

高功率光纤激光器及其关键技术

刘洋^{1,2} 赵崇光¹ 王蓓^{1,3} 王立军¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;
2.武汉军械士官学校 光电研究所, 湖北 武汉 430075; 3.长春理工大学, 吉林 长春 130022)

【摘要】概述了高功率光纤激光器的关键技术, 并介绍了通过实验使光纤激光器获得最大输出功率 6.02 W。

关键词: 光纤激光器; 高功率激光器; 光纤光栅; 包层泵浦

中图分类号: TN 248.1

High-power Fiber Laser and Its Key Technologies

LIU Yang^{1,2} ZHAO Chong-guang¹ WANG Ji^{1,3} WANG Li-jun¹

(1. Key Lab of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075

3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The technologies of high-power fiber laser are summarized, and a CW fiber laser with output power of 6.02W was demonstrated experimentally.

Keywords: fiber laser; high-power laser; fiber grating; clad-pumping

1 引言

光纤激光器是以光学纤维为基质, 掺入某些活性离子作为工作介质, 或者利用光学纤维本身的非线性效应而形成的一类激光器。与气体或固体激光器相比, 它具有结构简单、散热效果好、转换效率高、光束质量卓越以及真正免维护等显著特点。目

前, 它已成为全面提升现有传统激光器性能和掀起激光产业技术改造的先锋和领航者, 作为第 3 代激光技术的代表, 光纤激光器被称为 21 世纪初最伟大的发明之一。

高功率光纤激光器是一种新型光源, 在同样的输出光功率下, 光纤激光器在光束质量、光传递特性、可靠性和体积大小等方面都具有极大优势。光

纤激光器的增益介质长，能很方便地延长增益介质以使抽运光被充分吸收，这一特性使光纤激光器能在低抽运功率下运转，而且能保证极佳的光束质量和很高的转换效率。发丝般粗细的光纤使光纤激光器能获得极高的光功率密度 (140 mW/cm^2)。光纤激光器具有大表面/体积比，其工作物质的热负荷小，具有良好的散热特性，不需要额外增加庞大的制冷系统，给光纤激光器的使用带来极大方便。另外，光纤激光器结构简单，易于实现流水化和大批量生产。因此，高功率光纤激光器的研发和实用化技术已成为激光技术领域的一个热点，受到广大科研工作者和业界专家们的极大关注^[1-7]。本文结合实际工作，对高功率光纤激光器的一些关键技术做以简要评述。

2 高功率光纤激光器的关键技术

2.1 包层泵浦技术

包层泵浦技术克服了低空间相干性强泵浦光与单个空间模的激光波导之间不易耦合的困难，包层泵浦技术是通过双包层光纤实现的。与普通光纤相比，双包层光纤增加了内包层，其横向尺寸和数值孔径远大于纤芯，而且对于泵浦光是多模的，可以有效提高泵浦光的耦合效率。多模的泵浦光在内包层的传输过程中，多次经过纤芯，被纤芯中的稀土离子吸收。这种光纤结构增加了泵浦长度，显著提高了泵浦效率，从而使光纤激光器的输出功率提高几个数量级。泵浦光的吸收效率与内包层的几何形状以及纤芯在包层中的位置有关。典型的内包层结构有方形、矩形、圆形、D形、梅花形以及偏心结构等。研究表明，同心圆形结构的吸收效率最低，而非圆形的内包层结构对泵浦光的吸收效率很高，理想情况可达到 100%。

2.2 泵浦耦合技术

高功率光纤激光器的关键技术之一就是如何将泵浦源输出的光功率有效地耦合到增益光纤中去。常规的光纤激光器采用普通的单模光纤做增益介质，

耦合效率极低，很难得到高功率的光纤激光。包层泵浦技术的出现，极大提高了泵浦光的耦合效率，使光纤激光器摆脱了低功率、无较大应用价值的印象，推动了高功率光纤激光器的发展。但要获得几百瓦甚至几千瓦的光纤激光，就需要更高输出功率的泵浦源（一般为半导体激光器阵列），将半导体激光器阵列输出的几千瓦的激光耦合入一根双包层增益光纤是一件很困难的事，耦合效率也很低。因此，寻找泵浦光进入增益光纤的耦合新技术是一项重要的工作。采用树杈形光纤，将多个激光二极管输出的光功率同时耦合进增益光纤是最好的解决方案，即每个激光二极管输出的光由多模光纤导出，采用光纤集合熔接技术，将多根多模光纤融合成一根光纤，制成光纤模块。这样可使单根光纤的输出能量在百瓦级，同时消除了半导体激光阵列集成模块的散热问题。将树杈形光纤模块作为泵浦光进入双包层增益光纤的导入口，可以将多个激光二极管输出的光功率有效地耦合进增益光纤的内包层，有效提高泵浦效率。

2.3 谐振腔制备技术

制备合适的光学谐振腔是高功率光纤激光器实用化的又一项关键技术。目前，高功率光纤激光器的谐振腔主要有两种：一种是在光纤端面镀膜或采用二色镜构成谐振腔，这种方法给泵浦光的耦合以及光纤激光器的封装都带来很大困难，不利于光纤激光器的实用化和商品化；另一种是采用光纤光栅做谐振腔。光纤光栅是一种低损耗器件，具有非常好的波长选择特性，光纤光栅的采用简化了激光器的结构，同时提高了激光器的信噪比和可靠性，窄化了线宽，提高了光束质量，而且通过应力调节可进行波长调谐。另外，采用光纤光栅做谐振腔可以将泵浦源的尾纤经锥形光纤与增益光纤有机地熔接为一体，避免用二色镜和透镜组提供激光反馈带来的损耗，从而降低了光纤激光器的阈值，提高输出激光的斜率效率。因此，采用光纤光栅做谐振腔不仅使光纤激光器的结构简单、紧凑，而且极大提高

了泵浦光的耦合效率 (可达 90%), 有利于光纤激光器的实用化。

直接在增益光纤上写入光纤光栅似乎是最好的办法, 这种方法可以有效减少光纤熔接带来的损耗。但高功率光纤激光器的增益光纤为双包层光纤, 其外包层一般为聚合物材料, 在氢载增敏过程中容易受到破坏, 严重影响泵浦光的耦合, 导致耦合效率较低。另外, 聚合物的外包层材料对紫外光一般是不透明的, 这也给光纤光栅的制备带来困难。另一种方法是采用复合腔的光纤激光器结构, 即在非增益光纤上进行光纤光栅的紫外写入, 然后再与双包层光纤熔接。这种方法虽然会带来接头损耗, 但在光栅的制备过程中不会损坏增益光纤本身的特性, 泵浦光的利用率较高。我们在复合型光学谐振腔的制备方面做了初步的研究工作。研究了各种不同类型的光纤与增益光纤的耦合特性以及对泵浦效率的影响, 选择外包层经特殊处理的双包层光纤进行光栅的紫外写入, 一方面避免了高压载氢对外包层特性的破坏, 另一方面又保证了泵浦光的耦合效率, 提高了激光器的效率。研究表明, 采用复合腔结构的光纤激光器的斜率效率可达 75% 以上, 而直接在增益光纤上进行光栅写入的光纤激光器的斜率效率只有 40% 左右^[4-6]。

3 双包层光纤激光器的实验及结果

实验选用的双包层光纤的参数如下: 光纤纤芯直径 7 μm , 截止波长为 1 000 nm, 数值孔径 0.15, 掺杂离子为 Yb^{3+} 离子, 内包层形状为准圆形星型结构, 直径为 $205 \pm 5 \mu\text{m}$, 数值孔径 0.45, 外包层为 300 μm , 光纤长度为 20 m。实验选用一对光纤布喇格光栅作为激光器的谐振腔, 泵浦光功率输入端选用的布喇格光栅主要用来实现使泵浦光透过率大于 99%, 对激光光全反; 由于双包层掺杂光纤的增益高, 在后腔镜反射率较小的情况下可以为激射提供足够的光反馈, 因此实验选用的后端耦合输出光栅的作用更像是滤波器^[3,4,7]。实验方案及装置如图 1 所示。

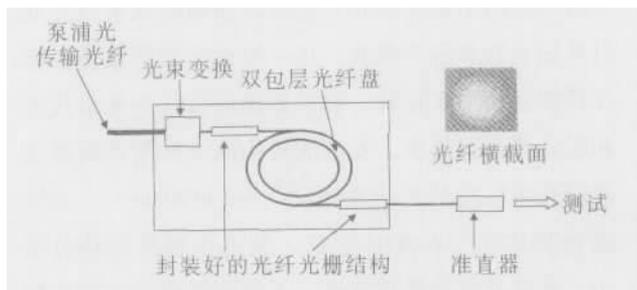


图 1 全光纤结构光纤激光器实验装置图

泵浦源为高功率半导体激光模块, 光纤直径为 400 μm , 输出波长为 970 nm。图 2 为实验获得的结果。

由图 2 可以看出, 当泵浦电流在 1 A 时光纤激光器达到阈值, 随着电流的增加, 在 4.6 A 时得到

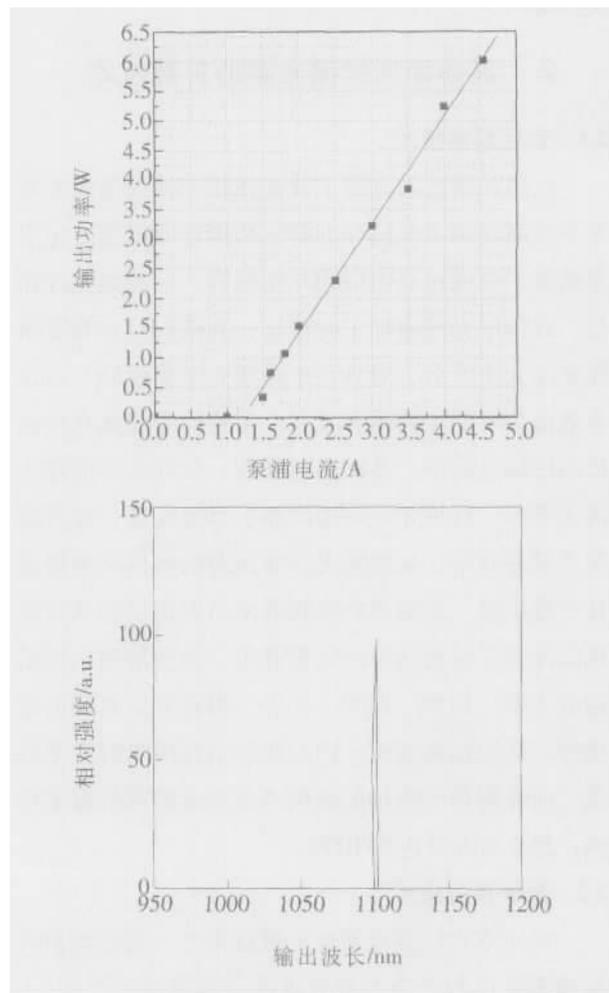


图 2 实验测试结果: 输出功率随泵浦电流变化曲线和输出光谱图

最大的输出功率 6.02 W, 斜效率达到 1.7 W/A, 右图
为光纤激光器的输出光谱图, 从图中可以看出, 输
出中心波长 1100 nm, 峰值半宽为 0.8 nm。

4 结束语

目前, 高功率光纤激光器已成为世界上众多国

家开展研究的热点之一, 其卓越而独特的优点使它
在各个领域有着重要的应用。本文结合实验对高功
率光纤激光器的关键技术作了简要介绍, 通过实验
研究使光纤激光器获得了 6.02 W 的最大输出功率。
(No.7)

参考文献:

- [1] Govind P.Agrawal 著. 贾东方, 余震虹, 等译. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 282- 316.
- [2] Dominic V, Maccormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser [J]. Electron. Lett., 1999,35(14):1158- 1160.
- [3] Barnard C, Myslinski P, Chrostowski J, et al. Analytical mode for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. IEEE J.QE., 1994,30(8):1817- 1829.
- [4] Kurkov A S,Laptev Y A,Dianov E M,et al.Yb³⁺-doped double-clad fibers and lasers [J]. SPIE,2001,4083: 118- 126.
- [5] 楼祺洪, 朱健强, 周军, 等. 双包层光纤激光器及其在军事中的应用 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2003,14 (5): 28- 32.
- [6] 王彦, 崔一平. 光纤激光器技术 [J]. 电子器件, 2004, 27(2):342- 347.
- [7] 胡贵军, 白冰, 张亮, 等. 高功率光纤激光器研究 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2003, 21(4):338- 342.