

1018 nm 光源及光纤激光同带抽运实验研究

肖 虎 董小林 周 朴* 许晓军 赵国民

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 设计了级联式全光纤 1018 nm 光源。该光源采用两级级联放大方案, 实现了对低功率 1018 nm 种子光的放大, 获得了 4.2 W 的最大输出功率, 并分析了影响放大效率的因素。以获得的 1018 nm 激光为抽运源, 进行了 1070 nm 信号光的同带抽运放大器实验研究, 测量了放大器的输出特性。在纤芯抽运实验中, 获得了明显的放大效果和较高的功率转换效率。进行了瓦量级包层同带抽运的实验研究, 分析了导致包层抽运实验中功率转换效率偏低的原因并提出了解决方案。

关键词 激光器; 光纤放大器; 同带抽运; 双包层光纤; 转换效率

中图分类号 TN212; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0314001

Experimental Investigation on 1018 nm Fiber Laser and Tandem Pumping

Xiao Hu Dong Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun Zhao Guomin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Cascaded all-fiber 1018 nm laser source is designed and demonstrated, which can boost the low input 1018 nm signal to 4.2 W. The main factors that have impact on the power conversion efficiency are analyzed. Then the tandem-pumped fiber amplifier is experimentally investigated in which the 1018 nm fiber laser is used as pump source to amplify the 1070 nm signal laser. In the core-pumping experiment, the signal laser is efficiently amplified with a high power conversion efficiency. The reason leading to low power conversion efficiency in cladding-pumped experiment is analyzed and some solutions are proposed.

Key words lasers; fiber amplifier; tandem pump; double cladding fiber; power conversion efficiency

OCIS codes 140.3298; 060.2320; 060.2420; 140.3510; 140.3615

1 引 言

随着双包层掺镱光纤(YDF)制造工艺的提高和高亮度半导体激光二极管(LD)抽运技术的发展, 单根双包层掺镱光纤激光器的输出功率不断快速提升^[1~7]。采用 976 nm LD 抽运 YDF 时, 量子损耗约 10%, 即有 10% 的抽运光能量转换为热能。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, 容易引起光纤老化或损坏。且现有的 976 nm LD 亮度有限, 继续提高较为困难, 极大地限制了可注入掺镱光纤的抽运功率。

以上两个因素严重限制了单根光纤的最大输出功率^[6,7]。IPG 公司的 Shkurikin 预言, 受 LD 亮度及光纤内热效应的限制, 采用 LD 直接抽运方式的传统掺镱光纤激光器的输出将一直限制在千瓦级水平^[8]。高亮度抽运源和有效热管理方案是掺镱光纤激光获得更高功率的关键^[9]。相关文献表明, 目前输出功率在 3 kW 以上的全光纤结构激光器均采用同带抽运的方式实现^[8]。与传统的 976 nm 抽运光注入掺镱光纤直接产生 1 μm 波段激光输出不同, 同带抽运方案采用光纤激光抽运掺镱光纤的方式, 其抽

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-10-13

作者简介: 肖 虎(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: xhwise@163.com

导师简介: 赵国民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: gmzhao@nudt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhoup203@163.com

运光波长与输出激光波长更加接近。2009年,IPG公司报道的10 kW量级的光纤激光器^[11]就采用了同带抽运方式。该光纤激光器抽运源为1018 nm的掺镱光纤激光器,发射波长为1070 nm,量子损耗仅为5%,约为976 nm LD直接抽运时的1/2,极大地降低了光纤内的热载荷密度。1018 nm抽运光由LD抽运的光纤激光器产生,其亮度为LD激光亮度1000倍以上^[9],有效克服了LD亮度偏低的问题。

目前国际上关于1018 nm同带抽运尚无详细的报道。此外由于波长特殊,实现高功率输出较困难,关于1018 nm光纤激光本身的报道也较少。尽管IPG公司研制出了单纤输出300 W的1018 nm光纤激光器并用作10 kW激光器抽运源,但并未公布具体细节。在国内,Li等^[12]于2011年获得了7.5 W的1018 nm光纤激光输出,但激光器并非全光纤结构。

为获得高功率全光纤结构1018 nm光源并进行同带抽运实验研究,首先搭建了1018 nm光纤激光器,利用976 nm LD对其进行了两级级联放大,最大输出功率为4.2 W,以获得的1018 nm激光作为抽运光,进行了单包层和双包层光纤的同带抽运放大实验,均获得了明显的放大效果。

2 1018 nm 激光的产生与放大

2.1 种子源

实验中所用的1018 nm种子激光器为线型驻波腔激光器,其腔体结构如图1所示,由一个976 nm LD,一个中心波长为1018 nm的光纤布拉格光栅(FBG),长度为1.5 m的单包层掺镱光纤和一个2×2耦合器组成。FBG的中心波长反射率为99%。2×2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约100 mW,光谱如图2所示。

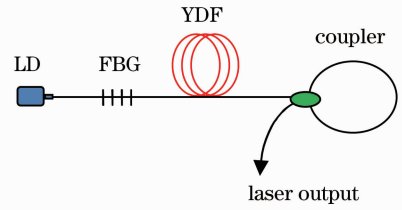


图1 1018 nm 光纤激光器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the 1018 nm laser

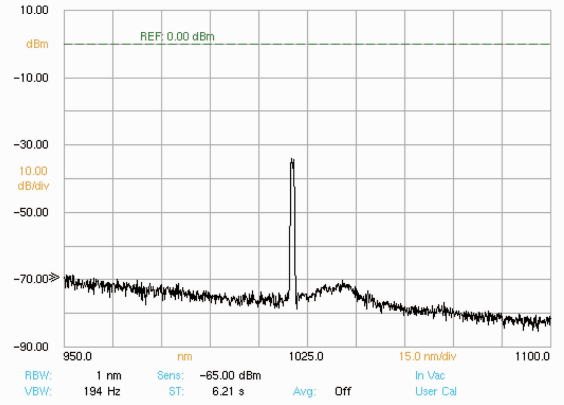


图2 1018 nm 光纤激光器输出光谱图

Fig. 2 Spectrum of the 1018 nm fiber laser

2.2 1018 nm 光纤放大器

激光器的输出经隔离器后注入两级级联光纤放大器,如图3所示。第一级放大器为种子光预放,所用的增益光纤为Nufern公司的单包层掺镱光纤,纤芯和包层直径分别为6 μm和125 μm,数值孔径为0.11,976 nm抽运光吸收系数为250 dB/m,光纤长度约1 m。预放级经隔离器后的最大输出功率为475 mW,斜率效率为82%。第二级放大器为主放大器。所用增益光纤为中国电子科技集团公司第二十三研究所研制的大模场(LMA)双包层掺镱光纤,纤芯直径为37 μm,数值孔径为0.07;内包层直径为125 μm,数值孔径为0.46。由于较大的纤芯尺寸设计,有效提高了抽运光的填充因子,从而提高了

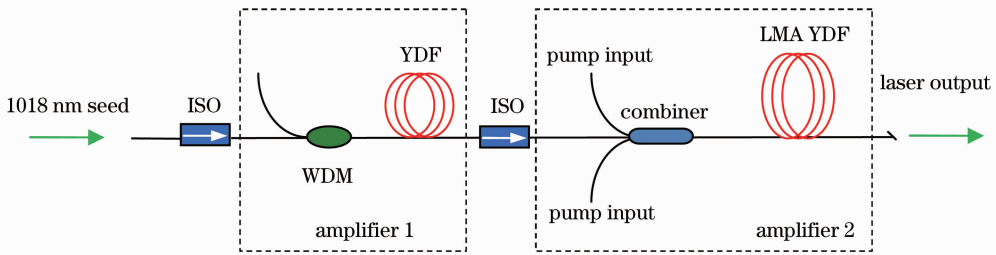


图3 1018 nm 光纤放大器结构示意图

Fig. 3 Experimental setup of the 1018 nm fiber amplifier

抽运光的包层吸收系数。放大器增益光纤长度约 1.2 m, 抽运源为两个尾纤输出的 976 nm LD。抽运光和信号光经一个 $(2+1) \times 1$ 抽运合束器 (WDM) 注入增益光纤。放大器的输出端研磨成 8° 斜角以抑制自激振荡。为滤除未吸收完的抽运光, 将靠近放大器输出端的一段光纤剥去外包层并浸于高折射率匹配液中, 将增益光纤包层中残留的抽运光导出。

实验中发现, 主放增益光纤长度对放大器输出特性影响较大。当增益光纤长度较长时, 放大器输出存在较强的放大自发辐射 (ASE)。图 4 所示为主放增益光纤长度为 2 m, 注入抽运功率为 3.5 W 时放大器的输出光谱。此时放大器在波长 1040 nm 附近产生了自激振荡, 导致 1018 nm 信号光不能有效放大。产生这一现象的主要因素有两个: 1) 1018 nm 信号光在增益光纤中的吸收损耗较大。镱离子在 1018 nm 的吸收截面约为其在 1064 nm 吸收截面的 15 倍^[9], 因此 1018 nm 信号光在增益光纤中的吸收损耗远大于 1064 nm 等常见波长。2) 由于所用增益光纤模场面积较大, 注入信号光功率密度较低, 未能有效抑制 ASE。缩短光纤长度可有效降低信号光的吸收损耗, 同时降低了 ASE 获得的增益, 从而在一定程度上抑制自激振荡的产生。但光纤长度的缩短将导致可吸收的抽运光功率降低, 使 1018 nm 信号光不能被充分放大。通过测试不同光纤长度时放大器的输出特性, 得出增益光纤的最优长度为 1.2 m。在光纤长度最优、主放注入抽运功率为 18 W 时, 获得了 4.2 W 的 1018 nm 激光输出, 此时的光谱如图 5 所示。从光谱中可看出, 未吸收的抽运光已被充分滤除。输出光中仍存在 ASE, 但其强度低于 1018 nm 激光约 30 dB, 因此在输出功率中所占比重

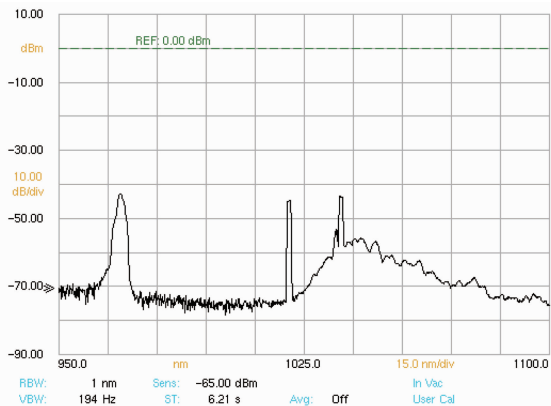


图 4 主放增益光纤长度为 2 m 时的输出光谱
Fig. 4 Output spectrum of amplifier 2 with 2 m YDF

可忽略。放大器的输出功率随注入抽运功率变化曲线如图 6 所示。放大器的总体斜率效率为 27%, 远低于 1064 nm 光纤放大器的斜率效率。除吸收损耗较大和 ASE 较严重外, 抽运光的不充分吸收也是造成放大器效率偏低的重要原因。由于增益光纤长度较短, 且抽运源中心波长偏离增益光纤吸收峰值波长, 注入的抽运光仍有一部分未被吸收。因此放大器的实际斜率效率应高于 27%。

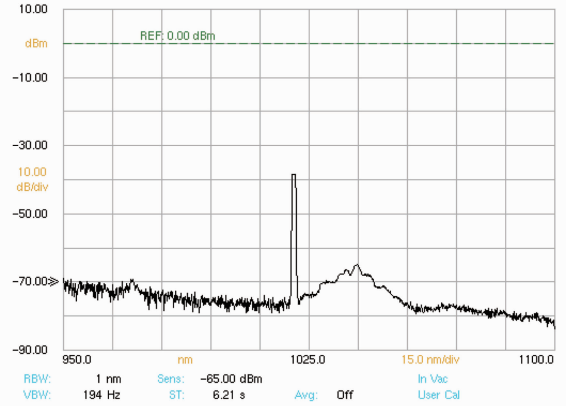


图 5 主放输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of amplifier 2

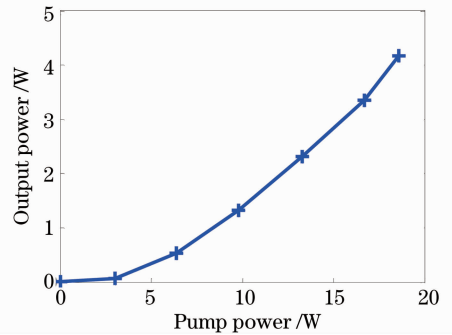


图 6 主放输出功率曲线

Fig. 6 Output power curve of amplifier 2

3 同带抽运实验

3.1 单包层光纤同带抽运放大器

单包层同带抽运放大器结构如图 7 所示。经一级预放的 1018 nm 激光和 1070 nm 种子光经一个

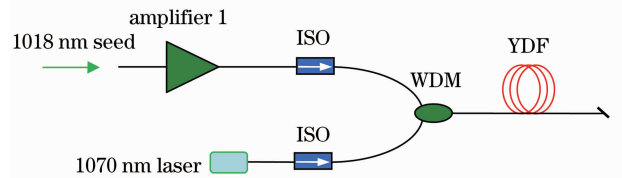


图 7 单包层同带抽运放大器结构图

Fig. 7 Experimental setup of tandem pumping fiber amplifier

1018 nm/1070 nm WDM 注入增益光纤。所使用的增益光纤型号与 1018 nm 种子预放级增益光纤相同。放大器输出光纤端面研磨成 8°斜角以抑制自激振荡。

由于普通掺镱光纤在 1018 nm 附近的吸收系数较低,为确保 1018 nm 抽运光被充分吸收,对增益光纤长度进行了优化。当增益光纤长度为 8.5 m 时,可获得最高的信号光功率输出。此时放大器的输出特性如图 8,9 所示。当 1018 nm 激光的最大注入功率为 447 mW 时,获得了 287 mW 的 1064 nm

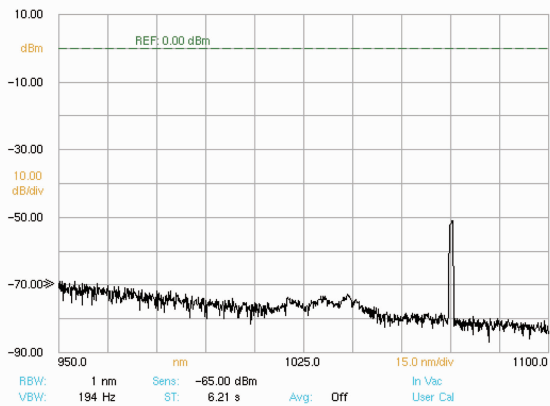


图 8 增益光纤为 8.5 m 时放大器输出光谱

Fig. 8 Spectrum of the amplifier with 8.5 m gain fiber

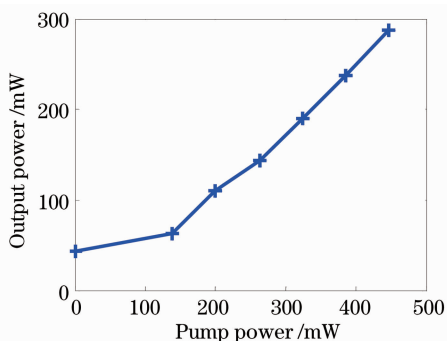


图 9 放大器输出功率随抽运功率的变化

Fig. 9 Output power versus pump power

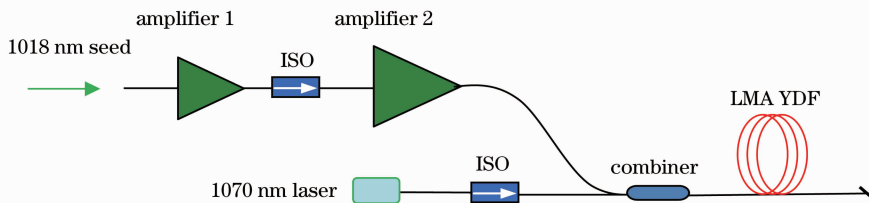


图 10 包层同带抽运实验结构示意图

Fig. 10 Experimental setup of cladding tandem pumping

激光输出,光-光转换效率为 64%,斜率效率为 77%。在阈值之上,信号光功率与抽运光功率呈良好线性关系。若进一步提高抽运光功率,放大器有望获得更高功率输出。

3.2 双包层光纤同带抽运实验

双包层光纤同带抽运实验结构图如图 10 所示。将两级级联放大后的 1018 nm 激光和 1070 nm 信号光分别经合束器的抽运臂和信号臂进入掺镱光纤的纤芯和包层。所用增益光纤与 1018 nm 主放增益光纤相同,最优长度为 5.5 m。光纤的输出端进行了 8°斜角处理。当未加信号光时,将 4.2 W 的 1018 nm 激光注入增益光纤,放大器的输出功率为 280 mW,表明 1018 nm 激光大部分已经被吸收。将信号光和抽运光同时注入,放大器在最大输出功率时的光谱如图 11 所示,此时 1070 nm 信号光强度比 1018 nm 抽运光强度高 10 dB。放大器输出功率曲线如图 12 所示,放大器的最大输出功率为 0.86 W,功率转换效率为 20.5%,斜率效率约 30%。经分析,镱离子掺杂浓度过高对信号光产生较强的吸收是导致效率偏低的重要原因。但仅依靠降低镱离子浓度并不能有效提高转换效率。镱离子在 1018 nm 的吸收截面远小于其在 976 nm 对应的吸收截面。掺杂浓度降低将导致 1018 nm 激光不能被充分吸收。而当光纤长度过长时,将在 1030~1050 nm 波段范围内产生强烈的 ASE,从而影响信号光的放大效果。通过理论计算寻找合理的掺杂浓度和纤芯尺寸、光纤长度等将是下一步必须考虑的问题。此外,从图 11 可以推断,有相当一部份 1018 nm 激光被吸收后转换成了 ASE。考虑到增益光纤模场面积较大,注入的信号光功率密度过低可能是 ASE 较强的原因。增加注入信号光功率或许能有效抑制 ASE,提高光-光转换效率。

4 结 论

搭建了 1018 nm 光纤激光器,利用 976 nm 抽

运源对其进行了两级级联放大,获得了 4.2 W 的最大输出功率,斜率效率为 27%。分别进行了低功率

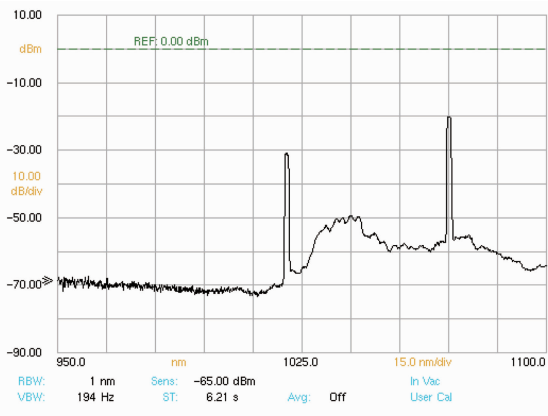


图 11 包层同带抽运时的输出光谱

Fig. 11 Spectrum of cladding tandem pumped fiber amplifier

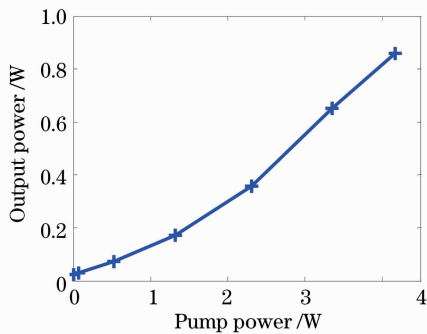


图 12 信号光的包层同带抽运放大

Fig. 12 Amplification of input signal with cladding tandem pumping scheme

单包层和高功率双包层光纤同带抽运实验。在单包层同带抽运实验中,当 1018 nm 激光的最大注入功率为 447 mW 时,获得了 287 mW 的 1064 nm 激光输出,光-光转换效率为 64%,斜率效率为 77%。利用国产大模场掺镱光纤进行了双包层光纤同带抽运的初步实验研究,获得了 0.86 W 的信号光放大

输出,但功率转换效率较低,仅为 20.5%。分析结果表明,提升信号光强度、改善增益光纤参数有望提高转换效率。本文的实验结果对获得高功率 1018 nm 激光和进行光纤激光高功率同带抽运研究可提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer *et al.*. 500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8): 645~647
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 3 J. Limpert, Fabian Röser, S. Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 537~545
- 4 NukW; Kilowatt Laser Amplifier Platform [EB/OL]. <http://www.nufern.com/kilowatt-amp.php>
- 5 R. Horley, S. Norman, M. N. Zervas. Progress and development in fibre laser technology [C]. *SPIE*, 2007, **6738**: 67380K
- 6 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhang Haibo *et al.*. Recent progress of large core fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2235~2241
- 楼祺洪,周 军,张海波等. 大芯径光纤激光器的新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2235~2241
- 7 楼祺洪,周 军,薛宇豪等. 1.75 kW 国产掺镱双包层光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1227
- 8 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): B63~B92
- 9 N. A. Brilliant, Kalliroi Lagonik. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1669~1671
- 10 J. Hecht. Photonic frontiers: Fiber Lasers; Fiber Lasers Ramp Up the Power [EB/OL]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/12/photonic-frontiers-fiber-lasers-ramp-up-the-power.html>, 2009
- 11 E. Stiles. New developments in IPG fiber laser technology [C]. Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009
- 12 Zhen Li, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Diode-pumped 1018-nm ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 091401

栏目编辑:宋梅梅