

# 同带抽运高效率光纤放大器

肖虎 冷进勇 吴武明 王小林 马阎星 周朴<sup>†</sup> 许晓军 赵国民

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年1月4日收到; 2011年8月9日收到修改稿)

以光纤光栅为谐振腔搭建了波长为 1020 nm 的光纤激光器, 并通过两级级联放大获得了 590 mW 的最大输出功率. 利用获得的波长为 1020 nm 的激光进行了波长为 1064 nm 种子光同带抽运放大, 实验研究了不同增益光纤长度时放大器的输出功率和转换效率. 当增益光纤长度为 8.5 m 时, 放大器最大输出功率为 385 mW, 斜率效率为 81%. 进行了波长为 976 nm 的半导体激光器直接抽运波长为 1064 nm 种子光的实验. 在增益光纤长度最优时, 其斜率效率为 56.4%. 实验结果表明, 同带抽运方式比传统抽运方式具有更高的转换效率. 研究结果可为波长为 1020 nm 的激光高功率放大和波长为 1064 nm 的光纤激光高功率同带抽运放大提供一定的参考.

**关键词:** 同带抽运, 光纤放大器, 斜率效率

**PACS:** 42.55. Wd

## 1. 引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点, 是国际上激光技术领域的一个研究热点. 近年来, 随着大模场双包层掺镱光纤(YDF)制造工艺的完善和高亮度半导体激光二极管(LD)抽运技术的发展, 单根双包层光纤激光器的输出功率不断快速提升<sup>[1-4]</sup>. 在 YDF 激光器中, 以波长为 976 nm 的 LD 作为抽运源产生波长为 1064 nm 的输出激光时, 其量子损耗仅为 9%. 但是在高平均功率下, 由于残留热量很难从光纤中带走, 在光纤内产生极高的热载荷密度, 严重限制了最大输出功率<sup>[5-7]</sup>. 而且受 LD 亮度及热效应的限制, 采用 LD 抽运的传统高功率 YDF 激光器的输出将一直限制在千瓦级水平. YDF 放大器或激光器获得更高功率的关键在于使用亮度更高的抽运光源. 英国 Southampton 大学的 Richardson 等<sup>[5]</sup>指出, 目前输出功率在 3 kW 以上的光纤激光器均采用同带抽运的方式. 与传统的波长为 976 nm 的抽运光注入 YDF 直接产生波长为 1  $\mu\text{m}$  的激光输出不同, 同带抽运采用激光抽运激光的方式, 其抽运光波长与发射波长更加接近. 以美国 IPG 公司研制的 10 kW 激光器为例, 其抽

运光波长为 1018 nm, 发射波长为 1070 nm, 量子损耗仅为 5%, 约是波长为 976 nm 的 LD 直接抽运时的 1/2, 极大降低了光纤内的热载荷密度. 波长为 1018 nm 的抽运光由波长为 976 nm 的 LD 抽运的光纤激光器产生, 其亮度为 LD 亮度的 1000 倍以上<sup>[5]</sup>. 但目前国际上有关 YDF 激光同带抽运的报道仅限于 IPG 公司方案性的说明, 其详细的实验结果(如放大器的光光效率、光谱等)尚未见公开报道.

为研究同带抽运方案, 本文对全光纤结构同带抽运光纤放大器进行了实验研究. 首先搭建了波长为 1020 nm 的光纤激光器, 并以 YDF 为增益介质, 利用波长为 976 nm 的抽运光对其进行了两级放大, 最大输出功率为 590 mW, 斜率效率为 61.8%. 经放大后的 1020 nm 激光作为抽运光, 对 1064 nm 的单频种子光进行放大, 测试了不同 YDF 长度下放大器的效率和输出功率. 当增益光纤长度为 8.5 m 时, 获得了 385 mW 的最大输出功率, 此时斜率效率为 83%. 为比较同带抽运方式与传统的 LD 直接抽运方式, 搭建了波长为 976 nm 的 LD 直接抽运的光纤放大器. 当最大抽运功率为 466 mW 时, 1064 nm 激光最大输出功率为 208 mW, 斜率效率仅为 56.4%. 实验结果表明, 同带抽运方式的光光转换效率明显优于传统抽运方式.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zhoupu203@163.com

## 2. 实验及结果分析

### 2.1. 1020 nm 激光的产生与放大

实验中波长为 1020 nm 的激光源为实验室自行搭建的线型驻波腔光纤激光器,其腔体结构如图 1 所示,由一台带尾纤的波长为 976 nm 的 LD、一个中心波长为 1020 nm 的光纤布拉格光栅 (FBG)、长度为 1.5 m 的单包层 YDF 和一个  $2 \times 2$  耦合器组成. FBG 的中心反射率为 99%.  $2 \times 2$  耦合器同侧的两个端口相连作为输出耦合端. 激光器的最大输出功率为 30 mW,输出光谱如图 2 所示.

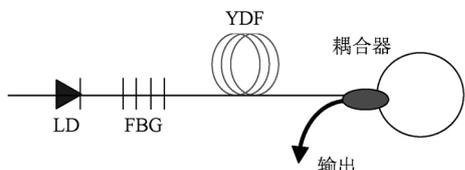


图 1 波长为 1020 nm 光纤激光器结构示意图

激光器的输出经隔离器 (ISO) 后注入两级级联放大器. 两级放大器如图 3 所示,其所用的增益光纤为同一型号的单包层 YDF,纤芯和包层直径分别

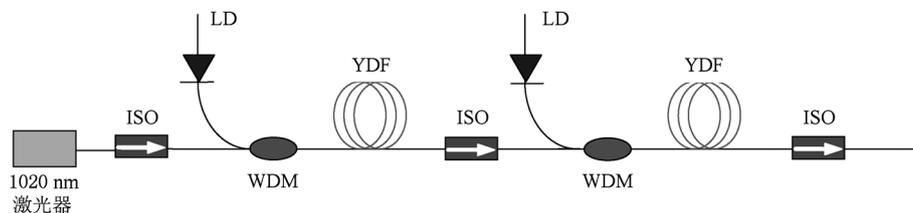


图 3 波长为 1020 nm 光纤放大器结构示意图

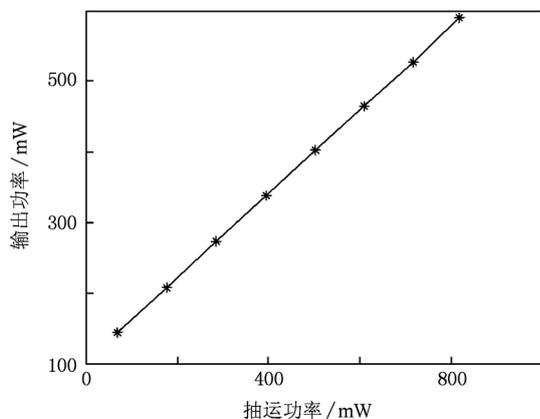


图 4 波长为 1020 nm 激光输出功率随抽运功率的变化

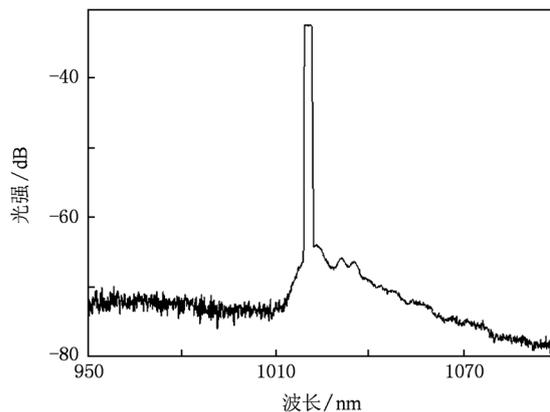


图 2 波长为 1020 nm 光纤激光器的输出光谱

为 6 和 125  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.11,所用 YDF 在 976 nm 附近吸收系数为 250 dB/m. 两级放大器 YDF 长度分别为 1.5 和 2 m. 种子激光和抽运光经波分复用器 (WDM) 注入增益光纤. 第一级放大器的最大输出功率为 202 mW. 第二级放大器的输出功率随抽运光功率的变化如图 4 所示. 经 ISO 后波长为 1020 nm 激光的最大输出功率为 590 mW,斜率效率为 61.8%,其输出光谱如图 5 所示. 放大器输出中存在放大自发辐射 (ASE) 噪声,但其强度与信号光相差约 30 dB,对放大器效率的影响可以忽略.

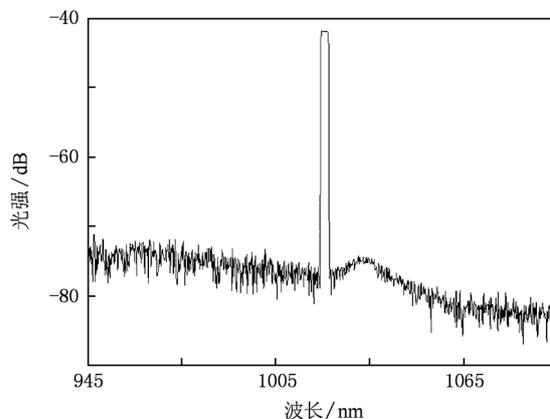


图 5 波长为 1020 nm 放大器 590 mW 输出时的光谱

### 2.2. 1064 nm 种子光的同带抽运放大

同带抽运放大器结构如图 6 所示. 经两级放大后波长为 1020 nm 的激光和波长为 1064 nm 的单频

种子激光经一个 1020 nm/1064 nm WDM 注入增益光纤. 试验中所用单频种子光源为短腔结构的窄线宽光纤激光器, 其线宽为 20 kHz, 最大输出功率为 20 mW.

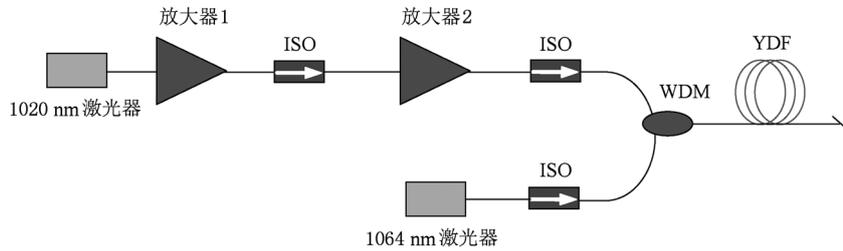


图 6 同带抽运放大器结构示意图

由于普通 YDF 在 1020 nm 附近的吸收系数较低, 为确保 1020 nm 抽运光被充分吸收, 采用了不同长度的 YDF 进行实验研究. 当所用 YDF 长度为 25 m 时, 输出功率随 1020 nm 抽运光功率的变化情况如图 7 所示. 放大器的最大输出功率为 284 mW, 斜率效率仅为 70%. 放大器在最大输出功率时的光谱如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 抽运光已完全被 YDF 吸收. 放大器斜率效率偏低是由于光纤过长, 激发的种子激光再次被吸收所致. 将 YDF 缩短为 20 m 后, 再次测试相同抽运条件下放大器的输出, 此时放大器最大输出功率为 287 mW, 光谱中仍未观测到抽运光.

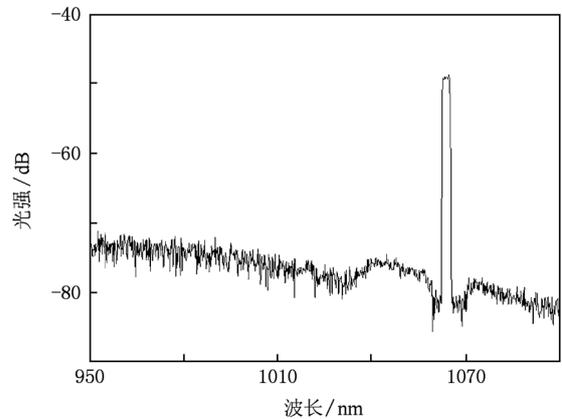


图 8 当增益光纤长度为 25 m 时放大器的输出光谱

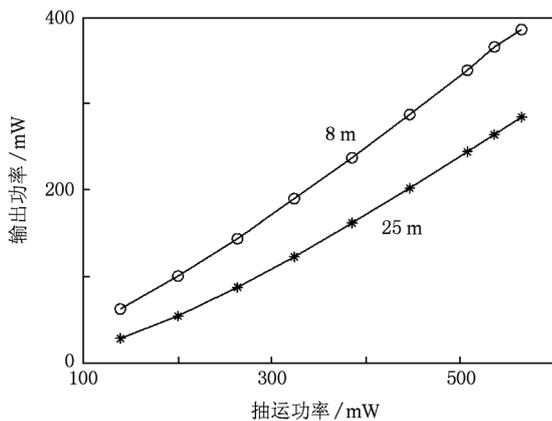


图 7 当增益光纤长度为 8, 25 m 时放大器输出功率随抽运功率的变化

当增益光纤长度为 14 m 时, 最大输出功率为 305 mW. 当增益光纤长度缩短至 8.5 m 时, 放大器在最大功率时的输出光谱如图 9 所示. 此时可检测到抽运光, 但其强度低于信号光 30 dB, 因此可认为

8.5 m 的增益光纤长度较为合适. 输出光谱中存在 ASE 噪声, 但强度较弱. 在此条件下测得放大器的输出功率随抽运功率的变化如图 7 所示. 最大输出功率为 385 mW, 斜率效率为 83%. 进一步提高抽运光功率, 放大器有望获得更高的功率输出.

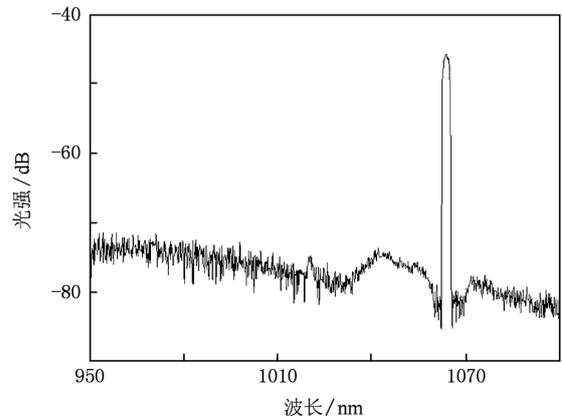


图 9 增益光纤长度为 8.5 m 时放大器的输出光谱

### 2.3. 976 nm LD 抽运光纤放大器

为比较同带抽运方式与传统抽运方式的光光转换效率,利用相同型号的 YDF 搭建了波长为 976 nm 的 LD 直接抽运的光纤放大器,其结构如图 10

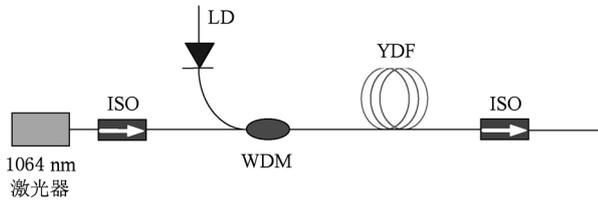


图 10 波长为 976 nm LD 抽运光纤放大器结构示意图

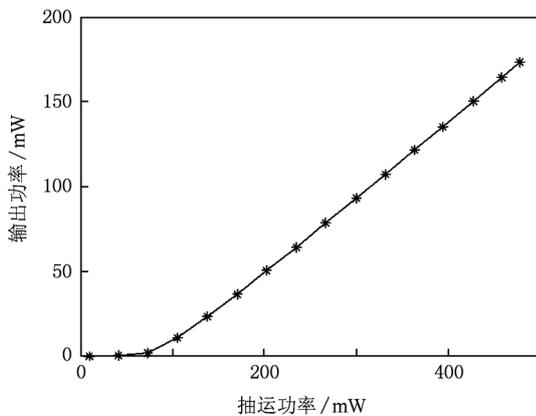


图 11 波长为 976 nm LD 抽运光纤放大器输出功率随抽运功率的变化

所示. 抽运光和种子激光经一个 976 nm/1064 nm WDM 注入增益光纤. 所用 YDF 在 976 nm 附近吸收系数为 250 dB/m, 实验中增益光纤的优化长度为 30 cm, 远小于同带抽运时所需的 YDF 长度. 放大器输出功率随抽运光功率呈线性增长, 如图 11 所示. 当最大抽运功率为 476 mW 时, 放大器的最大输出功率为 208 mW, 斜率效率为 56.4%, 远低于 1020 nm 激光同带抽运时的效率.

### 3. 结 论

搭建了波长为 1020 nm 的光纤激光器, 利用商品化的 YDF 和波长为 976 nm 的抽运光对其进行了级联放大, 光光转换效率为 61.8%. 实验结果表明了在低功率下对波长为 1020 nm 的种子激光进行放大的可行性. 以 1020 nm 激光作为抽运光进行同带抽运放大, 对比了在不同增益光纤长度时放大器的输出功率和转换效率. 当增益光纤长度最优时, 放大器最大输出功率为 385 mW, 斜率效率为 83%. 在相同实验条件下, 利用波长为 976 nm 的 LD 直接抽运放大相同的种子光, 增益光纤长度最优时其斜率效率仅为 56.4%. 实验结果表明, 同带抽运方式的转换效率明显高于传统抽运方式. 本文的实验结果对 1020 nm 激光的高功率放大和 1064 nm 的光纤激光的高功率同带抽运具有一定的参考意义.

[1] Lin H H, Jiang D B, Wang J J, Li M Z, Zhang R, Deng Y, Xu D P, Dang Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025208 [林宏奂、蒋东滨、王建军、李明中、张 锐、邓 颖、许党朋、党 钊 2011 物理学报 **60** 025208]

[2] Limpert J, Liem A, Zellmer H 2003 *Electron. Lett.* **39** 645

[3] Jeong Y, Sahu J, Payne D 2004 *Opt. Express* **12** 6088

[4] Limpert J, Röser F, Klingebiel S 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 537

[5] Richardson D, Nilsson J, Clarkson W 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 63

[6] Peng X, Dong L 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 126

[7] Brilliant N, Kalliroi L 2001 *Opt. Lett.* **26** 1669

## High efficiency tandem-pumped fiber amplifier

Xiao Hu Leng Jin-Yong Wu Wu-Ming Wang Xiao-Lin Ma Yan-Xing Zhou Pu<sup>†</sup>  
Xu Xiao-Jun Zhao Guo-Min

(College of Opto-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 4 January 2011; revised manuscript received 9 August 2011)

### Abstract

A 1020 nm fiber laser is designed based on fiber Bragg grating and then its output power is boosted to 590 mW through a two-stage amplifier. A tandem pumping fiber amplifier is constructed with the 1020 nm laser used as a pump source. The output power and the efficiency of the amplifier are measured with different lengths of gain fiber. A 385 mW maximum output power with an 81% slope-efficiency is achieved when the gain fiber is 8.5 m. The output power and the efficiency of a traditional amplifier in which 976 nm diode laser is used as a pump source are also measured. The experimental results indicate that tandem pumping fiber amplifier can achieve a higher efficiency than traditional fiber amplifier.

**Keywords:** tandem pumping, fiber amplifier, slope-efficiency

**PACS:** 42.55.Wd

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhoup203@163.com