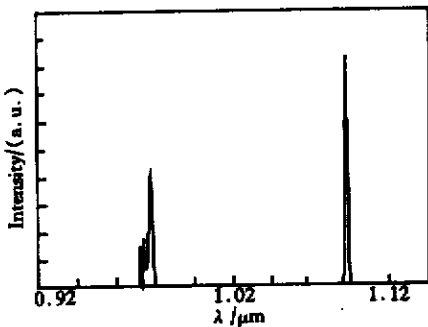


Fig. 6 Laser spectrum of square inner clad fiber

5 结论与分析

我们知道, 多模抽运光在矩形内包层中传输时, 不会产生螺旋光。只要光纤足够长, 绝大部分抽运光迟早会穿越纤芯, 并被其中的 Yb^{3+} 离子所吸收。

因此, 与传统圆形内包层相比, 矩形的内包层大大地提高了对注入抽运光的吸收效率, 使其在较低的抽运功率下即可达到阈值。例如, 22 m 长圆形内包层光纤的激光阈值对应抽运源工作电流为 1500 mA^[9], 而本文中矩形内包层光纤的相应值为 850 mA, 下降了 43%。虽然两次实验所用光纤的参数不完全相同, 但从数量级上仍可说明这一问题。

正方形是矩形在 $a = b$ 时的特例。从理论上分析, 二者在抽运光传输和激光特性上的差别应该不大。但是从实验结果来看, 如图 5 中两条曲线所示, 矩形与正方形光纤激光器在阈值、最大输出激光功率、斜率效率上存在较大差距。其主要原因是: 在正方形光纤拉丝的工艺过程中熔棒温度偏高, 造成了截面形状的变形。在几何尺寸测量中已观察到正方形的四角变钝、四条边有曲率而非直线。从近似于一个圆形来考虑, 其中必然会存在大量的不经过纤芯的螺旋光不能够被吸收 (见图 6, 经过 20 m 光纤的吸收后, 正方形光纤中仍存在一定数量的剩余抽运光), 从而降低了纤芯中 Yb^{3+} 对注入抽运光的吸收效率, 导致阈值升高, 最大激光输出功率与斜率效率降低。

总之, 我们用改进的化学汽相沉积工艺加溶液掺杂技术制作了掺 Yb^{3+} 石英光纤预制棒。经光学加工后, 拉制出内包层形状为矩形与正方形的掺 Yb^{3+} 双包层光纤。利用这两种光纤进行了包层抽运光纤激光器的实验。其中矩形与正方形光纤激光器的斜率效率分别达到 77% 和 58%。比较而言, 矩形内包层光纤在对抽运光的转换效率上更具优越性, 是包层抽运激光器的理想选择。

参 考 文 献

- [1] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb^{3+} -doped silica fiber lasers in 1 μm region. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11):863 ~ 865
- [2] Liu A, Song J, Kamatani K *et al.*. Rectangular double-clad fiber laser with two-end-bundled pump. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(18):1673 ~ 1674
- [3] Dominic V, MacCormack S, Waarts R *et al.*. 110 W fiber laser. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158 ~ 1160
- [4] Kim N S, Hamada T, Prabhu M *et al.*. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers. *Opt. Commun.*, 2000, **180**(15):329 ~ 337
- [5] Liu A, Ueda K. Propagation losses of pump light in rectangular double-clad fibers. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(11):3130 ~ 3134
- [6] Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular,

- offset and rectangular double-clad fibers. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(11) 511 ~ 518
- [7] Townsend J E , Poole S B , Payne D N. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(7) 329 ~ 331
- [8] 宁 鼎 王文涛 阮 灵等. 掺 Yb³⁺ 双包层石英光纤的研制及其激光特性. *中国激光*, 2000, **A27**(11):987 ~ 991
- [9] 宁 鼎 付成鹏 丁 镭等. 掺 Yb³⁺ 双包层石英光纤激光器的实验研究. *光子学报*, 2001, **30**(4) 442 ~ 445

Fabrication of Yb³⁺-Doped Silica Fiber with Rectangular Inner Cladding and Its Pumping Performance

Ning Ding¹⁾²⁾ Li Yigang¹⁾ Dong Xinyong¹⁾ Huang Bangcai¹⁾ Sun Jianjun²⁾
Lü Kecheng¹⁾ Lü Fuyun¹⁾ Dong Xiaoyi¹⁾

(1), *Modern Optics Institute , Nankai University , Tianjin 300071*

(2), *Electronic Material Research Institute , Ministry of Information Industry , Tianjin 300220*

(Received 27 April 2001 ; revised 9 July 2001)

Abstract : The Yb³⁺-doped double-clad silica fibers with rectangular and other novel inner-cladding have been made by using modified chemical vapor deposition process , solution-doping and optical machining altogether. The operation of these cladding pumped fiber lasers is demonstrated. The maximal laser output of rectangular fiber laser is 84 mW at the wavelength 1075.6 nm , and a slope efficiency of 77% has been achieved.

Key words : rectangular inner cladding ; square inner cladding ; Yb³⁺ doping ; cladding-pumping ; fiber laser