

# 基于光纤拉曼放大的级联式全光纤 1020 nm 光源

许将明 冷进勇 侯 静 吴武明 肖 虎 周 朴

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 设计并制作了输出功率为 196 mW 的级联式全光纤 1020 nm 光源。该光源采用光纤拉曼放大器与掺镱光纤放大器级联的放大方案, 实现了对低功率 1020 nm 种子光的放大。在光纤拉曼放大级, 采用了 3 段不同长度的拉曼增益光纤进行了对比实验, 比较了一定信号光功率和抽运光功率下拉曼增益光纤长度对光纤拉曼放大级输出功率的影响; 测量了拉曼增益光纤长度为 3150 m 时光纤拉曼放大级输出光的光谱特性。研究了掺镱光纤放大级输出光的光谱特性和功率特性。实验得到的 1020 nm 光源为研究 1064 nm 光纤激光器同带抽运特性提供了抽运源。同时, 该 1020 nm 光源所采用的基于光纤拉曼放大的级联式全光纤放大方案还可用于其他特殊波段低功率种子光的放大。

**关键词** 光纤放大器; 拉曼放大; 级联; 同带抽运; 光源

**中图分类号** TN212; TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0806001

## Cascaded All-Fiber 1020 nm Light Source Based on Fiber Raman Amplification

Xu Jiangming Leng Jinyong Hou Jing Wu Wuming Xiao Hu Zhou Pu

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

**Abstract** Cascaded all-fiber 1020 nm light source with 196 mW output power is designed and demonstrated. This light source can realize the amplification of low-power 1020 nm seed light with a cascaded amplifier. The cascaded amplifier is composed of fiber Raman amplifier and Yb<sup>3+</sup>-doped single-mode fiber amplifiers. At the stage of fiber Raman amplification, comparing experiments with three different Raman gain fiber lengths are performed to study the influence of fiber length on the output power at fixed seed power and pump power, and the spectrum of output light with 3150 m Raman gain fiber is measured. The spectrum and power characteristics of output light of Yb<sup>3+</sup>-doped single-mode fiber amplifiers are studied. This 1020 nm light source provides pump source for the study of the tandem pumping of 1064 nm fiber laser. And this cascaded all-fiber amplification solution based on fiber Raman amplification can be used to amplify other special seed light at low power.

**Key words** fiber amplifier; Raman amplification; cascade; tandem pumping; light source

**OCIS codes** 060.2320; 140.4480; 190.5650

## 1 引 言

传统的用 976 nm 半导体激光器抽运的 1064 nm 激光器和放大器在高功率时存在严重的热效应和非线性效应等弊端, 容易引起光纤外包层的破坏或老

化, 对放大效果存在严重影响<sup>[1,2]</sup>。且现有的 976 nm 半导体抽运源亮度有限, 继续提高较为困难<sup>[3]</sup>。而利用 1020 nm 光纤激光器作为抽运源对 1064 nm 激光进行同带抽运可大幅提高抽运源亮度, 提高抽运光吸

**收稿日期**: 2010-12-31; **收到修改稿日期**: 2011-03-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077076, 61007037, 10904173, 11004247)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-142)资助课题。

**作者简介**: 许将明(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: xu\_jiang\_ming@yahoo.com.cn

**导师简介**: 侯 静(1975—), 女, 研究员, 主要从事光纤激光相干合成技术、光纤激光器及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com(通信联系人)

收率,降低量子亏损带来的热效应,从而减小增益光纤中的热负荷和非线性效应对放大结果的影响,是解决高功率光纤激光器、放大器的热效应和非线性效应的有效途径之一<sup>[3~5]</sup>。2009年报道的10 kW量级的单模光纤激光器,就采用了同带抽运方式<sup>[5]</sup>。该光纤激光器抽运光由激光二极管抽运的1018 nm掺镱光纤激光器产生,发射波长为1070 nm,量子亏损小于5%,约为直接用半导体抽运源进行抽运的掺镱光纤激光器的一半。此外,尽管理论上可以直接利用半导体抽运源达到10 kW输出功率,但是受限于抽运源亮度,到目前为止所有的3 kW及以上功率的双包层光纤激光器实际上都是同带抽运<sup>[3,5]</sup>。除了可用于对1064 nm激光的同带抽运放大,1020 nm光源还可用于通过非线性差频方法产生太赫兹波<sup>[6]</sup>。因此,对1020 nm光源的研究具有重大意义。

由于掺镱光纤增益带为1030~1080 nm,因此可利用掺镱光纤放大器获得该波长范围内的高功率激光输出;利用掺铒光纤放大器可输出1.5~1.6  $\mu\text{m}$ 范围内的人眼安全波段激光;利用790 nm半导体二极管作为抽运源抽运掺铒光纤放大器可输出1.8~2.2  $\mu\text{m}$ 范围内的激光。此外,通过铒镱共掺和铒镱共掺可以使915,940和980 nm激光二极管作为更多波长的光纤激光器的抽运源<sup>[7]</sup>。使用不同稀土掺杂光纤可获得不同波段的激光输出;功率方面,以掺镱光纤激光器的输出功率提升最为迅速。近年来,随着大模场双包层掺镱光纤制造工艺和高亮度半导体二极管抽运技术的发展,单根双包层掺镱光纤激光器的输出功率不断提升。国内高功率光纤激光器研究起步相对较晚,但近年来也取得了突破性进展,中国科学院上海光学精密机械研究所、清华大学、华北光电技术研究所、中国兵器装备研究院和西安光机所等多家单位先后成功实现千瓦级输出<sup>[8~13]</sup>。在国外,2009年6月IPG公司推出了输出功率达10 kW的单模光纤激光器<sup>[14]</sup>;该公司的多模连续光纤激光器输出功率可达50 kW,电光效率高于25%<sup>[15]</sup>。在IPG公司的10 kW单模光纤激光器中,使用了45个输出功率为300 W的1018 nm光纤激光器作为抽运源,但由于商业机密等原因,该公司未公布1018 nm光纤激光器的技术细节。总的来说,关于1020 nm光源的公开报道较少。1995年Pask等<sup>[16]</sup>利用掺镱光纤的发射带覆盖了0.97~1.2  $\mu\text{m}$ 的特性,制作了一个1~1.2  $\mu\text{m}$ 范围内通用的掺镱光纤激光器,工作波长为1020 nm时输出功率为240 mW,相对于抽运光的斜率效率约为60%。

1997年Erbert等<sup>[17]</sup>制作了InGaAs/InGaP/AlGaAs半导体激光器,在40  $^{\circ}\text{C}$ 时能稳定地输出100 mW功率。1998年Beister等<sup>[18]</sup>制作的高可靠性的InGaAs/GaAs/AlGaAs脊形波导管半导体激光器,在40  $^{\circ}\text{C}$ 时能稳定地输出300 mW功率,70  $^{\circ}\text{C}$ 时能稳定地输出250 mW功率。但国内尚未见相关报道。

本文采用光纤拉曼放大与掺镱光纤放大级联的方案得到百毫瓦量级全光纤1020 nm光源。实验中比较了一定种子光功率和抽运光功率条件下拉曼增益光纤长度对光纤拉曼放大器放大结果的影响,测量了拉曼增益光纤长度为3150 m时光纤拉曼放大器输出光的光谱特性,研究了掺镱光纤放大器输出光的功率特性和光谱特性,验证了所得到的1020 nm光源用于同带抽运研究的可行性。

## 2 实验装置和结果

### 2.1 种子源

种子源为自行搭建的1020 nm光纤激光器,结构如图1所示。种子激光器采用线形腔结构。谐振腔由高反射率的光纤布拉格光栅(FBG,对1020 nm反射率大于99%)和2 $\times$ 2的3 dB耦合器构成,再利用波分复用器(WDM)将输出功率400 mW、中心波长976 nm的抽运光耦合进增益光纤。增益光纤为Nufern公司生产的单包层高掺杂单模光纤,纤芯和包层尺寸分别为6  $\mu\text{m}$ 和125  $\mu\text{m}$ ,长度约为1.5 m。由于实验室暂无976 nm/1020 nm的WDM,实验时

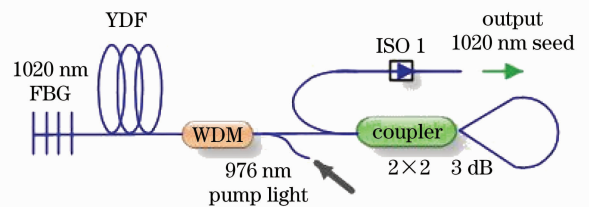


图1 1020 nm光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the 1020 nm fiber laser

使用的是976 nm/1064 nm的WDM,对1020 nm种子光损耗较大。种子激光器输出光经光纤隔离器(ISO)1后功率为4.5 mW,其光谱如图2所示。

### 2.2 光纤拉曼放大器

如直接利用掺镱光纤放大器对低功率1020 nm种子光进行放大,放大自发辐射(ASE)影响非常严重,难以获得放大效果。而光纤拉曼放大器是以光纤作为增益介质的放大器,具有增益高、ASE噪声低、频谱范围宽、分布式放大和温度稳定性好等优

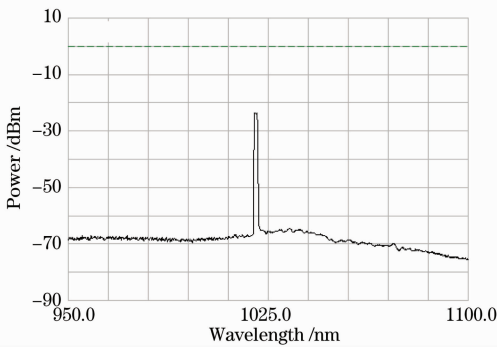


图 2 1020 nm 光纤激光器输出光光谱

Fig. 2 Spectrum of the output light of 1020 nm fiber laser

点<sup>[19,20]</sup>。且 1020 nm 目标波长在 976 nm 抽运源的拉曼增益范围内,理论上可以对低功率种子光进行放大。因此采用光纤拉曼放大器作为 1020 nm 光源的第一级放大器。实验装置如图 3 所示。

实验中拉曼增益光纤采用长飞公司生产的单模光纤 CS1060。光纤拉曼放大器采用反向抽运方式。由于单模半导体抽运源功率较低,实验中利用偏振合束器将两台单模半导体抽运源的抽运光偏振合束,得到了最大功率为 763 mW 的抽运光,然后利用 WDM 将合束后的抽运光耦合进拉曼增益光纤。在靠近光纤隔离器 1 的 WDM 端口处将未吸收的抽运光导出。

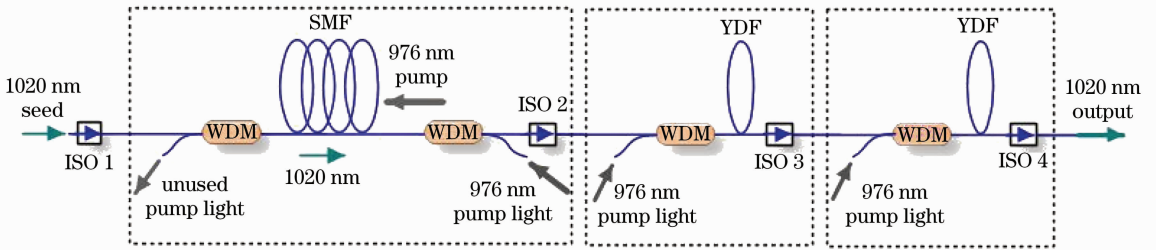


图 3 全光纤 1020 nm 光源实验结构示意图

Fig. 3 Experimental setup of the all-fiber 1020 nm light source

实验中首先对拉曼增益光纤长度分别为 1050, 2100 和 3150 m 时的放大结果进行了比较,并根据比较结果选择了光纤拉曼放大器工作时的拉曼增益光纤长度。在光纤隔离器 2 的尾端测得的不同拉曼增益光纤长度下放大器输出光功率与抽运光功率的变化曲线如图 4 所示。随着抽运光功率的增大,3 种拉曼增益光纤长度的光纤拉曼放大器的输出功率都有逐渐增大的趋势。当拉曼增益光纤长度为 1050 m 时,最大输出功率为 5.75 mW,光-光转换效率约为 0.16%;在长度为 2100 m 时放大器最大

输出功率为 14.75 mW,光-光转换效率约为 1.34%;在长度为 3150 m 时光纤拉曼放大器最大输出功率为 20.3 mW,光-光转换效率约为 2.07%。

在图 4 中,当抽运光功率较低时,较长的拉曼增益光纤对应的输出光功率反而较低。这是由于在抽运光功率较低时,拉曼增益较小,甚至未达到拉曼阈值,无拉曼放大现象,此时损耗对放大器的输出功率影响较大,占主要作用。而光纤长度越长,损耗越大,所以在低抽运光功率时较长的拉曼增益光纤对应的输出光功率较低。3 个不同拉曼增益光纤长度的放大器都有一个输出功率小于种子光功率的区域,这时放大器中增益小于损耗,1020 nm 种子光功率未增大。

通过对比实验可以发现,在种子光功率为 4.5 mW 和最大抽运光功率为 763 mW 的条件下,使用 3150 m 拉曼增益光纤可得到较大的输出功率。为了给下一级掺镱光纤放大提供稳定的种子光,实验中还对比拉曼增益光纤长度为 3150 m 时光纤拉曼放大器的输出光光谱进行了观察。图 5 为抽运光功率为 672 mW 时放大器的输出光光谱,输出光中含有少量抽运光,约为 1020 nm 输出光的  $3.2 \times 10^{-4}$  倍 (35 dB),输出光质量较好。当抽运光功率增加到 696 mW 时,在 1050~1080 nm 范围内随机出现峰

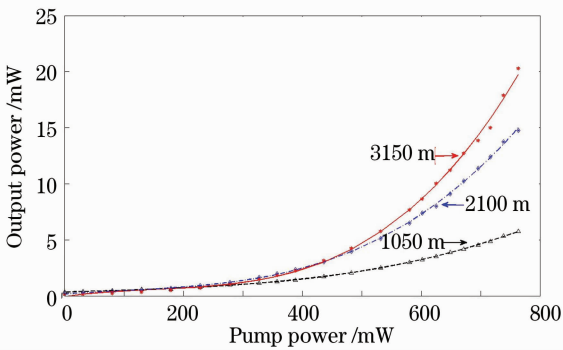


图 4 不同拉曼增益光纤长度时光纤拉曼放大器输出功率随抽运光功率的变化

Fig. 4 Output power of fiber Raman amplifier versus pump power at different Raman gain fiber lengths

值较低的毛刺,如图 6 所示。当抽运光功率达到 717 mW 时,光谱图中持续出现峰值较高的毛刺,出现位置具有一定的随机性。根据光谱图中毛刺出现的波长范围推测,当抽运光功率达到 696 mW 时观察到的是二级拉曼散射现象。

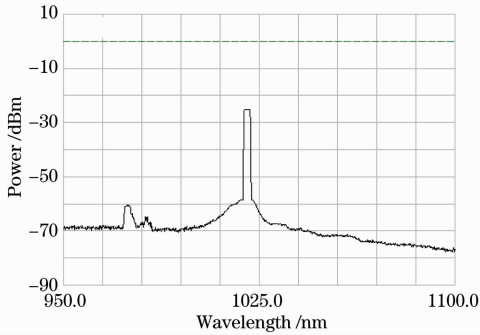


图 5 抽运功率为 672 mW 时的输出光光谱  
Fig. 5 Spectrum of the output light at 672 mW pump power

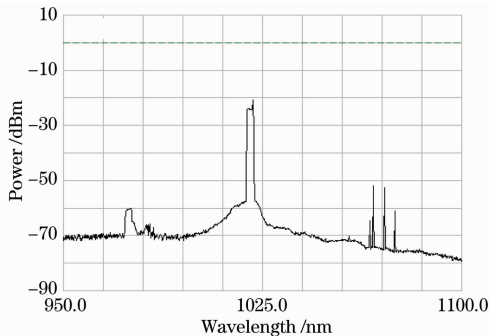


图 6 抽运功率为 696 mW 时的输出光光谱  
Fig. 6 Spectrum of the output light at 696 mW pump power

根据光纤拉曼放大器的输出特性,本级光纤拉曼放大器工作时取拉曼增益光纤长度为 3150 m,抽运光功率为 672 mW,输出功率为 12.72 mW。同时,考虑到本实验受 WDM 等光纤器件及抽运光功率的限制,实际上光纤拉曼放大器输出功率仍有进一步提升的空间。

### 2.3 单模掺镱光纤放大器

为了获得更高功率的 1020 nm 光源,需要进一步放大光纤拉曼放大器输出的种子光。由于光纤拉曼放大器对抽运源功率要求较高,实验中难以继续利用光纤拉曼放大方式提高 1020 nm 光源输出功率。而掺镱光纤放大器的增益带为 1030~1080 nm,在 1020 nm 波长可以获得一定的放大效果。根据第一级光纤拉曼放大器输出功率水平,实验中采用掺镱光纤放大器作为 1020 nm 光源的第二、三级放大器。

第一级光纤拉曼放大器输出光经光纤隔离器 2 输入到第二级掺镱光纤放大器进行放大。第二、三级的掺镱光纤放大器采用前向抽运方式,单模半导体激光器抽运源输出的抽运光经带通滤波器(BPF)后的最大功率分别为 478 mW 和 397 mW。抽运光经 WDM 耦合到增益光纤中。增益光纤为 Nufern 公司生产的单包层高掺杂单模光纤,纤芯和包层尺寸分别为 6  $\mu\text{m}$  和 125  $\mu\text{m}$ 。第二级放大器使用的光纤长度约为 1 m,第三级使用的光纤长度约为 1.5 m。第三级掺镱光纤放大器的输出光经光纤隔离器 4 输出。

在光纤隔离器 3,4 的尾端测得的第二、三级单模掺镱光纤放大器输出光功率与抽运光功率的变化曲线分别如图 7 和图 8 所示。第二级单模掺镱光纤放大器的最大输出功率为 72 mW,光-光转换效率为 12.4%。第三级单模掺镱光纤放大器的最大输出功率为 196 mW,光-光转换效率为 31.2%。

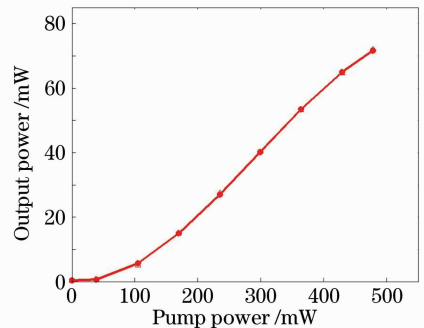


图 7 第二级单模掺镱光纤放大器的输出功率随抽运光功率的变化

Fig. 7 Output power of the second stage  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber amplifier versus pump power

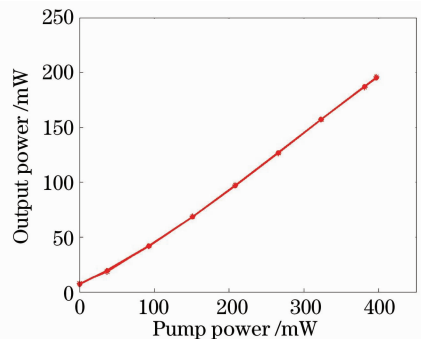


图 8 第三级单模掺镱光纤放大器的输出功率随抽运光功率的变化

Fig. 8 Output power of the third stage  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber amplifier versus pump power

通过观察光谱发现,第二级放大器的输出光质量较好,而在第三级放大器的输出光中可观察到较



弱的 ASE 光,如图 9 所示。但在第三级放大器的输出光中,信号光仍比 ASE 光大 30 dB 以上,所得到的 1020 nm 光源的输出光可用于研究 1064 nm 光纤激光器的同带抽运特性。

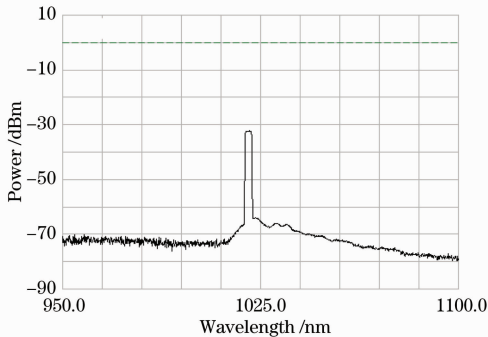


图 9 第三级单模掺镱光纤放大器输出光光谱

Fig. 9 Spectrum of the output light of the third stage  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber amplifier

### 3 结 论

设计并搭建了一个光纤拉曼放大器与单模掺镱光纤放大器级联的全光纤 1020 nm 放大器,实现了对低功率 1020 nm 种子激光器输出光的放大。全光纤结构提高了光源工作的稳定性。第一级放大器采用光纤拉曼放大的方式将功率较低的种子光放大至 12.72 mW;第二、三级放大器采用掺镱光纤放大器继续放大种子光,最终得到 196 mW 的放大光输出。实验中对拉曼放大级使用不同长度拉曼增益光纤时的放大结果进行了对比,进而选取了合理的拉曼增益光纤长度,得到了适合于单模掺镱光纤放大的种子功率。实验中还对比了拉曼增益光纤长度为 3150 m 时抽运光功率对输出光光谱的影响进行了研究,发现在一定的拉曼增益光纤长度和信号光功率条件下,抽运光功率存在一个最佳值,如继续提高抽运光功率可能导致光纤拉曼放大器中出现二级拉曼散射。对 196 mW 光源的光谱特性的研究表明,该光源可用于同带抽运的研究。这一采用光纤拉曼放大与掺镱光纤放大级联的方案得到百毫瓦量级全光纤 1020 nm 光源为研究 1064 nm 光纤激光器的同带抽运特性提供了抽运源。此外,采用的基于光纤拉曼放大的级联式全光纤放大方案还可用于其他特殊波段低功率种子光的放大。

### 参 考 文 献

1 Xiang Peng, Liang Dong. Temperature dependence of ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(1): 126~130

2 Nathan A. Brilliant, Kalliroi Lagonik. Thermal effects in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1669~1671

3 C. A. Codemard, J. Nilsson, J. K. Sahu. Tandem pumping of large-core double-clad ytterbium-doped fiber for control of excess gain[C]. *Advanced Solid State Photonics*, 2010, paper AWA3

4 J. D. Minelly, R. I. Laming, J. E. Townsend *et al.*. High gain fiber power amplifier tandem-pumped by a 3 W multistrip diode [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 1992, 32~33

5 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

6 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1349~1359

孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1349~1359

7 J. Nilsson, J. K. Sahu, Y. Jeong *et al.*. High power fiber lasers [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2005, paper OTuF1

8 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120

周 军, 楼祺洪, 朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120

9 Li Chen, Yan Ping, Chen Gang *et al.*. A continuous-wave 700 W fiber laser with China-made  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 738

李 晨, 闫 平, 陈 刚等. 采用国产掺镱双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700 W[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 738

10 Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi *et al.*. 1 kW high power fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6): 890

李 伟, 武子淳, 陈 曦等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1 kW[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(6): 890

11 Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen *et al.*. 1.2 kW high power fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(10): 930

赵 鸿, 周寿桓, 朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(10): 930

12 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao *et al.*. 1.75 kW fiber laser with China-made double-clad fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1277

楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1277

13 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. 1000 W All-Fiber Laser of Our Institute [OL]. [http://www.opt.ac.cn/xwzx/tpwx/200910/t20091026\\_2590079.html](http://www.opt.ac.cn/xwzx/tpwx/200910/t20091026_2590079.html)

中国科学院西安光学精密机械研究所. 我所全光纤激光器输出功率突破 1000 W [OL]. [http://www.opt.ac.cn/xwzx/tpwx/200910/t20091026\\_2590079.html](http://www.opt.ac.cn/xwzx/tpwx/200910/t20091026_2590079.html)

14 IPG Photonics. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [OL]. [http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR\\_Final\\_10kW\\_SM\\_laser.pdf](http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf)

15 IPG Photonics. YLR-HP Series [OL]. [http://www.ipgphotonics.com/apps\\_mat\\_multi\\_YLR.htm](http://www.ipgphotonics.com/apps_mat_multi_YLR.htm)

16 H. M. Pask, Robert J. Carman, David C. Hanna *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1~1.2  $\mu\text{m}$  region[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1995, **4**(1): 2~13

17 G. Erbert, G. Beister, F. Bugge *et al.*. Stable operation of InGaAs/InGaP/AlGaAs ( $\lambda = 1020 \text{ nm}$ ) laser diodes [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 778~779

18 G. Beister, F. Bugge, G. Erbert *et al.*. Monomode emission at

- 350 mW and high reliability with InGaAs/AlGaAs ( $\lambda=1020$  nm) ridge waveguide laser diodes[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(8): 778~779
- 19 Zhou Jun, Lou Qihong, Li Tiejun *et al.*. High power fiber lasers for fiber Raman amplification [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2002, **39**(8): 40~46
- 周 军, 楼祺洪, 李铁军 等. 用于光纤拉曼放大的高功率光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(8): 40~46
- 20 Ma Yonghong, Xie Shizhong. Optimal design algorithm for Bi-directional pumping fiber Raman amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 517~520
- 马永红, 谢世钟. 双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 517~520