

文章编号: 0253-2239(2004)09-1240-5

# 侧面抽运的掺 Yb 双包层光纤激光器

欧 攀 闫 平 韦文楼 巩马理

(清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 利用光纤角度磨抛侧面耦合新技术研究了侧面抽运的掺 Yb 双包层光纤激光器。实验上采取新的加工工艺获得了端面具有小锐角磨抛斜角的多模光纤, 专门设计的高精密机械调整结构有效地将多模光纤的斜面和双包层光纤的侧面精确对准, 通过不同的折射率匹配材料进行的研究, 发现折射率匹配材料对于注入功率和抽运效率都有较大影响。实验中通过光纤角度侧面耦合器能够注入 1.12 W 抽运光进入双包层光纤, 侧面耦合效率最高可达 80%。将该侧面耦合技术用于侧面抽运的掺 Yb 双包层光纤激光器, 在单个尾纤输出的半导体激光器侧面抽运下得到光纤激光器的最大连续激光输出功率 282 mW, 斜率效率为 55.5%。实验结果表明, 光纤角度磨抛耦合技术是掺 Yb 双包层光纤激光器的一种简单有效的侧面抽运方式。

**关键词:** 导波与光纤光学; 光纤激光器; 侧面抽运; 双包层光纤; 耦合效率

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Side-Pumped Yb-Doped Double-Clad Fiber Laser

Ou Pan Yan Ping Wei Wenlou Gong Mali

(Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments,  
Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 30 September 2003; revised 25 November 2003)

**Abstract:** Side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser is studied with a novel technology of fiber-angle-polished side-coupler. In experiments, multimode fibers with small polished-angle end by advanced technics are acquired and the precision mechanical adjustments is used to aim the polished-angle multimode fiber end at the double-clad fiber side accurately. Several kinds of index-matching materials are adopted for research to find that the index-matching materials are critical to launching power and coupling efficiency in this kind of side-couplers. The fiber-angle-polished side-coupled technology is adopted to inject maximal pumping power of 1.12 W into double-clad fiber, and the highest coupling efficiency acquired is even near 80%. Using the side-coupled to pump a CW side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser, maximum output power of 282 mW and slope efficiency of 55.5% are obtained by one pigtail laser diode pumping source. The experimental results demonstrate fiber-angle-polished side-coupling technology is a simple and efficient pumping way for Yb-doped double-clad fiber laser.

**Key words:** guided wave and fiber optics; fiber laser; side pump; double-clad fiber; coupling efficiency

## 1 引 言

高功率光纤激光器自从 1997 年出现输出功率 20~35 W 器件, 1998 年发展到 55 W, 至 1999 年已

发展到 110 W 连续激光输出。目前, 输出功率 10~20 W 的光纤激光器已经商品化。近年, 美国 IPG Photonics 公司和德国 Jena 大学的应用物理所分别报导了单根双包层光纤连续输出功率高达 135 W<sup>[1]</sup> 和 150 W<sup>[2]</sup> 的光纤激光器。最近, 单根光纤输出 1000 W 的光纤激光器也已问世<sup>[3]</sup>。国内多家单位

E-mail: opp00@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2003-09-30; 收到修改稿日期: 2003-11-25

也加强了高功率双包层光纤激光器的研究<sup>[4,5]</sup>。与现有的其他激光器相比,高功率光纤激光器以其独特的高亮度(135 W 激光连续输出光束质量:  $M^2 < 1.05$ )和高效率(高功率输出情况下斜率效率高达 50% 以上)性能,将在激光器家族中占据重要的地位<sup>[1]</sup>。

抽运功率耦合技术作为高功率光纤激光器和光纤放大器的核心技术之一,目的是要把几十瓦甚至数百瓦的半导体激光器输出耦合入直径只有数百微米的双包层光纤内包层,以获得高的抽运功率。在高功率光纤激光器的发展过程中,端面抽运技术是较为简单的方式。该方式通常是先将半导体激光器发出的抽运光用微透镜阵列准直后再进行光束整形,然后通过透镜系统将抽运光聚焦耦合入双包层光纤。然而端面抽运也有不利之处。首先,光纤端面被用来进行端面抽运耦合,因此无法与其它光纤融接以用于光纤放大器等结构。其次,双包层光纤仅有两个端面,能够接纳抽运光的能力有限,通过对半导体激光器光束整形来提高端面耦合的抽运功率所需成本极高,因而不利于光纤激光器的功率扩展。此外该方式需采用高精度的多维光纤调节系统,也带来了因调节系统的漂移引起的系统稳定性问题。有鉴于此,光纤侧面抽运的耦合方式用于将抽运光耦合进入双包层光纤内包层的研究逐渐展开。针对于双包层光纤的特点先后研究发展了微棱镜耦合<sup>[6]</sup>、V 型槽耦合<sup>[7]</sup>、熔锥耦合<sup>[8]</sup>、光纤角度磨抛耦合<sup>[9]</sup>、嵌入微反射镜耦合<sup>[10]</sup>和光栅耦合<sup>[11]</sup>等多种侧面抽运的耦合方式,这些侧面耦合都有各自特殊的工艺要求。国内也有人提出了利用微型棱镜侧面耦合的技术<sup>[12,13]</sup>,但是还未见相关方面的实验报道。

光纤角度磨抛耦合技术具有耦合效率高,对双包层光纤无损伤,工艺上较为容易实现等特点。参考文献<sup>[7]</sup>提出了光纤角度磨抛耦合技术,获得了高的耦合效率但是却忽略了注入功率的研究;参考文献<sup>[14]</sup>将该技术用于掺 Nd 双包层光纤激光器的研究,但是实验获得的光纤激光输出功率不到 200 mW,斜率效率仅 20%。本文在实验上将光纤角度磨抛耦合用于掺 Yb 双包层光纤激光器的侧面抽运,研究了该耦合技术的耦合效率和耦合功率,用不同的折射率匹配材料获得了最高 80.2% 的耦合效率,最大能够注入 1.12 W 的抽运功率进入双包层光纤。并且以国产尾纤输出半导体激光器为抽运源对双包层光纤进行侧面抽运获得了 282 mW 的连续光纤激光输出,斜率效率达到 55.5%。实验证明

光纤角度磨抛耦合技术是掺 Yb 双包层光纤激光器的一种简单有效的侧面抽运方式。

## 2 侧面耦合研究

### 2.1 侧面耦合原理

光纤角度磨抛侧面耦合结构原理如图 1 所示。主要包括:双包层光纤、折射率匹配材料和多模光纤。双包层光纤由外包层、纤芯和内包层组成。其中内包层是一根具有较大直径和较高数值孔径的多模光波波导,其横截面具有不同的形状,主要有 D 形、圆形、矩形、卵形及梅花形等形状的内包层。在内包层中嵌入了一根很纤细的掺杂了稀土元素的光纤芯,也就是双包层光纤的纤芯,纤芯的折射率较内包层的折射率略高,并且纤芯的尺寸相对很小,一般为几个或几十微米,具有如此小的尺寸及与内包层折射率差,因而它能够成为单模的光波波导。而光纤的外包层折射率较内包层折射率低,保证了内包层能够成为多模波导而有效传输抽运光。对于这种双层结构的光纤来说,抽运光不是直接进入纤芯中,而是先进入到包围在纤芯外部的内包层中,而在整个光纤长度上传输的过程中,抽运光都是从多模的内包层耦合到单模的纤芯中的,从而以很简便的方法便延长了增益介质的长度以使抽运光被充分吸收。高功率半导体激光器抽运源产生的抽运光先通过多模光纤的一端耦合进入多模光纤中,多模光纤的另一端被磨抛出与光纤轴线成较小的角度的细长椭圆端面,将该椭圆端面与已去除部分外包层的双包层光纤的内包层贴紧,再利用折射率匹配层将它们贴合。折射率匹配层的折射率和光纤的折射率很接近,并且对于抽运光是透明的,因而能够成为波导层将抽运光由抽运光纤从侧面耦合入双包层光纤的内包层。由于应用这种简单、高效的侧面耦合方式,使得高功率半导体激光器抽运源在多模状态下

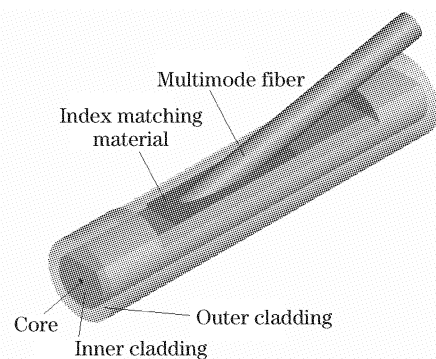


Fig. 1 Schematic for the side-coupling technology

产生的抽运光,可以很有效地耦合进入双包层光纤的内包层,通过纤芯的吸收转化为具有很好光束质量的高亮度激光。并且该抽运方式由于是从双包层光纤的侧面耦合,因此可以摆脱端面的限制多点注入抽运光。

## 2.2 侧面耦合实验

我们选择了国产中心波长为980 nm的1.5 W尾纤输出的半导体激光器作为抽运源,其输出尾纤为芯径200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径  $\text{NA}_m$  为0.11的多模光纤,实验采用的侧面耦合用多模光纤和半导体激光器尾纤相同。同时为了实验研究的方便,我们选择了具有较大内包层结构的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤,其内包层为350/400  $\mu\text{m}$ 的D形结构,数值孔径  $\text{NA}_d$  为0.37。首先将多模光纤的一端按照一定的角度进行磨抛形成一个椭圆斜面,该椭圆斜面的长轴方向和光纤的轴线方向的夹角为  $\gamma$ ,最后形成的侧面耦合器的夹角主要由  $\gamma$  决定。理论上如果选取的折射率匹配材料的折射率  $n_i$  和多模光纤纤芯的折射率  $n_m$  以及双包层光纤内包层折射率  $n_d$  都相等,均为熔融石英的折射率  $n_{\text{si}}$  即1.458,则只要保证

$$\gamma \approx \gamma_c = \arcsin(\text{NA}_d/n_d) - \arcsin(\text{NA}_m/n_m) = 10.4^\circ, \quad (1)$$

就能够将多模光纤中的抽运光有效地耦合入双包层光纤,其中  $\gamma_c$  为理论上的磨抛耦合主夹角。因此实验中采用的多模光纤的磨抛夹角  $\gamma$  约为  $10^\circ$ 。

在实际过程中,多模光纤纤芯的折射率  $n_m$  和双包层光纤内包层折射率  $n_d$  基本和熔融石英的折射率  $n_{\text{si}}$  相同,不同的折射率匹配材料与熔融石英之间的折射率差也只有  $10^{-2}$  量级甚至更小,但是在实验过程中我们发现即使如此细微的折射率差也会对侧面耦合效率产生较大的影响。实验中我们采用了四种折射率匹配材料,其基本参量如表1所示。

Table 1 The parameters of index-matching materials

Sample No.	Refractive index	Curable type	Hardness
I #	1.51	UV-curable	Very hard
II #	1.49	UV-curable	Hard
III #	1.47	Heated-curable	Hard
IV #	1.465	UV-curable	Soft

首先选用了一根长约15 cm的双包层光纤来对光纤磨抛侧面耦合进行研究。侧面耦合用的多模光纤先按照约  $10^\circ$  的  $\gamma$  角磨抛好,然后固定在特殊的夹具上,该夹具具有六个方向的自由度,能够精密调节,使多模光纤的角度磨抛好的斜面能够与双包层

光纤的内包层对准紧贴。为了便于观察,我们先将毫瓦级的 He-Ne 激光器发出的红光激光用透镜耦合入多模光纤,这时无论多模光纤的斜面与双包层光纤的内包层如何对准紧贴,双包层光纤的两个端口均只能观测到极其微弱的红光,用测量633 nm波长的功率计无法检测到两个端口有功率输出。接着,在多模光纤的斜面上均匀涂满少量折射率匹配材料,然后调节夹具再使其与双包层光纤内包层对准好并紧贴,即可观测到双包层光纤的两端均有红光输出,其中  $P_1$  输出强, $P_2$  输出较弱。侧面耦合效率定义为双包层光纤两端  $P_1$  和  $P_2$  的抽运光功率之和与多模光纤内抽运光功率  $P_{\text{in}}$  之比

$$\eta = \frac{P_1 + P_2}{P_{\text{in}}}. \quad (2)$$

用功率计检测到  $P_2$  功率仅为  $P_1$  功率的3%。然后用光纤连接器将多模光纤的另一端和1.5 W半导体激光器的输出尾纤对接,将980 nm的抽运光通过侧面耦合入双包层光纤,两多模光纤联接的耦合效率约为95%。在不同的折射率匹配材料下测量了侧面耦合双包层光纤两端功率之和随半导体激光器尾纤输出抽运功率的变化(见图2)。

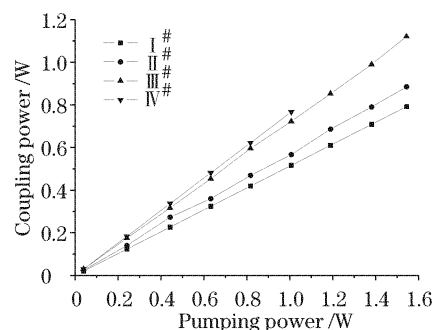


Fig. 2 Coupling power versus pumping power with four types of index-matching materials

图2所示的四种折射率匹配材料的侧面耦合功率与抽运功率关系曲线的斜率分别为52.9%、58.6%、72.5%和76.2%,考虑到多模光纤对接的耦合效率,因此侧面耦合效率分别为55.7%、61.7%、76.3%和80.2%。其中以折射率最为接近熔融石英的紫外固化胶IV#的耦合效率最高,但是由于其固化后的强度较低,因此在超过1 W的抽运功率注入下会分解挥发。热固化胶III#的耦合效率虽然只有76.3%,但是能够承受较高的功率密度,在最大注入抽运光功率为1.544 W下能够侧面耦合1.12 W抽运光入双包层光纤。紫外固化胶I#的折射率最大,因此其耦合效率也最低。图3为用CCD采集后

显示的侧面耦合微细结构,在抽运光注入下能够发现多模光纤的磨抛斜面的尖端处最亮,说明尖端处的功率密度最高。

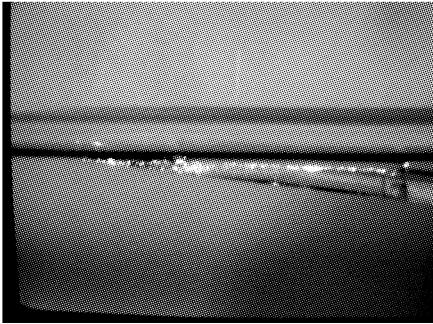


Fig. 3 Microscopic photograph of the side-coupling technology

### 3 侧面抽运光纤激光器

我们将光纤角度磨抛的侧面耦合技术用于掺 Yb 双包层光纤激光器,其实验原理如图 4 所示。实验中选取了 38 m 长的掺 Yb 双包层光纤,该双包层光纤已在先前的实验中使用,能够充分吸收注入的抽运光<sup>[15]</sup>。双包层光纤的一端紧贴双色镜  $M_1$  作为腔镜,其对抽运光高透而对光纤激光高反,距离该端面约 0.5 m 处采用光纤角度磨抛的侧面耦合技术注入半导体激光器抽运光,双组份的热固化胶Ⅲ# 因为既有较高的耦合效率又能承受高的抽运光功率密度而被采用于此;双包层光纤的另一端采用石英玻璃和空气的界面作为输出腔镜。实验中得到的侧面抽运光纤激光器的输出特性如图 5 所示。当中心波长 980 nm 的半导体激光器尾纤输出的抽运功率为 1.544 W 时,得到的最大输出功率为 282 mW,抽运的阈值为 1.04 W,激光输出的斜率效率为 55.5%。用与  $M_1$  参量相同的双色镜滤波,在激光输出端并没有发现残余的抽运光。考虑到多模光纤和半导体激光器输出尾纤存在着联接损耗,如果直接将半导体激光器的输出尾纤角度磨抛或者采用光纤熔焊技术减小联接损耗将能够进一步提高激光输出

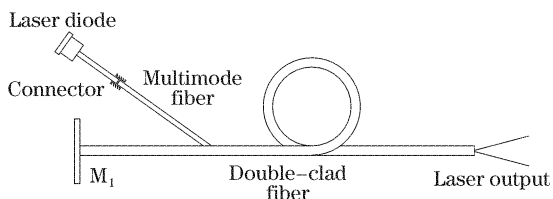


Fig. 4 Experimental setup of the side-pumping double-clad fiber laser

的斜率效率。由于半导体激光器尾纤输出的功率限制,尽管实验中仅获得了 282 mW 的输出功率,但是 55.5% 的斜率效率足以说明角度磨抛侧面耦合是掺 Yb 双包层光纤激光器的一种有效的侧面抽运方式。通过采用更大功率的尾纤输出半导体激光器注入将能够获得更高功率的光纤激光输出,但是必须考虑折射率匹配材料能够承受的功率密度。此外,还能够通过多个尾纤输出的半导体激光器同时侧面抽运来获得高功率的光纤激光输出,进一步的实验工作即将展开。

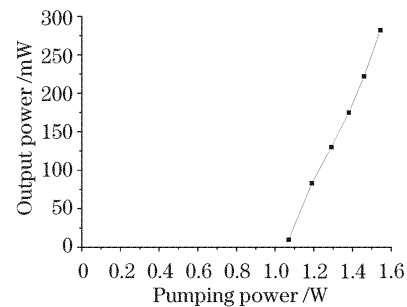


Fig. 5 Laser output power against laser diode pumping power

**结论** 一种耦合方式能否有效地用于双包层光纤激光器的抽运中主要取决于两点:耦合效率和注入功率。通过实验我们发现在光纤角度磨抛的侧面耦合中,折射率匹配材料对于耦合效率和注入功率都有很大影响。首先,要选择折射率尽量接近熔融石英的折射率匹配材料,以获得高的耦合效率;其次,要选择能够承受较高功率密度的折射率匹配材料来实现高的侧面耦合注入功率。实验中获得的 55.5% 的激光输出斜率效率说明光纤角度磨抛侧面耦合是双包层光纤激光器的一种有效的抽运方式。

### 参 考 文 献

- 1 Platonov N S, Gapontsev D V. 135 W CW fiber laser with perfect single mode output. *CLEO 2002*, Long Beach (May 19~24, 2002). CPDC3
- 2 Limpert J, Liem A, Hofer S *et al.*. 150 W Nd/Yb codoped fiber laser at 1.1  $\mu\text{m}$ . *CLEO 2002*, Long Beach (May 19~24, 2002). CThX1
- 3 Jeong Y, Sahu J K, Payne D N *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 470~471
- 4 Ning Ding, Huang Bangcai, Xiang Yang *et al.*. Effect of back-cavity mirror on Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(3): 313~316 (in Chinese)
- 5 Zhou Jun, Lou Qihong, Li Tiejun *et al.*. 4.9 W CW

- ytterbium-doped double-cladding fiber laser and its output characteristics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4): 476~479 (in Chinese)
- 6 Weber T, Luthy W, Weber H P *et al.*. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(1~2): 99~104
- 7 Goldberg L, Cole B, Snitzer E. V-groove side-pumped 1.5  $\mu\text{m}$  fibre amplifier. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25): 2127~2129
- 8 Valentin G P, Igor S. Coupling arrangement between a multi-mode light source and an optical fiber through an intermediate optical fiber length. *U. S. Patent*, 5999673. Dec. 7, 1999
- 9 Hakimi F, Hakimi H. A new side coupling method for double-clad fiber amplifier. *CLEO 2001*, Baltimore (May 6~8, 2001), CTUD2
- 10 Koplou J P, Moore S W, Kliner D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(4): 529~540
- 11 Herda R, Liem A, Schnabel B *et al.*. Efficient side-pumping of fiber lasers using binary gold diffraction gratings. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(3): 276~277
- 12 Wang Chang'an, Xiang Shiqing, Lu Yutian *et al.*. New side-pumped technology of coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10): 1259~1262 (in Chinese)
- 13 Zhang Chunwei, Xiang Shiqing, Wang Chang'an. Coupling efficiency analysis for the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(7): 597~600 (in Chinese)
- 14 Xu Jianqiu, Lu Junhua, Kumar G *et al.*. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4~6): 389~395
- 15 Yan Ping, Gong Mali, Ou Pan *et al.*. 10-W cladding-pumped fiber laser with single transverse mode output. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 332~333