

# 掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器实验研究\*

方刚<sup>12</sup>, 徐向涛<sup>12</sup>, 全恩臣<sup>12</sup>, 戴特力<sup>12</sup>, 张鹏<sup>12</sup>

(1. 重庆师范大学 物理与电子工程学院; 2. 重庆市高校光学工程重点实验室, 重庆 400047)

**摘要:** 光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、散热方便、结构紧凑等优点,是高功率激光器领域的研究热点。本文设计了温控、水冷系统使半导体激光二极管泵浦源稳定在工作波长。通过设计的包层泵浦功率剥除器,有效地剥离了未被掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤吸收的泵浦光。采用 20 W 的半导体二极管激光器作为泵浦源,5 m 长掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤作为增益介质,光纤光栅作为腔镜,在泵浦功率为 19 W 时,获得 10.42 W 的激光输出,激光波长 1 062 nm,光-光转换效率约 54.8%。

**关键词:** 光纤激光器; 双包层光纤; 掺镱(Yb<sup>3+</sup>)

**中图分类号:** TN248.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2014)02-0080-04

稀土离子掺杂的光纤激光器可广泛应用于通信、工业加工、医疗等方面。包层泵浦技术在光纤激光器中的应用使泵浦效率和输出功率都得到了很大提高<sup>[1-3]</sup>,光纤激光器以掺稀土元素(钬、镱、铥等)光纤作为增益介质,镱离子(Yb<sup>3+</sup>)具有很高的吸收截面、较宽的吸收光谱(典型值 910~980 nm)以及较宽的发射光谱(典型值 1 040~1 100 nm),具有 90%以上的量子效率,并且可以高浓度掺杂<sup>[4]</sup>。双包层光纤的出现使得泵浦光的耦合效率相当高,因此掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器的综合电-光效率高达 30%以上,光-光转换效率超过 80%。双包层光纤具有大的表面积/体积比,百瓦级的光纤激光器只需风冷进行散热,对于千瓦级的也只需要水冷<sup>[5]</sup>。能够承受高功率、低损耗的光纤合束器及光纤光栅的出现,使光纤激光器全光纤化,结构更加简单紧凑<sup>[6]</sup>。国内 2011 年,国防科学技术大学的马阎星等人报道了一台全光纤结构的光纤激光器,采用双端抽运结构,获得了 1 008 W 的高功率输出,输出激光的中心波长为 1 082 nm,光转换效率为 68%<sup>[2]</sup>。武汉锐科公司目前已经实现了 4 000 W 以内连续和 100 W 以内脉冲光纤激光器产品。所以作者对掺(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器进行了实验研究。

## 1 原理

石英光纤中镱(Yb<sup>3+</sup>)离子的吸收截面和发射截面如图 1 所示<sup>[7]</sup>,镱(Yb<sup>3+</sup>)离子有两个吸收峰,波长分别为 915 nm 和 975 nm。在 915 nm 处有较宽的吸收光谱(约 50 nm),但吸收截面相对较小;在 975 nm 处有较高的吸收截面,约为 915 nm 吸收截面的 4 倍,但吸收光谱较窄(约 5 nm)。镱(Yb<sup>3+</sup>)离子有 2 个发射峰,波长分别为 975 nm 和 1 030 nm。其中 975 nm 跃迁对应于三能级系统,1 030 nm 跃迁对应于准四能级系统,由于镱(Yb<sup>3+</sup>)离子具有很高的吸收截面、较宽的吸收光谱(800~1 100 nm)以及较宽的发射光谱(975~1 200 nm),吸收波长和发射波长很接近,因此其量子效率能达到 90%以上。由图 1 可以看出镱(Yb<sup>3+</sup>)量子转换效率高、具有很高的吸收截面、较宽的吸收光谱(800~1 100 nm)以及较宽的发射光谱(975~1 200 nm),可实现高功率输出。研究表明<sup>[8]</sup>,基质材料的组分对镱(Yb<sup>3+</sup>)离子的吸收截面和发射截面也存在影响,当改变光

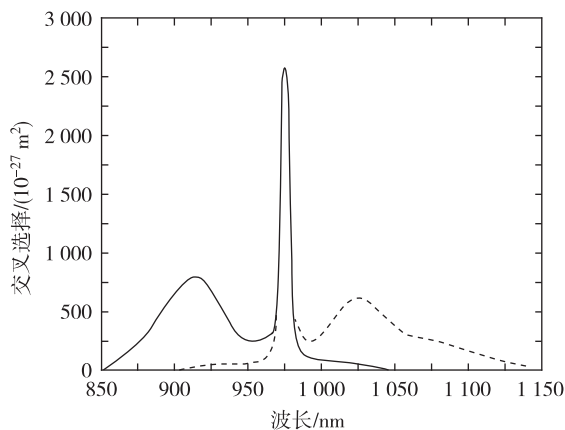


图 1 石英光纤中镱(Yb<sup>3+</sup>)离子的吸收(实线)和发射(虚线)截面示意图

\* 收稿日期:2013-04-23 修回日期:2013-09-04 网络出版时间:2014-03-10 19:23

资助项目:重庆市自然科学基金(No. cstcjj40029);重庆师范大学博士启动基金(No. 11XLB014)

作者简介:方刚,男,研究方向为微纳光子器件及高功率光纤激光器,E-mail: fanggang89@163.com;通讯作者:张鹏,E-mail: zhang-peng2010@cqu.edu.cn

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140310.1923.018.html

纤中硅和锗的含量时,发射谱及荧光寿命都有明显的改变。

双包层光纤的结构如图 2 所示<sup>[9]</sup>,纤芯是由掺杂稀土离子的 SiO<sub>2</sub> 构成,直径 10~30 μm 甚至更大,数值孔径典型值 0.06。通常设计为单模,用于放大并传输信号光。内包层是由折射率比纤芯小的纯 SiO<sub>2</sub> 构成,直径 125~400 μm 甚至更大,数值孔径典型值 0.46。用于传输多模泵浦光,提高了泵浦光的入纤功率和耦合效率。不同形状的内包层(圆形、矩形、D 型、八角形等)对泵浦光的吸收影响很大<sup>[10]</sup>。外包层是由折射率比内包层小的聚酯材料构成。要求具有高的耐温度和抗弯曲特性。保护层是一般选用折射率高于外包层的聚酯材料构成。将泄漏到外包层的光尽快导出,以免对光纤造成热损耗,同时起到机械保护作用。泵浦光在双包层光纤中传播如图 3 所示,泵浦光以一定的角度注入到光纤的内包层,在内包层中进行全反射并反复穿越纤芯,从而导致泵浦光被纤芯中的镱(Yb<sup>3+</sup>)离子吸收,而产生的激光则沿单模纤芯传播,因此,较小的纤芯直径就可保证较高质量的基横模激光输出。

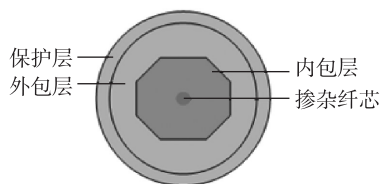


图 2 双包层光纤的横截面结构示意图

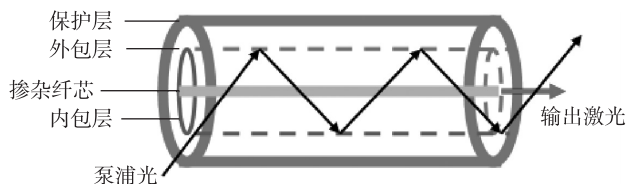


图 3 包层泵浦技术原理示意图

## 2 实验

掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器的结构如图 4 所示<sup>[11]</sup>,泵浦源是 LD(Laser diode),增益介质是掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤,腔镜由一对光纤光栅组成。激光二极管的散热系统为自行设计的温度控制装置,保护器是为了防止信号激光后向反射损坏激光二极管,合束器采用(1+1)×1 型,三段尾纤分别和泵浦源输出的尾纤,光纤光栅的尾纤,掺镱双包层光纤熔接,每个器件通过光纤熔接机熔接在一起,熔接后封装在自行设计的铜 V 型槽内,利用铜 V 型槽可以有效地散热并保护熔接点,用涂覆胶进行涂覆,涂覆后用强紫外光灯照射固化。包层泵浦功率剥除器用来剥除未被吸收的泵浦光,先将一段双包层光纤的外包层剥除,然后将它封装在铜 V 型槽,最后利用一种高于内包层折射率的涂覆胶进行涂覆并加热固化。

二极管激光器作为光纤激光器的泵浦源,它的性能直接影响到光纤激光器的性能<sup>[12]</sup>。实验中使用美国 Oclaro 公司的 BMU25-975-01-R 型泵浦源,如图 5 所示。25℃ 时二极管激光器的 P-I 特性曲线见图 6,二极管激光器的输出光谱如图 7 所示,所以,在工作环境温度 25℃、输入电流 11.3 A 时,输出功率为 25 W,发射波长为

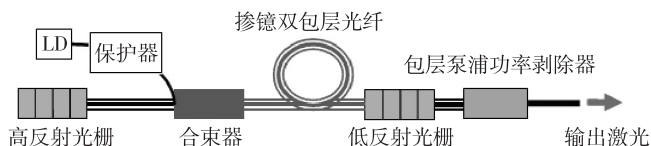


图 4 掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器结构图



图 5 激光二极管 LD

972.72 nm。在搭建双包层光纤激光器实验系统之前,先对二极管激光器的性能进行测量,由于二极管激光器在高功率运行时会产生大量的热,如果不及时散热,会导致二极管激光器熄灭,严重时损坏。为了使其在 25℃ 稳定工作,设计了温控水冷系统,用两个半导体制冷片 TEC(Thermoelectric cooler)对铝水箱进行制冷,通过微型水泵将铝水箱中的冷却水抽运到水冷排中,水冷排中的水又回到铝水箱中构成一个水循环系统,二极管激光器和水冷排之间涂有导热硅脂,使两者之间充分接触,水冷排上装有温度传感器,探头探测到的温度反馈给温度控制电路,然后通过电源控制 TEC 制冷器制冷,温度控制电路可设定温度,确保水冷排上的温度为激光二极管的稳定工作的温度。

加拿大 Coractive 公司的 DCF-Yb-10/128P 型双包层掺镱光纤,纤芯直径 9.3 μm,数值孔径 0.08,内包层为八角形,直径为 128 μm,数值孔径 0.46,双包层光纤直径 255 μm。该光纤在 915 nm 的吸收系数为 1.7 dB/m,在 974 nm 处的吸收系数为 7 dB/m。合束器采用(1+1)×1 型,它的三段尾纤分别为一个泵浦端和 2 个信号激光端,泵浦端光纤纤芯为 105 μm,包层直径 125 μm,数值孔径 0.22;2 个信号激光端光纤为加拿大 Coractive 公

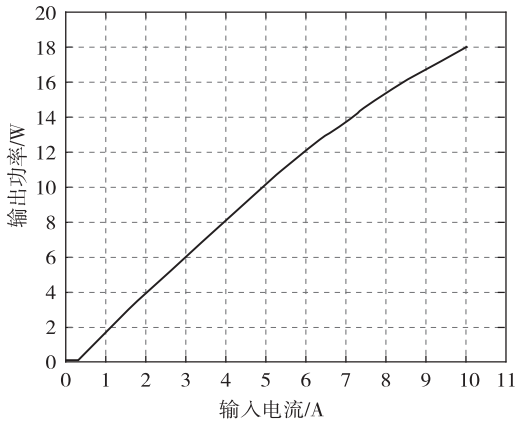


图 6 25 °C 时二极管激光器的 P-I 特性曲线

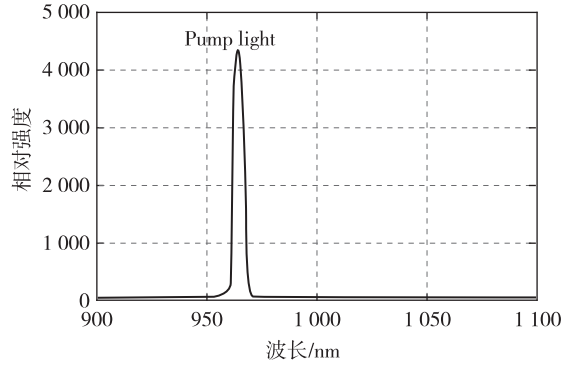


图 7 25 °C 二极管激光器的输出光谱

司生产,纤芯直径 10  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.08,内包层直径 125  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.46。这样可以和泵浦源输出尾纤、有源光纤相匹配。

输出激光的功率与输入电流的关系可以从图 8 中看出<sup>[13]</sup>,当输入电流到 1.0 A,开始有激光输出。此后,输出光的功率随输入电流的增大而增大,基本上呈线性关系。又由于随着电流的增大,泵浦光的功率在增大,输出光的功率也在增大,所以也可以从图 9 中看出当泵浦功率在 0.4 W 时,开始产生激光,此后输出光的功率随泵浦

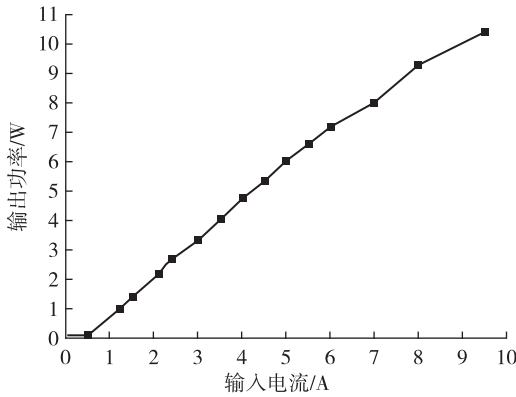


图 8 输出光功率随着输入电流的增大的变化关系

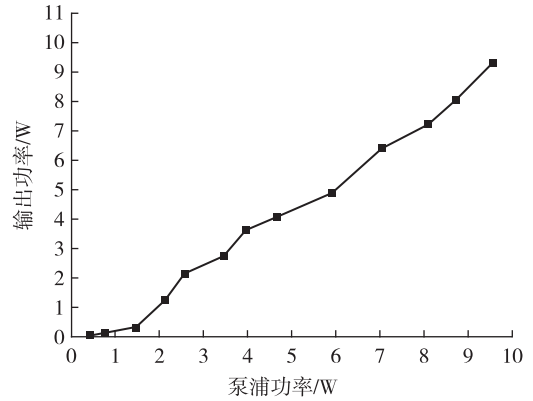


图 9 输出激光功率随泵浦功率的变化关系

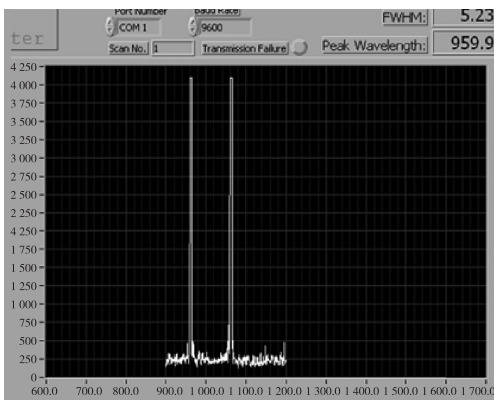


图 10 直接输出光谱

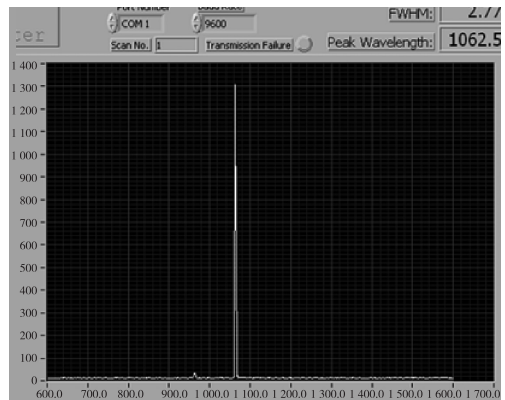


图 11 加了泵浦功率剥除器后的输出光谱

功率的增加而增加。当激光输出稳定在 10.42 W 左右时,用光谱仪测输出光的光谱,10%的光纤光栅作为输出腔镜时,当没有加泵浦光功率剥除器时光纤激光的输出光谱如图 10 所示。从中可以看出,输出光中还有半波全宽在 5.23 nm 左右,中心波长为 960 nm 的泵浦光,而当加了泵浦光功率剥除器后,输出光的光谱如图 11 所示,只有 1 062 nm 的输出激光,泵浦光已经被剥除了。

### 3 结论

设计制作并实验研究了掺(Yb<sup>3+</sup>)的双包层光纤激光器,在波长为 975 nm 的 LD 泵浦下,采用一对光纤光栅

作为激光器的端镜,泵浦功率 19 W 时,获得了波长 1 062 nm,功率 10.42 W 的激光输出。光-光转换效率 54.8%。激光器的输出功率稳定,没有出现输出功率饱和现象。由于目前使用的掺镱双包层光纤长度只有 5 m 左右,导致泵浦光没有被完全吸收,因而激光器的光-光转换效率尚未得到优化,这一点将在下一步工作中进行改善提升。

### 参考文献:

- [1] 楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2010.  
Lou Q H. High-power Fiber lasers and their application [M]. Beijing: Press of University of Science and Technology of China, 2010.
- [2] 马阎星, 肖虎, 周朴, 等. 全光纤激光器实现 kW 级功率输出[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1137-1138.  
Ma Y X, Xiao H, Zhou P, et al. kW level fiber laser in all fiber format [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1137-1138.
- [3] Nilsson J, Payne D N. High-power Fiber lasers[J]. Science, 2011, 332: 921-922.
- [4] Jeong Y, Boyland A J, Sahu J K, et al. Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core Fiber laser[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2009, 13(4): 416-422.
- [5] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. New Orleans: Optical Fiber Sensors, 1988.
- [6] 杜亮, 戴特力, 梁一平, 等. 全光纤激光器中光栅作为腔镜的特点研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2011, 28(4): 49-52.
- [7] Pask H M, Carman R J, Hanna D C. Ytterbium-doped silica Fiber lasers: versatile sources for the 1-1.2  $\mu\text{m}$  region[J]. IEEE Selected Topics in Quantum Electron, 1995, 1(1): 2-13.
- [8] 陈柏, 林尊琪. 掺 Yb 光纤激光器激射波长与阈值关系的研究[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 750-754.  
Chen B, Lin Z Q. Research of the relationship of the lasing wavelength and the threshold of Yb-doped Fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 750-754.
- [9] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core Fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [10] Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers[J]. Optics Communications, 1996, 132: 511-518.
- [11] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. Opt Express, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [12] 徐向涛, 戴特力, 梁一平, 等. 掺镱(Yb<sup>3+</sup>)双包层光纤激光器的数值分析[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2013, 1(30): 91-94.  
Xu X T, Dai T L, Liang Y P, et al. Numerical analysis of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad Fiber laser[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition, 2013, 1(30): 91-94.
- [13] Kelson I, Hardy A A. Optimization of strongly pumped Fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 891-897.

## Experimental Study of Yb-doped Double-clad Fiber Laser

FANG Gang<sup>12</sup>, XU Xiang-tao<sup>12</sup>, QUAN En-chen<sup>12</sup>, DAI Te-li<sup>12</sup>, FAN Si-qiang<sup>12</sup>, ZHANG Peng<sup>12</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University;

2. Chongqing High Education Key Laboratory of Optical Engineering, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Fiber lasers combines advantages of high conversion efficiency, good beam quality, convenient cooling and compact configuration, and has been studied extensively. A temperature-controlled cooler is designed to make the pumping source stable at working wavelength, and a power-stripper is used to strip the unabsorbed pumping from the ytterbium-doped double-clad fiber. 10.42 W output power is obtained with 19 W pumping, 5 m ytterbium-doped double-clad fiber gain medium and a fiber grating as the end mirror. The laser wavelength is 1 062 nm, and the optical-to-optical conversion efficiency is about 54.8%.

**Key words:** Fiber laser; double-clad fiber; Yb<sup>3+</sup>-doped

(责任编辑 游中胜)