

文章编号 1004-924X(2006)02-0151-04

输出功率大于 10 W 的掺镱双包层微结构光纤激光器

李 燕,刘艳格,王 超,孙婷婷,王 志,刘建国,开桂云,袁树忠,董孝义
(南开大学 现代光学研究所,天津 300071)

摘要:采用 F-P 腔结构研究了包层泵浦掺 Yb^{3+} 微结构光纤激光器的输出特性。在以二向色镜作为腔镜的实验中,获得了斜率效率 57%,波长 1 074.5 nm,输出功率为 2.65 W 的稳定激光输出;在由二向色镜和光纤端面构成 F-P 腔的实验中,获得了斜率效率 87%,最大输出功率为 11.69 W 的激光输出。

关键词:微结构光纤;掺镱光纤;双包层光纤;光纤激光器

中图分类号: TN248.8 **文献标识码:** A

Yb^{3+} -doped double cladding microstructure fiber laser with output power exceeded 10 W

LI Yan, LIU Yan-ge, WANG Chao, SUN Ting-ting, WANG Zhi, LIU Jian-guo,
KAI Gui-yun, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: A high power air cladding pump microstructure fiber laser with output power exceeded 10 W was demonstrated using Fabry-Perot resonance cavity configuration. The output power and slope efficiency of the double-clad ytterbium-doped large mode-area microstructure fiber laser are 8.38 W and 87%, respectively, and the highest output power can achieve to 11.69 W.

Key words: microstructure fiber; Yb^{3+} -doped fiber; double cladding fiber; optical fiber laser

1 引 言

稀土掺杂光纤激光器由于具有高输出功率、高转化效率、优异的光束质量等特性而备受关注。特别是掺 Yb^{3+} 光纤激光器,由于其可直接采用 976 或 915 nm 的激光二极管作为泵源,又具有极高的量子效率,尤其适合发展为高功率的实用化器件,因此引起人们的极大兴趣。常规的双包层光纤激光器,采用大膜面积光纤以避免由于纤芯

中光强过大而造成的损伤,但为了保持单模需要增大纤芯尺寸的同时减小数值孔径,这样就使弯曲损耗增大。而且纤芯尺寸和数值孔径的极值受到折射率差的精确控制的限制,从而限制了常规双包光纤激光器的发展。微结构光纤则从另一途径解决了这一限制^[1-2]。

微结构光纤(microstructure fibers)又称为光子晶体光纤(photonic crystal fiber)、多孔光纤(holey fibers)。由于微结构光纤独特的结构和特性,从其一诞生就引起科学界的广泛重视。在光

收稿日期:2005-10-22;修订日期:2006-01-18.

基金项目:国家“973”计划项目(No. 2003CB314906),国家自然科学基金项目(No. 60407005)资助。

子晶体光纤的纤芯中掺入稀土元素,可以制成光纤激光器、放大器等有源器件。利用光子晶体光纤可以灵活设计模场特性,改变传导模式和有源介质之间的相互作用,可以制造适用于不同要求的激光器。特别是光子晶体光纤与包层泵浦技术结合,为高光束质量、高功率光纤激光器的进一步提高提供了条件^[3]。基于光子晶体光纤的双包层光纤可以具有更大的模场面积和更大的内包层数值孔径,从而避免由于高功率和放大自发辐射所产生的非线性效应和效率降低,并提高泵浦光的耦合效率。2003年, Crystal Fiber A/S 公司与 Jena Friedrich-Schiller-University 合作演示了输出功率为 80 W^[4] 和 260 W^[5] 的双包层光纤激光器,并且认为最高输出功率可以提高到 1.2 kW,这标志着微结构双包层光纤激光器已经达到并正在超越普通双包层光纤激光器的水平。

我们采用 F-P 腔结构进行了掺镱双包层微结构光纤激光器的实验研究。以 6 m 长的掺镱双包层微结构光纤为增益介质,分别以二向色镜和光纤端面作为输出腔镜,研究了激光器的输出特性。

2 实验装置

实验中所采用的光纤是由 Crystal Fiber A/S 公司生产的 DC-225-22-Yb 型掺镱双包层光子晶体光纤,其截面如图 1 所示,纤芯是通过缺失三个空气孔形成的三角形大模场面积结构,直径为 $22 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$,单模波长范围为 $1\ 020 \sim 1\ 150 \text{ nm}$,对 975 nm 泵光的吸收 $\sim 3.5 \text{ dB/m}$;内包层直径为 $225 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$,数值孔径 $\text{NA}(950 \text{ nm}) = 0.62$,外包层直径 $465 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$,涂覆层材料为 Acrylate,直径 $550 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$ 。

实验中所采用的泵浦源是德国 Limo 公司生产的高功率半导体激光器,最大输出功率为 90 W,输出尾纤尺寸为 $400 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22,激光器的工作波长在 $971 \sim 976 \text{ nm}$,随泵浦电流和温度的增加向长波方向漂移,通过温控装置可将激光中心波长稳定在 976 nm。

图 2 是采用端泵结构的包层泵浦掺镱光子晶体光纤激光器实验装置示意图,其中图 2(a)是由二向色镜和对泵光高反射对信号光高透射的二向色镜构成 F-P 谐振腔,而图 2(b)是直接利用光纤

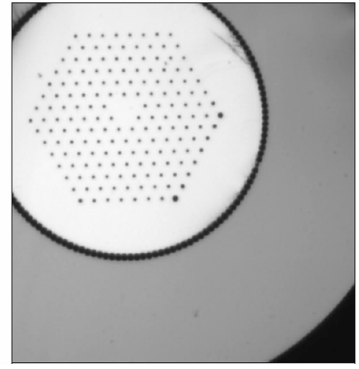


图 1 DC-225-22-Yb 型掺镱双包层光子晶体光纤截面图
Fig. 1 Photograph of the microstructure ytterbium doped fiber used in experiment

后端面的 4% 菲涅耳反射作为后腔镜。泵光由半导体激光器尾纤输出的光经透镜耦合系统准直聚焦后,通过二向色镜(对 976 nm 激光高透射、对 $1\ 020 \sim 1\ 100 \text{ nm}$ 波段的激光高反射)进入双包层光子晶体光纤的内包层中,在光纤的后端面,分别利用二向色镜和光纤端面的菲涅耳反射(4% 反射率)作为后腔镜形成激光反馈,并在输出端利用光谱仪和功率计观测激光光谱和激光输出功率。

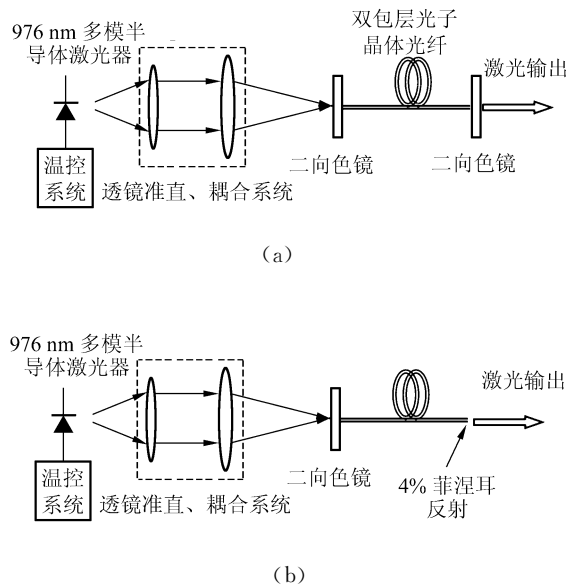


图 2 激光器结构示意图

Fig. 2 Sketch of laser configuration

3 实验结果与讨论

3.1 以二向色镜作为后腔镜的实验研究

光纤前腔镜对 976 nm 的光约 100% 透射,对

1 060 nm 附近光的反射率约为 98%, 后腔镜对 1 060 nm 附近的光约 89.9% 透射, 对 976 nm 泵光反射率约为 95.4%。

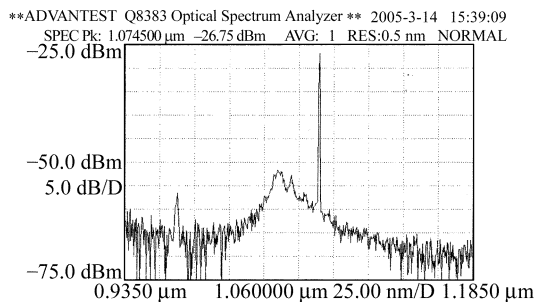


图3 激光器输出激光光谱图

Fig. 3 Laser spectrum

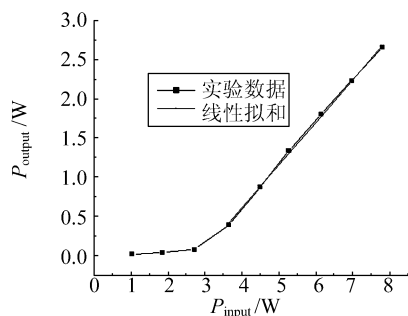


图4 激光器输出特性曲线

Fig. 4 Output character curve I of laser

用光谱仪测得输出激光光谱如图3所示, 激光波长为 1 074.5 nm, 线宽约为 2 nm。由光谱图可以看出, 虽然在短波方向还有泵光的微弱激光峰出现, 但其相对于输出激光的差值大于 30 dB, 即非常微弱, 故可以认为泵光完全被吸收。实验测得泵光的入纤效率约为 27% (截取一小段与实验中所采用的光纤相同的微结构光纤, 光纤端面处理后, 一端直接由耦合系统经二向色镜进行激光耦合, 在另一端的输出直接用功率计测量输出功率。由于光纤的长度很小, 可以忽略光纤对泵浦光的吸收和损耗, 因此可以认为测得的功率即是入纤功率, 测得入纤功率与泵浦光功率的关系曲线可得耦合效率), 在此基础上测得激光器的输出特性曲线如图4所示。激光器斜率效率为 54.4%, 阈值功率为 2.88 W, 当入纤功率为 7.8 W 时, 输出激光功率为 2.65 W。

3.2 直接以光纤端面为后腔镜的实验研究

光纤前腔镜对 976 nm 的光约 100% 透射, 对

1 060 nm 附近的激光反射率约为 98%, 后端面对激光和泵浦光的反射为 4%, 实验测得激光器的输出特性曲线如图5所示。当入纤功率为 12.1 W 时, 激光的最大输出功率为 8.38 W。由曲线可得斜率效率为 87%。虽然功率没有达到已有报道的常规双包层光纤激光器的最高功率水平, 但是斜率效率较高, 如增加泵光, 可得到更高的功率输出。

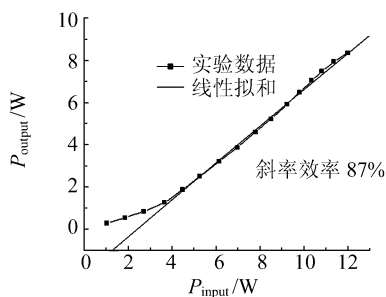


图5 激光器输出特性曲线 II

Fig. 5 Output character curve II of laser

在此基础上, 应用该结构进行了 10 W 以上激光器的实验研究, 获得了 11.69 W 的输出功率, 继续增加泵光功率, 输出功率相应增加, 但是不能稳定, 而且光纤发热, 用显微镜观察光纤端面, 发现不规则白色裂纹出现。经分析出现该现象的原因主要有以下两种: 一是耦合系统不匹配, 经耦合系统出射光光斑尺寸的理论值为 281.3 μm , 略大于光纤内包层直径 225 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$, 这样部分泵光泄露到外包层中, 当泵光功率较高时, 热量过大光纤端面被损坏; 另一原因主要与二向色镜有关, 二向色镜在高能量激光密度辐照条件下发生损伤从而影响整个激光腔的性质。这些问题如能得到有效改善, 有望得到更高功率的输出。

4 结论

采用 F-P 腔结构研究了包层泵浦掺 Yb^{3+} 微结构光纤激光器的输出特性。在以二向色镜作为腔镜的实验中, 获得了斜率效率 57%, 波长 1 074.5 nm, 输出功率为 2.65 W 的稳定激光输出; 而以二向色镜和光纤端面构成 F-P 腔的实验中, 获得了最高输出功率为 11.69 W 的激光输出。由于耦合系统不匹配, 在一定程度上影响了激光的输出功率, 如能设计更佳的耦合系统, 采用

最优化激光器结构,微结构光纤激光器的输出性能定会进一步提高,这正是我们的下一步工作。

参考文献:

- [1] WADSWORTH W J, KNIGHT J C, REEVES W H, *et al.* Yb³⁺-doped photonic crystal fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(17):1452-1453.
- [2] FURUSAWA K, MALINOWSKI A, PRICE J H W, *et al.* Cladding pumped Ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding[J]. *Optics Express*, 2001, 13(9): 714-720.
- [3] 刘艳格,王志,刘剑飞,等.微结构光纤激光器件[J].量子电子学报,2005,22(3):305-314.
LIU Y G, WANG Z, LIU J F, *et al.* Microstructure fiber based devices[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(3):305-314. (in Chinese)
- [4] LIMPERT J, SCHREIBER T. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2003, 11(7):818-823.
- [5] LIMPERT J, SCHREIBER T. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. *Optics Express*, 2003, 11(22):2982-2990.

作者简介:李 燕(1975—),山东莘县人,邯郸学院讲师,南开大学现代光学所博士研究生,主要研究方向为光纤激光器、放大器等。