

# 双向分布式侧面抽运单模光纤放大器的实验研究

余宇 黄值河 曹润秋\* 潘志勇 郭少锋 许晓军 陈金宝

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 基于国产分布式侧面耦合包层抽运(DSCCP)掺镱光纤,建立了一个全光纤、最高输出功率为 106.7 W 的光纤放大器,并对光纤放大器在前向、后向及双向抽运方案下的输出特性进行研究。研究表明,DSCCP 光纤适用于采用双向抽运方案的光纤激光器系统。通过对比发现,双向抽运方案下放大器的斜率效率低于单向抽运方案下放大器的斜率效率。

**关键词** 光纤光学; 高功率放大器; 掺镱光纤; 双向抽运

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.070602

## Experimental Study on Bidirectional Distributed Side-Pumped Single Mode Optical Fiber Amplifiers

Yu Yu Huang Zhihe Cao Jianqiu Pan Zhiyong Guo Shaofeng Xu Xiaojun Chen Jinbao

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** An all-fiber optical fiber amplifier with the maximum power output of 106.7 W is established based on a home-made distributed side-coupled cladding-pumped (DSCCP) Yb-doped fiber. The output characteristics of the three pumping schemes (i. e., forward, backward and bidirectional pumping schemes) are also investigated. It shows that the DSCCP fiber is applicable to the fiber laser systems with bidirectional pumping scheme. By comparing the performances of the three pumping schemes, it is found that the slope efficiency of the bidirectional pumping scheme is lower than those of the forward and backward pumping schemes.

**Key words** fiber optics; high power amplifiers; ytterbium doped fiber; bidirectional pumping

**OCIS codes** 060.2320; 140.3510; 140.3615

## 1 引言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量优良等优势,在光纤传感、工业加工和国防军事等方面具有广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在过去的十多年里,随着双包层光纤的出现以及包层抽运技术的快速发展,光纤激光器的输出功率得到了极大的提升。尤其是主振荡器功率放大(MOPA)结构的提出,对于光纤激光器的功率提升具有重要的意义。2010年,美国 IPG 公司正是基于这一结构实现了 10 kW 的高功率高亮度的激光输出<sup>[3]</sup>。国产的光纤激光器也已经突破了千瓦量级<sup>[4]</sup>。对于端面抽运光纤激光器,通常有 3 种抽运方式,分别是前向抽运、后向抽运及双向抽运。研究表明后向抽运比前向抽运更有利于信号光的放大。而且,一般来说,双向抽运方案中,由于抽运光可以从增益光纤的 2 个端面同时注入,对于信号光的放大应该是最有利的。但是在相关的报道中,光纤放大器采用的基本都是前向抽运的方式,很少见到后向抽运及双向抽运的相关报道。之所以出现这种情况,与进行端面抽运时必须用到  $(N+1) \times 1$  合束器有关。由于结构的限制,使用

**收稿日期:** 2016-02-04; **收到修改稿日期:** 2016-03-01; **网络出版日期:** 2016-06-25

**作者简介:** 余宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。E-mail: yuyu\_nudt@126.com

**导师简介:** 郭少锋(1973—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: guosf2002@hotmail.com

\* 通信联系人。E-mail: jq\_cao@126.com

$(N+1)\times 1$ 合束器进行后向抽运注入,会造成较大的损耗,并可能由此引发严重的热损伤,这对光纤放大器的安全造成极大的影响<sup>[5-8]</sup>。

幸运的是,一种新型光纤的出现完美地解决了这一问题。在该光纤中,抽运光和信号光分别在各自独立的纤芯中传播,抽运光通过端面注入到抽运光纤中,并在传播的过程中以倏逝波的形式耦合到信号光纤中。与传统的双包层光纤相比,该光纤中抽运光和信号光具有各自独立的传输通道。因此,基于该光纤建立的放大器可以不使用 $(N+1)\times 1$ 合束器,这也就避免了使用 $(N+1)\times 1$ 合束器带来的各种问题。基于倏逝波耦合的侧面抽运方案最早出现在钇铝石榴石(YAG)激光器中<sup>[9]</sup>。之后,一些研究机构基于这一抽运方式设计和生产了一些光纤,并进行了相关的研究。他们分别称之为 GTWave 光纤<sup>[10]</sup>、多包层(multi cladding)光纤<sup>[11]</sup>、多元内包层(MFC)光纤<sup>[12]</sup>。国内也对该光纤进行了介绍<sup>[13]</sup>。考虑到该光纤抽运过程的特点,我们将其称之为分布式侧面耦合包层抽运(DSCCP)光纤<sup>[14-17]</sup>。与传统的双包层光纤激光器相比,DSCCP 光纤激光器在热管理、功率拓展以及剩余抽运光处理方面具有较大的优势。

目前,千瓦级 DSCCP 光纤激光器已有报道<sup>[18]</sup>,但是,相关报道多采用大模场光纤(纤芯直径 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ )作为增益光纤,抽运方式多采用单向抽运。相比之下,纤芯较小(直径小于 $15\ \mu\text{m}$ )的增益光纤有利于激光器的模式控制。同时,采用双向抽运方案也可以充分利用 DSCCP 光纤功率拓展的优势。因此,本文利用纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的 DSCCP 单模增益光纤建立了光纤放大器,并对该放大器的输出特性进行了实验研究,获得了最高输出功率 $106.7\ \text{W}$ 的单模激光输出,斜率效率约为 $51\%$ 。

## 2 实验研究

该光纤放大器采用 MOPA 结构。其结构如图 1 所示。种子光经隔离器后注入放大器,放大器采用双向抽运方式,抽运光从 DSCCP 掺镱光纤(YDF)抽运光纤的两端注入。种子光由输出波长为 $1064.5\ \text{nm}$ 的振荡器提供。该振荡器采用功率为 $25\ \text{W}$ 的半导体激光器(LD)作为抽运源。增益光纤为 $10/125\ \mu\text{m}$ (纤芯/包层直径)的掺镱光纤,长度约为 $6\ \text{m}$ ,吸收系数约为 $3.5\ \text{dB/m}$ ,输出光谱 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $0.2\ \text{nm}$ 。隔离器的输入输出光纤均为 $10/125\ \mu\text{m}$ 的光纤。振荡器的输出功率设定为 $10\ \text{W}$ 。与传统采用大模场光纤搭建的放大器不同,该放大器中抽运光与信号光分别注入。因为所采用的抽运合束器没有信号光纤,所以不会像传统 $(N+1)\times 1$ 合束器一样存在对信号光的损耗,进而不会影响放大器的输出特性。

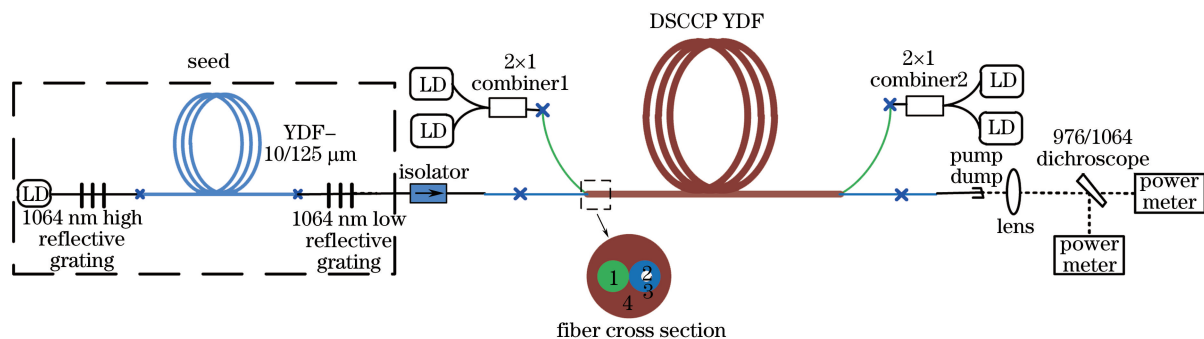


图 1 两端侧面抽运光纤放大器结构图

Fig. 1 Schematic of bidirectional side-pumped fiber amplifier

放大器采用国产 $10/125\sim 125\ \mu\text{m}$ 的 DSCCP 掺镱光纤作为增益光纤,其截面如图 1 中所示。抽运光纤与信号光纤外包层直径均为 $125\ \mu\text{m}$ ,数值孔径(NA)均为 $0.46$ 。该放大器的抽运源由 4 个 LD 组成。前向抽运源由 2 个 $60\ \text{W}$ 的非稳波长(NWS)LD 组成,后向抽运源由 2 个 $50\ \text{W}$ 的稳波长(WS)LD 组成,其功率和光谱如图 2 所示。LD 输出光纤的 NA 均为 $0.15$ 。抽运光通过一个输入和输出 NA 分别为 $0.15$ 和 $0.22$ 的 $2\times 1$ 的合束器合束后注入到 $105/125\ \mu\text{m}$ 的抽运光纤中,前后向抽运光经合束器后的输出功率分别为 $120\ \text{W}$ 和 $90\ \text{W}$ 。振荡器中的信号光经放大器放大后再经抽运倾斜后以斜角 $8^\circ$ 输出。经准直透镜准直后,利用 $976/1064\ \text{nm}$ 的二色镜将信号光纤输出的抽运光和信号光分离并分别测量。

为了研究抽运方式及抽运源输出特性对放大器的影响,分别对只采用前向抽运、只采用后向抽运和采

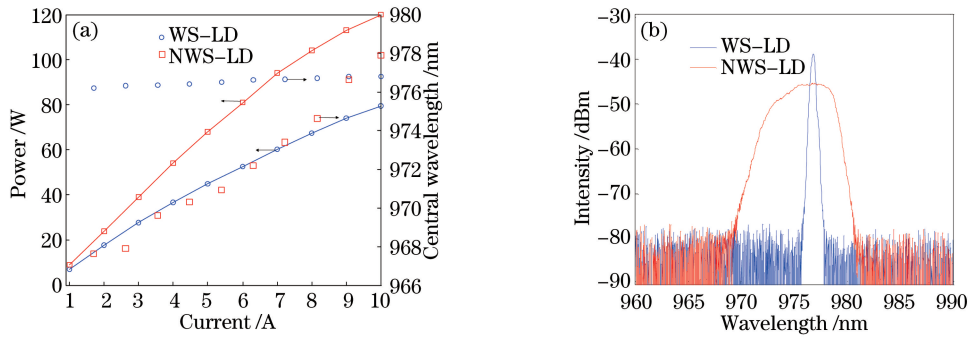


图 2 抽运 LD(a)功率及中心波长随电流变化曲线和(b)光谱特性

Fig. 2 (a) Output power and central wavelength versus current and (b) spectrum of pump LDs

用双向抽运的情况进行了研究。

首先研究了前向抽运情况下放大器的输出特性,其结果如图 3 所示。实验中测得放大器信号光纤中输出光经二色镜后的信号光  $S_T$  最大输出功率为 71.5 W,整体斜率效率为 53%;残余抽运光  $S_R$  的输出功率为 2.2 W,斜率效率为 1.7%;抽运光纤中残余的抽运光 P 的输出功率为 10.6 W,斜率效率为 8.9%。从图 3 中可以看到,随着抽运光功率的增加,信号光的生长速度越来越快。这主要是因为抽运光的中心波长随着功率增加向  $Yb^{3+}$  吸收截面峰值处漂移所致<sup>[19]</sup>。在实验过程中,放大器的斜率效率并没有出现下降趋势,说明限制放大器功率提升的主要因素是抽运功率不足,如果继续增加抽运功率,输出信号光功率还可以进一步提升。同时还发现,抽运光纤中抽运光残余较多,说明光纤长度可以进一步优化。

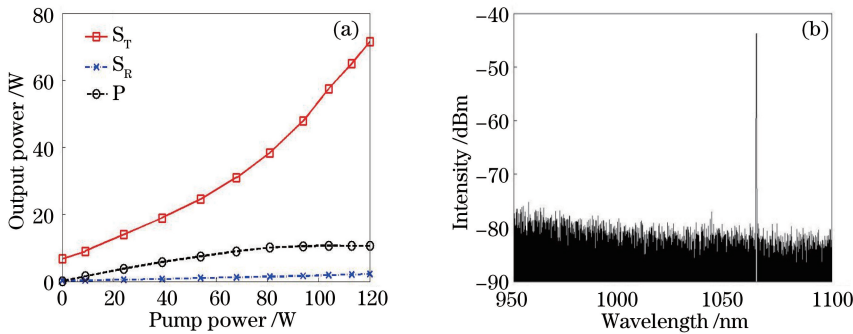


图 3 前向抽运光纤放大器(a)功率变化曲线及(b)输出光谱

Fig. 3 (a) Output power versus pump power and (b) output spectrum of fiber amplifier with forward pumping scheme

对采用后向抽运方案的放大器输出特性进行了研究。此时作为抽运源的是 2 个 50 W 的稳波长 LD。实验中得到的放大器功率曲线如图 4 所示。从图中可以看出,经二色镜后,信号光  $S_T$  输出功率为 56.8 W,斜率效率为 59%;剩余抽运光  $S_R$  的输出功率为 2.4 W,斜率效率为 2.1%;抽运光纤中抽运光 P 的输出功率剩余 7.2 W,斜率效率为 7.3%。实验表明,后向抽运方案对应的斜率效率比前向抽运略高,剩余抽运光比例也

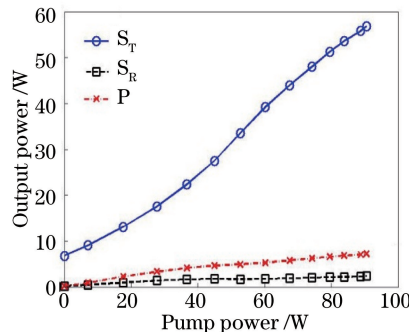


图 4 后向抽运光纤放大器功率变化曲线

Fig. 4 Output power versus pump power of fiber amplifier with backward pumping scheme

比前向抽运小,信号光增长的线性度也比前向抽运好。这主要是因为该方案中采用的抽运源的波长稳定在  $\text{Yb}^{3+}$  离子吸收截面峰值附近,且谱宽较窄,抽运光的吸收效果好,如图 3(b)所示。

对双向抽运 DSCCP 光纤放大器进行了研究。此时,DSCCP 光纤的抽运纤两端分别与 2 个合束器相熔接,抽运光纤中剩余的抽运光可能会对合束器的安全造成影响(通常厂家标明合束器承受的反向光功率为 10 W)。为了解决这一问题,在实验设计时特意使合束器输出 NA(0.22)小于抽运光纤的 NA(0.46),这样剩余的抽运光将有大半被损耗掉,从而有效地保证合束器正常运行。此时,实验中前向和后向抽运源采用串联的电源供电,实际后向的最大抽运注入功率为 80 W,因此总的抽运功率最大为 200 W。种子光功率保持 10 W 不变,其他部分也维持不变。双向抽运光纤放大器的输出功率和光谱如图 5 所示。

此时经二色镜后的信号光  $S_T$  最大输出功率为 106.7 W,斜率效率为 51.3%,剩余抽运光  $S_R$  的输出功率为 3 W,斜率效率为 1.46%。此时放大器的斜率效率比前向抽运的斜率效率(53%)和后向抽运的斜率效率(59%)都要低。这可能是由于光纤长度不够导致抽运光未能被充分吸收,其相关物理机制还有待进一步研究。从图 5 中看到,最终输出功率曲线并没有出现下降趋势;从输出光谱中也可以看出,抽运光基本上已经被倾斜和反射掉,且并未出现受激拉曼散射效应。这说明该放大器的输出功率受限于抽运光功率,若增加抽运光功率,该放大器的功率水平有望得到进一步的提升。

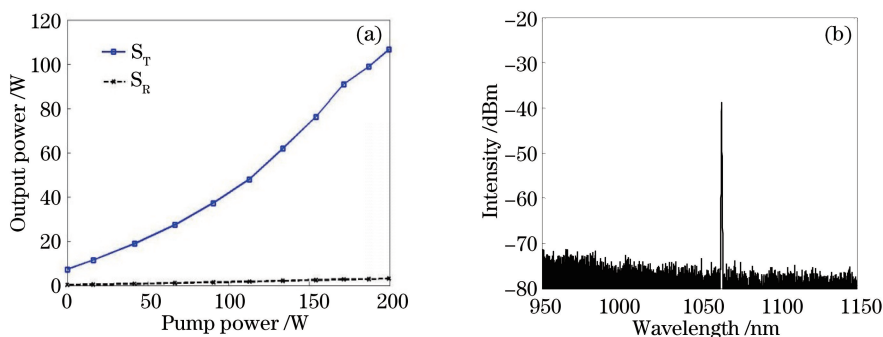


图 5 双向抽运光纤放大器(a) 功率变化曲线及(b) 输出光谱

Fig. 5 (a) Output power versus pump power and (b) output spectrum of fiber amplifier with bidirectional pumping scheme

### 3 结 论

对利用国产 DSCCP 光纤搭建的全光纤放大器的输出特性进行了研究。获得了最高输出功率为 106.7 W 的单模激光输出,斜率效率约为 51%。研究了抽运源输出特性对放大器性能的影响。研究表明,采用稳波长 LD 进行抽运时放大器斜率效率更高,这是由于稳波长 LD 的输出光波长稳定在  $\text{Yb}^{3+}$  离子吸收截面峰值附近所致;双向抽运方案下光纤放大器的斜率效率低于单向抽运方案下的斜率效率,这是由于抽运光吸收饱和和所引起的。事实上,由于光纤长度不够长,抽运光纤中仍存在一定数量的抽运光,其具体物理机制有待进一步研究。此外,本文实验中 3 种抽运方式得到的放大器的斜率效率均小于 60%,这主要是由于实验中使用的 DSCCP 光纤的损耗较大,通过优化光纤损耗,放大器的效率可以得到进一步的提升,相关实验结果对于 DSCCP 光纤以及基于该光纤的激光器的设计和优化具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Zervas M N, Codemard C. High power fiber lasers: A review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology [C]. Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- 刘泽金, 冷进勇, 郭少峰, 等. 全光纤准单模 2 kW 光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908003-6.
- Yan P, Yin S P, He J W, et al.. 1.1-kW ytterbium monolithic fiber laser with assembled end-pump scheme to couple

- high brightness single emitters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 697-699.
- 6 Huang L J, Wang W L, Leng J Y, *et al.*. Experimental investigation on evolution of the beam quality in a 2 kW high power fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 2633-2636.
- 7 Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, *et al.*. 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 508.
- 8 Schmidt O, Wirth C, Tsybin I, *et al.*. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1567-1569.
- 9 Howerton P H, Cordray D M. Diode pumping of a solid state laser using evanescent field fiber optic coupling: A proposed technique[J]. Applied Optics, 1991, 30(15): 1911-1915.
- 10 Grudinin A B, Turner P W. Low noise, intelligent cladding pumped L-band EDFA [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(7): 909-911.
- 11 Gapontsev V P, Fomin V, Platonov N. Powerful fiber laser system: US7593435[P]. 2009-09-22.
- 12 Mel'kumov M A, Bufetov I A, Bubnov M M, *et al.*. Pump radiation distribution in multi-element first cladding laser fibres[J]. Quantum Electronics, 2005, 35(11): 996-1002.
- 13 Zhao Baoyin, Duan Kailiang, Zhao Wei, *et al.*. High-power fiber laser amplifiers based on a new pump-coupling technology[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702014.  
赵保银, 段开棕, 赵 卫, 等. 基于一种新型抽运耦合技术的光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702014.
- 14 Huang Z H, Cao J Q, Guo S F, *et al.*. Home-made high efficiency side-pumped fiber amplifiers[J]. SPIE, 2015, 9255: 9250O.
- 15 Huang Z H, Cao J Q, Guo S F, *et al.*. Comparison of fiber lasers based on distributed side-coupled cladding-pumped fibers and double-cladding fibers[J]. Applied Optics, 2014, 53(10): 2187-2195.
- 16 Huang Z H, Cao J Q, Guo S F, *et al.*. The characteristics of pump light in side-coupled cladding-pumped fibers[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(4): 293-297.
- 17 Huang Zhihe, Cao Jianqiu, Guo Shaofeng, *et al.*. Simulation of the distributed side-coupled cladding-pumped fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040605.  
黄值河, 曹涧秋, 郭少锋, 等. 分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040605.
- 18 Chen Jinbao, Cao Jianqiu, Pan Zhiyong, *et al.*. Output power of home-made distributed side-coupled fiber laser realize kilowatt[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0219002.  
陈金宝, 曹涧秋, 潘志勇, 等. 全国产分布式侧面抽运光纤激光器实现千瓦输出[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0219002.
- 19 Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(7): 1049-1056.