

文章编号: 0253-2239(2003)03-0313-04

后腔镜对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器性能影响的研究*

宁 鼎^{1,2} 黄榜才¹ 项 阳¹ 许兆文¹ 吕可诚¹ 董孝义¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071
² 信息产业部电子第 46 研究所, 天津 300220)

摘要: 采用自行研制的内包层为矩形的掺 Yb^{3+} 双包层石英光纤, 以透射率不同的一组二向色镜为后腔镜构成了双包层光纤激光器。实验证明: 后腔镜具有较高透射率为佳; 后腔镜可以实现对激光波长的控制; 激光斜率效率与后腔镜透射率之间的关系符合指数变化规律, 在本实验的条件下, 斜率效率的最大值约 60%。

关键词: 导波光学; 矩形内包层光纤; 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器; 透射率; 斜率效率

中图分类号: TN248; TN25 文献标识码: A

1 引 言

20 世纪 80 年代后期, 随着双包层光纤的出现和包层抽运技术的应用, 两者完美的结合使得高功率光纤激光器得到了迅速的发展^[1]。掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器以能级结构简单、无激发态吸收以及发射光谱宽、便于调谐等优异特性, 成为高功率光纤激光器的研究热点^[2]。在以前的工作中, 多以一只前腔镜和光纤端面反射(反射率约 4%) 构成激光器的谐振腔^[3,4], 该结构通常也能获得较高的单端效率。但是, 这属于一种有缺陷的腔结构, 其动力学特性及稳定性都不好^[5]。此外, 由于受到增益光纤的

掺杂浓度、长度等因素的影响^[6], 产生激光的波长很难得到有效的控制。在某些对激光波长有明确要求的应用中, 该器件会受到限制。我们利用一组透射率不同的后腔镜构成了掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 研究了后腔镜对激光器性能影响的规律。实验证明, 后腔镜在激光波长下具有较高的透射率为佳; 采用后腔镜可以达到控制激光波长的目的。

2 实验装置

掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的实验装置见图 1。

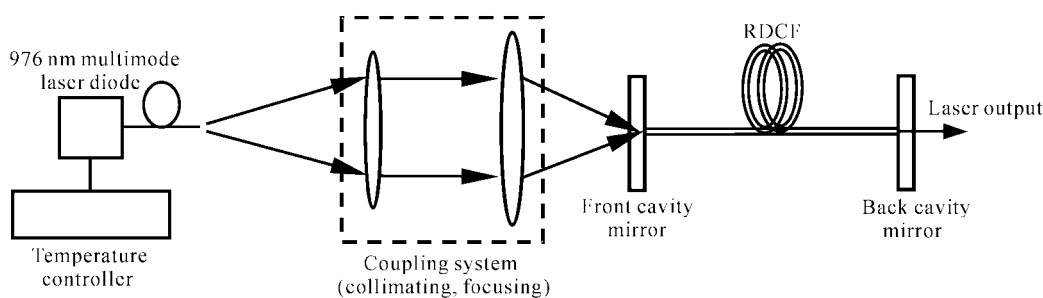


Fig. 1 Experimental setup

抽运光源是尾纤输出的、大功率半导体多模激光二极管, 输出光功率的中心波长为 976 nm, $\Delta\lambda = 4.3$ nm, 输出尾纤的纤芯直径约为 420 μm 。由两只透镜组成的透镜耦合系统, 将抽运光准直、聚焦并注

入到光纤的内包层中。掺 Yb^{3+} 矩形双包层光纤 (RDCF) 是自行设计制造的, 光纤的横截面形状见图 2, 光纤的纤芯、内包层、外包层和保护涂层的尺寸分别为: 4.6 μm 、96.6 $\mu\text{m} \times 68.4 \mu\text{m}$ 、173.6 μm 、238.6 μm , 长度为 30 m。矩形双包层光纤的有关参量如下: 纤芯的掺 Yb^{3+} 的质量浓度为 0.238%, 数值孔径为 0.190, 模场直径为 5.14 μm , 截止波长为 910 nm, 对抽运光 (976 nm) 的吸收系数为 12.8 dB/m, 对激光 (1060 nm) 的传输损耗为

* 国家自然科学基金 (698770061) 和天津市自然科学基金 (003600911) 资助项目。

E-mail: ningding@eyou.com

收稿日期: 2002-02-15; 收到修改稿日期: 2002-03-27

21 dB/km;矩形内包层的数值孔径为0.360/0.343,对976 nm的传输损耗为73 dB/km。前腔镜选用了一只二向色镜,在976 nm波长下的透射率约为85%,1020~1100 nm波段的反射率大于等于99.9%。后腔镜分别采用了五只二向色镜,在976 nm波长下的反射率 R_p 均大于96%,在1060 nm波长下的透射率 T_1 分别为19.6%、31.0%、64.0%、77.0%和90.2%。使用LP-3A量热型光功率计测量输出功率,最大量程2 W,光谱响应范围0.25~2.5 μm ,分辨率为1 μW 。使用MS9001B1型光谱分析仪测量输出光谱,波长范围为600~1750 nm,波长最小分辨率为0.1 nm。

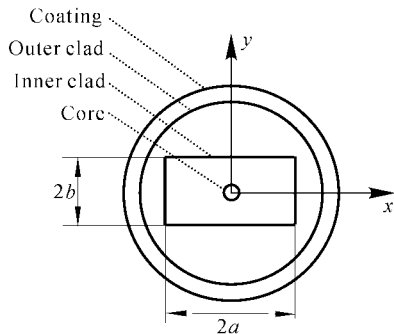


Fig. 2 Sketch map of rectangular inner cladding fiber

3 实验与结果

在调整光路的过程中,应注意使前、后腔镜的中心轴与光纤的中心轴平行,并使镜面与光纤端面贴紧,以空气间隙越小越好。然后,对腔镜的俯仰角度做轻微调整,当输出光功率达到最大时,可以认为光路已调整到最佳位置。

用光谱仪对激光输出光谱进行观测,以光功率计测量了输出功率与激光二极管工作电流之间的关系。按照后腔镜的 T_1 从低到高的顺序,依次更换二向色镜构成矩形双包层光纤激光器,重复进行上述观测。最后,保持矩形双包层光纤前端的注入状态不变,将其截短为长0.34 m的一段短光纤。重新制作端面,用光功率计测量了等效的入纤抽运功率与激光二极管工作电流的关系。图3给出了后腔镜 T_1 不同的五种矩形双包层光纤激光器的输出光谱。对应于 T_1 为19.6%、31.0%、64.0%、77.0%和90.2%的二向色镜,构成激光器的激光中心波长为1088.8 nm、1094.0 nm、1091.6 nm、1089.6 nm和1087.2 nm,半峰全宽值(FWHM)均小于等于2 nm。根据测量的激光输出功率和等效的入纤抽运功率,经计算可以得到以下数据:入纤抽运阈值功率

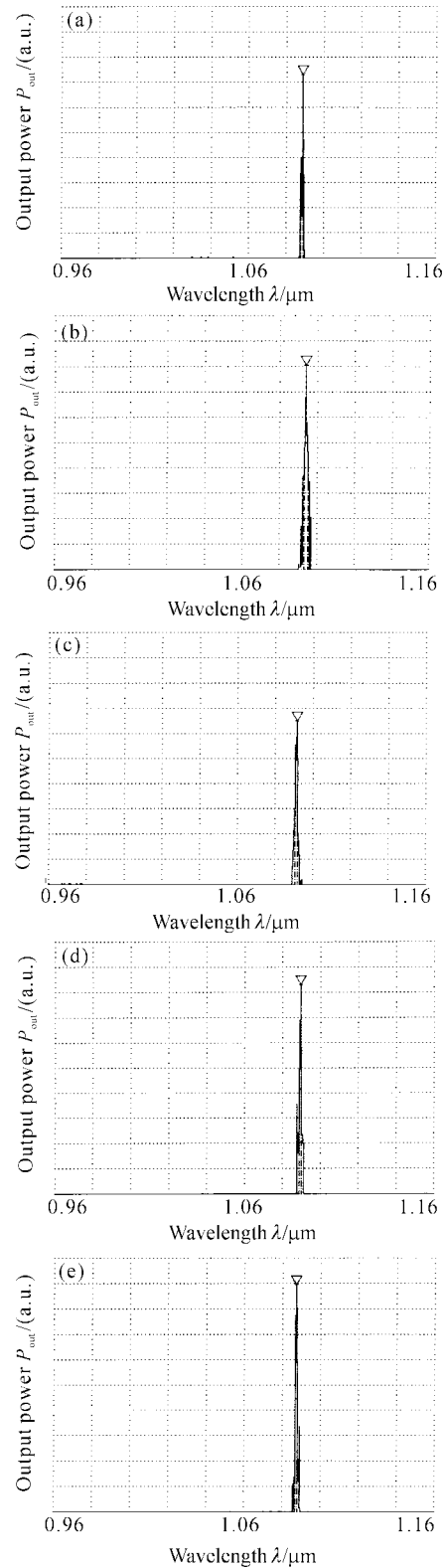


Fig. 3 Laser spectrums for different transmission ratio of back-cavity. (a) $T=19.6\%$; (b) $T=31.0\%$; (c) $T=64.0\%$; (d) $T=77.0\%$; (e) $T=90.2\%$ 分别为20.3 mW、39.8 mW、36.4 mW、39.4 mW和36.0 mW,与入纤抽运功率相关的斜率效率分别为

21.6%、41.8%、41.3%、59.4%和59.8%。最大激光功率分别为 62.2 mW、114.1 mW、127.1 mW、155.1 mW和161.1 mW。

4 分析与讨论

从图 3 来看, T_1 不同的矩形双包层光纤激光器输出中都没有剩余抽运光。这主要是因为: 在矩形双包层光纤中几乎不存在螺旋光而且该矩形双包层光纤的掺 Yb^{3+} 浓度较高, 长度为 30 m 时已经能够充分吸收入纤抽运功率。即使存在少量的剩余抽运光, 当其到达对抽运光具有高反射率($R_p \geq 96\%$)的后腔镜时, 会反射回矩形双包层光纤的内包层中, 由掺 Yb^{3+} 纤芯所吸收。

五种矩形双包层光纤激光器的激光中心波长, 最长为 1094.0 nm, 最短为 1087.2 nm, 变化范围很小而且没有规律, 平均值为 1090.24 nm。经分析, 我们认为, 引起激光中心波长变化的主要原因是: 五只二向色镜的透射率谱存在不一致性。在我们的实验中, 前腔镜对于 1020~1100 nm 范围的激光反射率大于等于 99.9%, 加入后腔镜以后, 产生激光的波长将由后腔镜反射率谱中最高点所决定。由于五只后腔镜该波长点的微小随机变化, 带来了激光中心波长的微小变化。

以最大激光输出功率和相对应的后腔镜反射率作图, 给出两者之间的关系曲线(见图 4)。后腔镜对激光的反射率 $R_1 = 1 - T_1$ 。从图中的变化趋势可知: 加入后腔镜所构成的矩形双包层光纤激光器, 其最大激光输出功率随后腔镜反射率的提高而减小, 即随着透射率的提高而提高。我们观察到的这个规律, 与 Kim 等^[7] 通过理论计算得到的变化趋势是一致的。对于高功率的双包层光纤激光器而言, 后腔镜的加入起到了选择激光波长和输出耦合器的作用。由实验可知: 后腔镜在激光波长下应具有较高的透射率。

通常, 人们以切割质量良好的光纤端面作为后腔镜, 利用约 4% 的端面反射(透射率约 96%) 形成开放腔, 也能够获得很高的激光输出, 但是难以得到需要的激光波长。加入后腔镜以后, 虽然腔镜材料的吸收会使激光功率有所降低, 但是如果能从镀膜工艺上精确控制二向色镜的最大反射波长, 就可以实现对矩形双包层光纤激光器的激光波长的精确控制。因此, 当激光功率降低 10%~20% 不影响其实际应用时, 最好采用较高透射率的后腔镜构成激光

器, 以较少的能量损失换取对激光波长的精确控制, 使得矩形双包层光纤激光器的综合指标最佳, 更具有实用性。

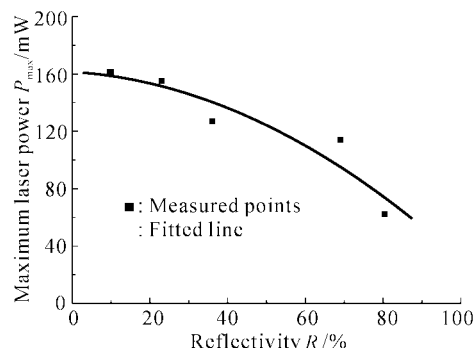


Fig. 4 Relationship between laser power and relectivity of back-cavity mirror

从实验数据还发现: 后腔镜的透射率越高, 矩形双包层光纤激光器的斜率效率越大, 从 $T_1 = 19.6\%$ 时的 21.6%, 增加到 $T_1 = 90.2\%$ 时的 59.8%。对数据进行拟合, 得到指数函数的关系式如下:

$$S = 58.8 - 114.5 \times \exp(-T_1/17.2), \quad (1)$$

其中 S 为斜率效率, T_1 为后腔镜的透射率。图 5 给出了斜率效率随后腔镜透射率的变化关系。考虑到每次更换后腔镜重新调整光路带来的误差, 拟合曲线与测量点之间的一致性还是比较好的。当 $T_1 \leq 50\%$ 时, 斜率效率随透射率的增加而迅速提高; 当 $T_1 \geq 60\%$ 以后, 斜率效率的增加变得缓慢并逐渐趋于一个固定值, 该数值大约为 60%。这与以前的矩形双包层光纤激光器的实验结果(77%) 相比要低一些^[8], 这是因为后腔镜的材料吸收增大了腔损耗而造成的。

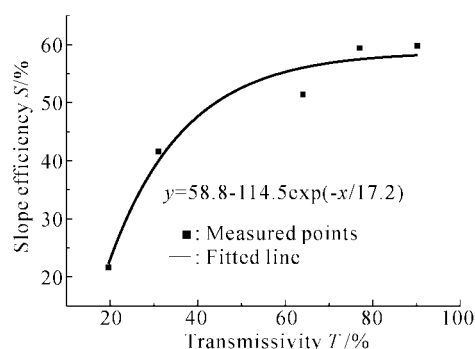


Fig. 5 Relationship between slope efficiency and transmission ratio of back-cavity mirror

结论 我们以透射率不同的二向色镜分别作为后腔镜, 构成矩形双包层光纤激光器。实验测量了它们的激光光谱和激光输出特性, 并研究了激光功率、斜

率效率等参量随透射率的变化规律。得到以下结论:后腔镜应具有较高的对激光波长的透射率;采用后腔镜以后,在一定波长范围内可以实现对激光波长的控制;激光斜率效率与后腔镜透射率之间的关系符合指数变化规律,在本文的实验条件下,斜率效率的最大值约为 60%。

参 考 文 献

- 1 Lü Kecheng, Liu Weiwei, Lü Fuyun *et al.*. Cladding pumping fiber laser. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China* (中国科学基金), 1999, **13**(5): 288~292 (in Chinese)
- 2 Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- 3 Pask H M, Archambault J L, Hanna D C *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fiber lasers in 1 μm region. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~865
- 4 Fu Chengpeng, Li Yigang, Liu Weiwei *et al.*. Research of double-clad fiber laser. *Chinese Science Abstracts* [中国学术期刊文摘(科技快报)], 2000, **6**(12): 1503~1504 (in Chinese)
- 5 Hideur A, Chartier T, Özkul C *et al.*. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser. *Opt. Commun.*, 2000, **186**(4~6): 311~317
- 6 Ning Ding, Fu Chengpeng, Ding Lei *et al.*. Experimental research of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(4): 442~445 (in Chinese)
- 7 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**(4~6): 329~337
- 8 Ning Ding, Li Yigang, Dong Xinyong *et al.*. Fabrication of Yb³⁺-doped silica fiber with rectangular inner cladding and its pumping performance. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(12): 1417~1420 (in Chinese)

Effect of Back-Cavity Mirror on Yb³⁺-Doped Double-Clad Fiber Laser

Ning Ding^{1,2} Huang Bangcai¹ Xiang Yang¹ Xu Zhaowen¹
Lü Kecheng¹ Dong Xiaoyi¹

(¹ Modern Optics Institute, Nankai University, Tianjin 300071
² Electronic 46th Institute, Ministry of Information Industry, Tianjin 300220)

(Received 15 February 2002; revised 27 March 2002)

Abstract: By using Yb³⁺-doped double-clad fiber with rectangular inner-cladding and a set of back-cavity mirrors with different transmission ratio, the double-clad fiber lasers are constructed. It is found that the back-cavity mirror with a higher transmission ratio is better, and the laser wavelength can be controlled by a back-cavity. The relationship between slope efficiency and transmission ratio is in accordance with exponential function and the maximum slope efficiency is about 60%.

Key words: guiding wave optics; rectangular inner cladding fiber; Yb³⁺-doped double-clad fiber laser; transmission ratio; slope efficiency