

文章编号: 0253-2239(2003)04-0476-04

4.9 W 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器及其 输出特性研究*

周 军^{1,2,3} 楼祺洪¹ 李铁军¹ 董景星¹ 魏运荣¹ 王之江¹

1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
2 常熟高等专科学校物理系, 常熟 215500
3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 报道了输出波长为 1110 nm、最大输出功率 4.9 W、光束质量接近衍射极限的连续波掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器。实验采用矩形内包层的石英掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 抽运源为中心波长在 910 nm 附近的半导体激光器, 当抽运光功率为 12 W 时, 获得了 4.9 W 的激光输出, 斜率效率为 43.6%。

关键词: 光纤激光器; 双包层光纤; Yb^{3+} 掺杂; 矩形内包层

中图分类号: TN248 文献标识码: A

1 引 言

光纤激光器同半导体激光器和大型激光器相比, 因其具有结构简单、散热效果好、转换效率高、阈值低等优点而倍受青睐。但对于 1 μm 左右的波长而言, 典型的单模光纤的纤芯直径为 4 μm , 这一芯径远小于透镜聚焦后高斯光束的光斑直径, 由于抽运光是直接耦合进直径低于 10 μm 的纤芯, 限制了抽运光的入纤效率, 这导致光纤激光器的输出功率较低, 限制了其应用范围。

近年来, 国际上发展的以双包层光纤为基础的包层抽运技术为提高光纤激光器的输出功率提供了解决途径, 改变了光纤激光器只是一种小功率光子器件的历史。利用这种包层抽运技术, 光纤激光器的转换效率可达 50% 以上, 输出功率可达百瓦级, 并且有着接近衍射极限的光束质量和小巧、全固化、低阈值等显著优点^[1]。因而, 双包层掺 Yb^{3+} 光纤激光器成为近几年人们研究的热点, 引起广泛的关注, 并已经在光通信、材料加工与处理、医学、印刷等领域展现出诱人的应用前景, 呈现出逐步替代现有传统高功率激光器的趋势^[2,3]。最近国内也有单位开始了这一领域的研究工作^[4,5], 但输出功率都在瓦

级以下。

双包层光纤最早是由 Snitzer 等人^[6]提出的, 由于它比常规光纤增加了一个内包层, 从而突破常规光纤激光器的对转化效率和输出功率的限制。双包层光纤内包层的横向尺寸和数值孔径均远大于纤芯, 纤芯中掺杂了稀土元素 (Yb^{3+} , Nd^{3+} , Er^{3+} 等); 由于内包层包绕在单模纤芯的外围, 通过光纤结构设计和选择合适的材料, 就可以将抽运光有效地耦合进内包层中, 抽运光多次穿越纤芯被掺杂离子所吸收, 从而将抽运光高效地转换为单模激光。采用这种结构一方面保持了常规光纤激光器的结构简单、散热效果好、光束质量高等优点, 另一方面使得注入的抽运功率和转换效率大大提高。

2 实验装置

双包层光纤是高功率光纤激光器的核心, 内包层的横截面积、形状和数值孔径是限制吸收抽运光功率的主要因素, 为了获得高功率运转, 内包层的数值孔径应足够高, 横截面积和纤芯的比应足够大。最早提出和实现的是圆形的内包层形状, 由于其完美的对称性, 存在大量的螺旋光, 从而不可能有高的效率。为了提高对抽运光的吸收效率, 人们一直在努力优化内包层的边界条件, 并做了大量的工作, 提出了偏心、D 形、长方形、梅花瓣形等的内包层形状, 并拉制出这些内包层形状的双包层光纤^[2,7,8], 理论计算表明矩形内包层形状可以达到较高的抽运光吸收效率^[7]。

* 国家自然科学基金 (60244005) 和上海市科委光科技专项 (012261002) 资助课题。

E-mail: junzhou@d@yahoo.com

收稿日期: 2002-05-17; 收到修改稿日期: 2002-06-18

掺 Yb³⁺ 光纤的吸收和发射谱带很宽,具有潜在的从 975~1200 nm 的发射谱段,特别是它的宽带增益弥补了其它激光光源 1.1~1.2 μm 处的空白^[9],故而在选择抽运光源时有更大的灵活性,同时激光输出波长的可调谐范围更宽。我们选择内包层为矩形的掺 Yb³⁺ 双包层石英光纤作为激光介质。所用双包层石英光纤的内包层为矩形 170×330 μm,数值孔径 0.47(在 915 nm),掺 Yb³⁺ 纤芯直径约 9 μm,掺 Yb³⁺ 的质量分数为 0.015。考虑到掺杂浓度、光纤对 915 nm 的吸收系数等问题,双包层光纤的长

度取 50 m。光纤激光器实验上采用基本的法布里-珀罗腔型(图 1),采用半导体激光器进行端面抽运。为了形成谐振腔和实现抽运光高效注入,在光纤的抽运端面粘一双色片(对 915 nm 高透, $T > 90\%$; 对 1080nm 附近高反, $R > 99\%$)作为前腔镜,光纤尾端未加特殊处理,直接利用端面的菲涅耳反射 ($R = 4\%$)做输出镜。抽运源采用中心波长约为 910 nm,输出功率可达 15 W 的半导体激光器,多模抽运光束经整形后由光纤耦合输出(纤芯直径为 200 μm,数值孔径为 0.22)。

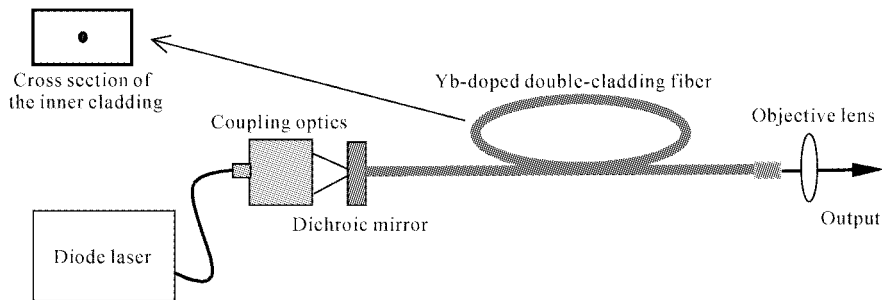


Fig. 1 Setup of high-power double-cladding fiber laser

为了使整个系统结构小巧,便于模块化,实验中我们用半导体制冷器对半导体激光器进行温度控制,使其能高效工作,并可以调节中心波长靠近掺 Yb³⁺ 石英光纤 915 nm 的吸收峰。从半导体激光器输出的激光经整形后耦合进芯径为 200 μm 的传输光纤。由于该传输光纤和我们双包层光纤内包层的参数不匹配,为将抽运光高效地耦合进双包层光纤的内包层,必需采用设计合适的光学耦合系统,实验表明耦合系统的选择对于双包层光纤激光器的转换效率至关重要^[10]。我们采用约 2:1 的光学耦合系统,将光纤输出的抽运光聚焦在双包层光纤的内包层,焦斑直径为 120 μm,光学耦合系统的数值孔径为 0.41,非常接近并小于内包层的数值孔径 ($NA = 0.47$),从而保证了半导体激光器出射的多模激光可以高效地耦合进内包层。纤芯中的振荡激光从端面出射并以纤芯的数值孔径发散,我们采用一显微镜物镜对其进行准直或聚焦。

3 输出特性

3.1 测量结果

保持半导体制冷器显示的温度为 10°时,半导体激光器的阈值电流约为 9.0 A。当工作电流增大到 11.0 A 时,开始观察到有激光输出,阈值抽运功率为 0.6 W。当电流为 15 A 时,激光输出为 0.9 W,提高抽

运半导体激光器的工作电流,光纤激光器的输出功率随之提高,当半导体激光器的工作电流为 40 A 时,激光输出已达 4.9 W,图 2 所示为光纤激光器的输出功率和抽运功率的关系曲线,斜率效率为 43.6%。

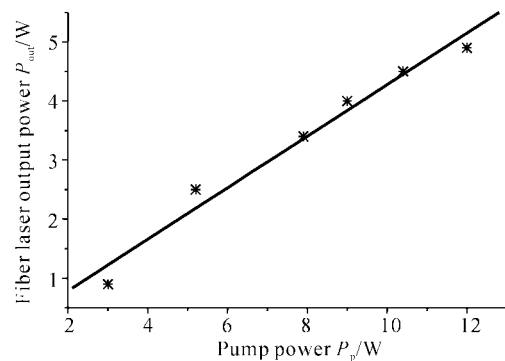


Fig. 2 Laser output vs pump power. * : exp; — : linear fit

用光谱分析仪对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的输出光谱特性进行了测量。图 3 所示为激光输出的光谱曲线,可见中心波长为 1110 nm,谱线宽度为 2.6 nm。虽然理论计算矩形内包层的双包层光纤具有较高的抽运光吸收效率,但在矩形内包层中依然存在少量的局域稳定模式,这将会导致漏光的存在。通过光谱分析仪对输出光的光谱测量,我们发现半导体激光器制冷器显示温度为 10°、驱动电流在 17 A 时光纤激光器的输出中除了 1110 nm 的激光

外,确实还有极少量的没有被吸收的抽运光存在,这说明存在漏光现象,如图 4 所示。漏光能量约为输出激光的 1%。

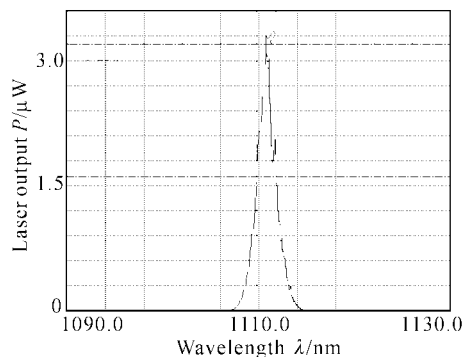


Fig. 3 Output spectrum of laser at 1110 nm

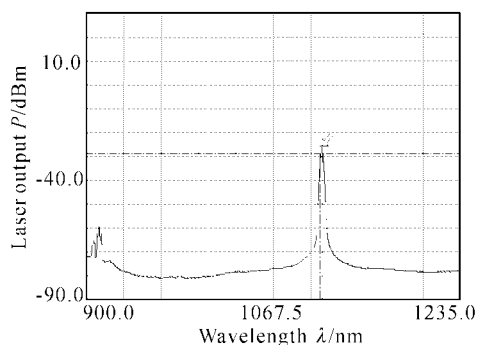


Fig. 4 Output spectrum of 1110 nm laser and remained pump light at 910 nm

在半导体激光器驱动电流为 17 A,输出功率为 1.5 W 附近时,我们对该光纤激光器的输出激光模式进行了测试。调节输出显微物镜和光纤输出端的距离,使光束发散。在探测器前置一直径约为 0.15 mm 的小孔,在垂直于光束的水平方向上进行一维扫描,每隔 0.2 mm 读取一个功率值,归一化后得到的一维强度分布曲线是一非常好的高斯分布曲线,示于图 5。在垂直于光束的竖直方向上,我们也进行了同样测量,结果与图 5 完全相同。这说明我

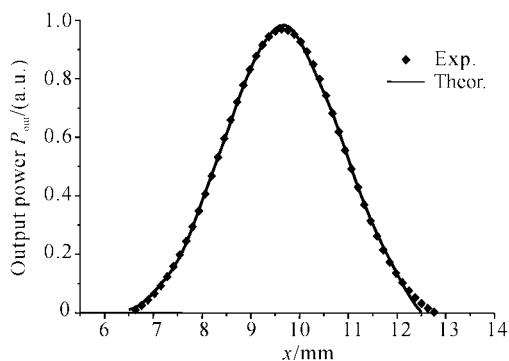


Fig. 5 The mode of the output laser

们的双包层光纤激光器的输出是光束质量非常好的接近衍射极限的基模激光。

3.2 讨论

在实验测量激光器的输出功率时,当电流增大到 40 A,测得 4.9 W 的数据后,我们随即发现探测器显示消失,经查是实验时显微物镜和光纤端面的距离不合适,使得激光聚焦在了探测器的探测面上,将石墨片击穿损坏了探测元件所致。从图 2 可以看出,随着抽运功率(工作电流)的增加,激光输出功率的增大并不成很好的线性关系,可以断定这是由于聚焦后的强激光导致的探测器损坏所引起的,实际的功率值应比上述的测量值要高一些。

对于漏光问题,我们认为有以下三个方面的原因:1) 由于矩形内包层中局域稳定模式的存在^[7],使得极少量抽运光线在内包层中稳定反射却不能到达纤芯所在的区域,形成螺旋光;2) 所用的双包层光纤纤芯的掺杂浓度不够高,仅为 1.5%;3) 所用半导体激光器的发光谱线中心不在掺 Yb³⁺ 光纤的吸收峰 915 nm,而在 910 nm 附近(图 6 所示为半导体制冷器显示温度为 10°,工作电流为 17 A 时半导体激光器输出的光谱曲线)。抽运光中心波长和掺 Yb³⁺ 光纤吸收光谱的不匹配,使得纤芯对抽运光的吸收降低,出现漏光现象。当然通过调节半导体激光器温控和驱动电流至某一特定值,使其中心波长接近或落在 915 nm 将会使漏光能量将低。另外,由于掺 Yb³⁺ 光纤的最大吸收峰在 975 nm,换用 975 nm 的半导体激光器将会提高光纤对抽运光的吸收效率,并使得光纤长度变短,漏光减少以致消失,但 975 nm 的吸收峰非常的窄,这对半导体激光器的波长控制提出较高要求。

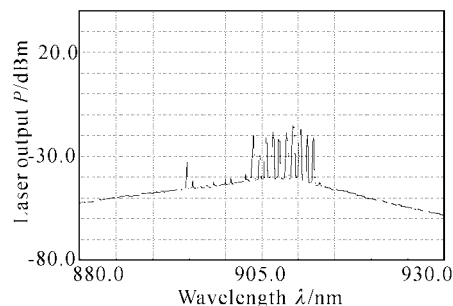


Fig. 6 Emission spectrum of laser diode

目前我们实验上测得双包层光纤激光器的斜率效率为 43.6%,功率可达 4.9 W。实际上由于我们探测器的原因以及显微物镜的透射损耗,输出功率和转换效率都可能要比上述的结果高一些。由于半导体激光器的发光谱线同运行功率(工作电流)和制

冷温度有关^[11],通过对我们所用的半导体激光器特性的测量,找到中心波长在 915 nm 的特定运行条件,也可以使得输出功率和效率得以提高。由于双包层掺 Yb³⁺ 光纤激光器优越的光束质量和合适的激光波长,我们研制的近 5W 的光纤激光器可以应用在很多方面,如抽运掺磷石英光纤实现级联拉曼光纤激光器^[12],也可以抽运掺铊的石英或氟化锆光纤,实现激光上转换或得到更长波长的红外激光;此外,还可以在印刷、标记、微机械等领域中得到应用^[2]。

结论 我们选用矩形内包层掺 Yb³⁺ 双包层光纤,采用基本的法布里-珀罗腔型,实现了波长为 1110 nm、功率近 5W、光束质量接近衍射极限的连续激光输出,斜率效率约为 43.6%。由于双包层光纤激光器的工作介质和谐振腔都集掺稀土元素的双包层光纤于一体,且我们采用了半导体制冷器对高功率半导体激光器进行制冷和温控,整个系统同相等功率的半导体抽运固体激光器相比,更加小巧、灵活、高效,并且不用考虑激光介质的热效应问题。下一步,我们将对抽运光和双包层光纤的耦合部分进行优化和模块化,并实现双包层光纤激光器的整机化。

感谢方祖捷研究员、瞿荣辉副研究员、夏江珍博士在光谱测量方面给予的帮助。

参 考 文 献

- Dominic V, MacCormack S, Waarts R *et al.*. 110 W fiber laser. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- DiGiovanni D J, Muendel M H. High-power fiber laser. *Opt. Photon. News*, 1999, **10**(1):26~30
- Muendel M H. High-power fiber laser studies at the Polaroid Corporation. *Proc. SPIE*, 1998, **3264**:21~29
- Ding Ning, Wang Wentao, Ruan Ling *et al.*. Fabrication and lasing properties of Yb-doped double-clad silica fiber. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2001, **A27**(11): 986~991 (in Chinese)
- Sun Diechi, Hu Yimei, Liang Jianzhong *et al.*. Research on Yb doped double clad fiber laser. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 2000, **101**(5):40~42 (in Chinese)
- Snitzer E, Po H, Hakimi F *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser. *Proc. Conf. Optical Fiber Sensors*, Postdeadline paper PD5, 1988, 41
- Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(3):511~518
- Reichel V, Unger S, Hagemann V *et al.*. 8 W highly-efficient Yb-doped fiber-laser. *Proc. SPIE*, 2000, **3889**: 160~169
- Hanna D C, Percival R W, Perry I R *et al.*. Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(17):1111~1113
- Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zhuoyou *et al.*. Operating characteristics of laser diode arrays. *Laser Technology* (激光技术), 2002, **26**(1):23~25 (in Chinese)
- 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**(2):329~337
- Kim N S, Prabhu M, Li C *et al.*. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36 W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber laser at 1064 nm and spectral continuum generation. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(2): 219~222

4.9 W CW Ytterbium-Doped Double-Cladding Fiber Laser and Its Output Characteristics

Zhou Jun^{1,2,3} Lou Qihong¹ Li Tiejun¹ Dong Jingxing¹
Wei Runrong¹ Wang Zhijiang¹

{ 1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800
2 Physics Department, Changshu College, Changshu 215500
3 Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039 }

(Received 17 May 2002; revised 18 June 2002)

Abstract: A 4.9 W CW ytterbium-doped fiber laser operating in the 1110 nm region and near diffraction-limited was reported. For a silica-based double-cladding fiber with rectangular inner cladding, slope efficiency of 43.6% was observed for pumping by a diode-laser operating near 910 nm.

Key words: fiber laser; double-cladding fiber; ytterbium-doped; rectangular inner cladding