

文章编号: 1001-3806(2016)03-0349-04

## 1120nm 窄线宽掺镱光纤激光器

刘晓娟, 魏功祥, 周柏君, 赵翔

(山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

**摘要:** 为了获得窄线宽、高功率、长波长(相对于 1030nm ~ 1080nm)的 1120nm 光纤激光器, 采用普通单模掺镱光纤和一对光纤布喇格光栅构建了该光纤激光器的谐振腔, 为保证抽运光的完全吸收和避免非线性效应, 对有源光纤的最佳长度进行了理论分析和实验验证。结果表明, 激光器的阈值抽运功率为 40mW、注入抽运功率为 265mW 时, 激光器输出信号光功率 35mW, 光光转换效率为 13.2%, 激光器中心波长为 1120.9nm, 输出激光的谱线宽度为 0.03nm。这种激光器的获得是因为采用了高反射率耦合输出光纤布喇格光栅、短谐振腔结构和低功率运转状态。该激光器可作为种子光注入光纤放大器。

**关键词:** 激光器; 1120nm 光纤激光器; 掺镱光纤激光器; 窄线宽; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TN248; TN253

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2016. 03. 010

## Ytterbium-doped fiber laser at 1120nm with narrow linewidth

LIU Xiaojuan, WEI Gongxiang, ZHOU Bojun, ZHAO Xiang

(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** In order to realize 1120nm ytterbium-doped fiber laser with narrow linewidth, high power level, long wavelength (compared with 1030nm ~ 1080nm), the resonator of fiber laser was composed of a normal single-mode Yb-doped fiber and a pair of fiber Bragg gratings (FBG). The theoretical-optimized active fiber length is used to ensure that pump light is entirely absorbed and nonlinear effect is suppressed. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that when laser threshold pump power is 40mW and the launched pump power is 265mW, laser output signal power is up to 35mW with optical-to-optical conversion efficiency of 13.2%, central wavelength of 1120.9nm, output light linewidth of 0.03nm. The performances of the laser contribute to high reflectivity output coupler FBG, short cavity and low power operation. The laser can be injected into fiber amplifiers.

**Key words:** lasers; 1120nm fiber laser; ytterbium-doped fiber laser; narrow linewidth; fiber Bragg grating

## 引言

掺镱光纤激光器具有光束质量好、输出功率高、结构简单、转换效率高等优点, 在材料加工、光谱分析、激光医疗等领域有着广泛的需求。近年来, 随着掺镱光纤制造工艺和高亮度激光二极管抽运技术的发展, 掺镱光纤激光器在高功率输出方面获得了极大的进步<sup>[1-2]</sup>。目前绝大部分掺镱光纤激光器输出波长集中于掺镱光纤的高增益区, 即 1040nm ~ 1100nm 附近。由于掺镱光纤激光器的发射带宽覆盖 970nm ~ 1200nm

非常宽的波段范围<sup>[3-9]</sup>, 将掺镱光纤激光器输出波长拓展至 1100nm 以上吸引了人们极大的研究兴趣。

波长为 1120nm 光纤激光器可以作为 1178nm 喇曼光纤激光器的抽运源, 在最近几年得到了研究人员的重视<sup>[7-9]</sup>。当前报道最多的方法是基于受激喇曼散射原理将 1070nm 激光频移至 1120nm。FENG 等人<sup>[8]</sup>于 2009 年实现了 153W 连续波 1120nm 喇曼光纤激光器。CODEMARD 等人<sup>[9]</sup>于 2010 年实现了 100W 包层抽运 1120nm 多模喇曼光纤激光器。目前, 喇曼频移法所获得 1120nm 激光线宽较宽(大于 25nm)。利用掺 Bi 光纤作为增益介质构建的光纤激光器也可实现 1120nm 激光输出<sup>[10]</sup>, 然而, 掺 Bi 光纤对抽运光具有较低的吸收系数, 通常采用相对较长的光纤以保证抽运光的充分吸收, 当抽运功率增大时, 光纤中的非线性效应和寄生振荡将阻碍激光功率的增长, 同时引起激光线宽的增大。掺镱光纤激光器可直接实现在 1120nm 谱线的振荡从而输出 1120nm 激光。较之于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11304184); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2010FQ024; ZR2013FM007); 山东省高等学校科技计划资助项目(J13LN28)

作者简介: 刘晓娟(1976-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事全固态激光器、光纤激光器和光纤放大器等方面的研究。

E-mail: liuxiaojuan@sdut.edu.cn

收稿日期: 2015-03-31; 收到修改稿日期: 2015-07-06

喇曼频移法和掺Bi光纤激光器法,直接实现1120nm激光振荡的掺镱光纤激光器显示出更高的综合转换效率,相对较低的阈值抽运功率、结构简单和输出稳定的优点。2012年,WANG等人利用掺Yb光纤激光器实现了100W线偏振单模1120nm激光输出<sup>[11]</sup>。继而在2014年,ZHANG等人将掺镱光纤激光器输出功率提升至322W<sup>[12]</sup>。然而,高功率运转状态下,掺Yb光纤中的自相位调制导致1120nm激光线宽增大,甚至于降低光纤布喇格光栅的有效反射率<sup>[13]</sup>。考虑到窄线宽在非线性频率转换过程中对转换效率的决定性作用,本文中,作者用单模掺镱光纤和1120nm的光纤布喇格光栅对构建了谐振腔,使用976nm半导体激光器抽运,实现了输出线宽为0.03nm的1120nm激光输出。当注入抽运功率为265mW时,激光器输出功率为35mW。放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)峰值比1120nm激光强度低47dB以上。基于实验中光学元件的具体参量,理论上对掺Yb光纤的长度进行了优化。为印证理论模拟的结果,对腔长分别为3m,4m,5m和6m的掺Yb光纤激光器进行了研究,结果显示,实验结果和理论模拟结果吻合良好。该窄线宽光纤激光器可作为高质量种子源注入1120nm光纤放大器中继续提升功率,达到抽运1178nm喇曼光纤激光器的功率要求。

## 1 实验设备

实验中所用光路图及相关设备如图1所示。抽运光源为一个输出功率400mW单模尾纤耦合输出的半导体激光器,室温下中心波长为974.35nm。激光器谐

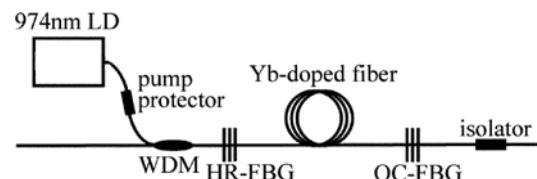


Fig. 1 Setup of Yb-doped 1120nm fiber laser

振腔由一段掺镱光纤和一对光纤布喇格光栅组成。其中掺镱光纤对抽运光的吸收系数为80dB/m,纤芯和包层的直径分别为6μm和125μm。高反射率光纤光栅(high reflecting fiber Bragg grating, HR-FBG)用作输入镜,谐振波长为1120.98nm,3dB带宽为0.89nm。考虑到高反射率耦合输出镜不仅有利于产生窄线宽激光振荡,还有利于抑制ASE效应和寄生振荡,因此,实验中,用作耦合输出镜的光纤光栅(output coupler fiber Bragg grating, OC-FBG)的反射率选择为5dB,谐振波长为1120.91nm,3dB带宽为0.82nm,一端与增益光纤熔接,另一端作为1120nm激光的输出端进行谱线宽度和激光功率的测量。波分复用器(wavelength division multiplex, WDM)分别与半导体激光器和HR-FBG熔接,实现对掺镱光纤激光器的抽运。各光纤器件之间的熔接处理保证了激光器的全光纤化结构。

## 2 实验结果和讨论

基于参考文献[14]中所用理论模型,结合实验中各光学元件的具体参量(如表1所示),对所用掺Yb光纤的长度进行了优化。需要指出的是,激光器正常运行时,与信号光功率相比ASE功率可以忽略不计。在设定注入抽运功率为100mW时,输出信号光功率随光纤长度的变化关系如图2所示。

Table 1 Parameters of optical components in theoretical simulation

parameter	value	parameter	value	parameter	value
$\lambda_p$	976nm	$A_{core}$	$2.83 \times 10^{-11} \text{ m}^{-2}$	$\sigma_{es}$	$1.01 \times 10^{-25} \text{ m}^{-2}$
$\lambda_s$	1120nm	$N$	$6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$\Gamma_s$	0.8
$\sigma_{ap}$	$2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^{-2}$	$\tau$	0.84ms	$\Gamma_p$	0.0016
$\sigma_{ep}$	$2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^{-2}$	$\alpha$	$3.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$	$P$	0.1W
$\sigma_{as}$	$0.3191 \times 10^{-27} \text{ m}^{-2}$	$\alpha_\lambda$	$5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$		

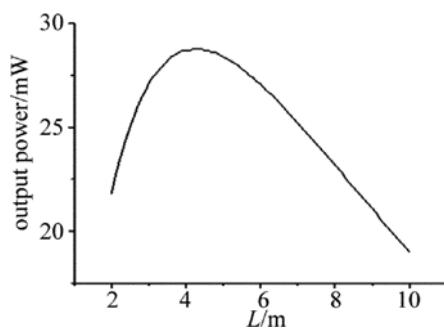


Fig. 2 Simulation of output power vs. Yb-doped fiber length

模拟结果显示,相同抽运功率下,随Yb光纤长度

的增加,1120nm激光输出功率随之增加。当Yb光纤长度为4m时,激光输出功率达到最大。当光纤长度继续增加时,激光输出功率下降。

在实验中,有源光纤长度为3m的Yb光纤激光器显示了抽运光的不完全吸收,这即为理论模拟中有源光纤长3m时激光器输出功率较小的原因。当Yb光纤长度为4m时,所测光谱显示抽运光已被完全吸收。实验中对光纤长度分别为4m,5m和6m的激光器的输出功率随注入抽运功率的变化进行了测量,结果如图3所示。可以看出,Yb光纤为4m的激光器转换效

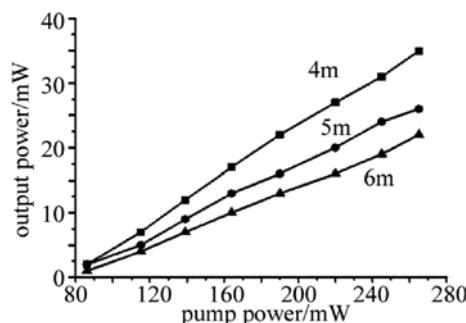


Fig. 3 Output power vs. pump power

率最高,当光纤长度继续增大时,激光输出功率开始下降。原因是有源光纤过长,对激光造成二次吸收,导致激光输出功率下降。实验结果与理论模拟结果相符。

对光纤长度为 4m 的 1120nm 激光器进行了详细研究。激光器的阈值抽运功率为 40mW,当注入抽运功率增大至 49mW 时,激光器开始稳定输出。当注入抽运功率为 265mW 时,掺镱光纤激光器的输出功率为 35mW,计算得光光转换效率为 13.2%。光光转换效率相对比较低,主要原因是掺镱光纤增益最大的波段在 1064nm 左右,而本激光器输出波长在 1120nm,远离光纤增益谱最大的位置,上能级粒子储存能量不能充分转换为输出激光。另外,半导体激光器的工作波长为 974nm,不是掺镱光纤的吸收峰值波长 976nm,这将导致抽运光波长和掺 Yb 光纤吸收波长失配而降低了吸收系数,进而导致光光转换效率偏低。作者发现,当抽运功率超过 230mW 时,激光器的斜率效率明显提高,意味着半导体模块温度升高,输出波长漂向 976nm,促进了掺 Yb 光纤吸收波长和抽运波长的匹配,增大了吸收系数,从而提升了斜率效率。对于当前的光纤激光器系统而言,从图 3 显示的实验结果可以看出,激光功率随注入抽运功率持续增长,激光器没有出现输出功率饱和现象,说明该激光系统仍然有功率提升的空间。改用较大功率 976nm 半导体激光器作为抽运源,并进一步采用双包层掺镱光纤作为增益介质,配用对应的光纤无源器件,可以继续提升激光器输出功率并极大提高光光转换效率。

为检测抽运光已被完全吸收,采用精度为 0.02nm

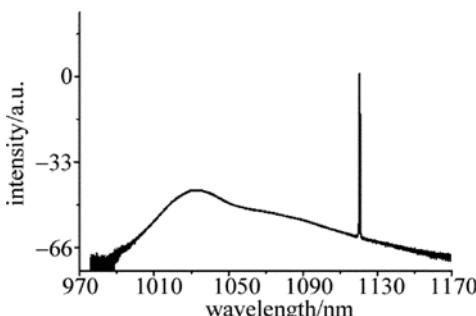


Fig. 4 The measured total spectrum

的光纤光谱仪 (AQ6370B Yokagawa Corp.) 对激光器输出光谱进行了测量,其中全光谱 (970nm ~ 1170nm) 如图 4 所示。可以看出,抽运光已被完全吸收,1120nm 激光强度比 ASE 峰值高 47dB 以上,充分说明 ASE 效应已被有效抑制。

测得信号光谱线如图 5 所示。信号光中心波长 1120.9nm,3dB 带宽为 0.03nm,实验过程中激光器运行稳定。

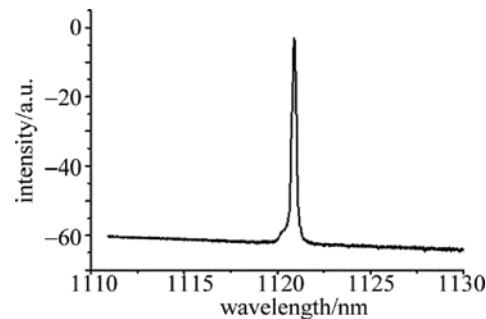


Fig. 5 The measured laser spectrum

目前,特别针对于窄线宽的长波长(相对于 1030nm ~ 1080nm)掺 Yb 光纤激光器的研究有以下几种有效方法:(1)加热有源光纤法<sup>[15]</sup>可提升有源光纤对抽运光的吸收截面,有利于获得高的转换效率。然而,长期工作于高温状态,有源光纤必须具备优良的耐热性能,另外,附加的恒温设备破坏了掺 Yb 光纤激光器的紧凑性;(2)相近波长抽运法<sup>[15]</sup>是获得窄线宽长波长掺 Yb 光纤激光器的另一种选择。由于激光器的斜率效率极大地依赖于激光频率与抽运光频率的比值,因此相近波长抽运法可有效提升斜率效率,并且,用与信号光波长相近的抽运光进行抽运,还可以抑制 ASE 效应和寄生振荡,有利于获得窄线宽信号光输出。但是,掺 Yb 光纤的吸收峰波长是 976nm,相近波长抽运法中,为保证有源光纤对抽运光的完全吸收,需要足够长的光纤长度,当抽运功率增加时,有源光纤中的非线性效应反而将限制信号光功率提升,并导致信号光谱线增宽。基于以上比较,本实验中所获得的窄线宽长波长掺 Yb 光纤激光器得益于以下 3 个方面:首先,作为耦合输出镜的窄带宽、高反射率光纤布喇格光栅使 1120nm 信号光在谐振腔内的模式竞争中获得足够高的增益从而形成激光振荡;其次,较低的抽运功率和较短的谐振腔在保证抽运光可被完全吸收的前提下,可防止有源光纤内非线性效应和寄生振荡的产生,有利于获得窄线宽信号光输出;最后,在获得以上窄线宽 1120nm 光纤激光器后,利用主振荡功率放大器技术,可在保持种子光高光束质量的前提下将信号光功率提升至所需功率水平。这将在以后的工作中进行阐述。

### 3 结 论

用974nm半导体激光器作抽运源,利用普通单模掺镱光纤作增益介质,通过1120nm光纤光栅选频,实现了1120nm输出的全光纤激光器。当抽运功率为265mW时,激光器输出功率为35mW,谱线宽度为0.03nm。实验中所得单模窄线宽光纤激光器可以进一步通过包层抽运放大获得窄线宽、高质量大功率1120nm激光,而这对于实现1178nm喇曼光纤激光器具有重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] LI F D, GUO H N, SUN J G, et al. Simulation and experimental study on coherent combination of dual beam fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4):509-514 (in Chinese).
- [2] FANG G, XU X T, QUAN E C, et al. Research progress of Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 278-282 (in Chinese).
- [3] SUPRADEEPA V R, NICHOLSON J W. Power scaling of high efficiency 1.5micron cascaded Raman fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14):2538-2541.
- [4] FAN X, CHEN M, SHIRAKAWA A, et al. High power Yb-doped photonic bandgap fiber oscillator at 1178nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13):14471-14476.
- [5] LIU X J, FU Sh G, HAN K Zh, et al. Recent progress in fiber yellow lasers. [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2):210-213 (in Chinese).
- [6] DAJANI I, VERGIEN C, ROBIN C, et al. Investigations of single-frequency Raman fiber amplifiers operating at 1178nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10):12038-12052.
- [7] WANG J H, ZHANG L, ZHOU J, et al. High power linearly polarized Raman fiber laser at 1120nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2):021406.
- [8] FENG Y, TAYLOR L R, CALIA D B. 150W highly-efficient Raman fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23678-23683.
- [9] CODEMARD C, JI J, SAHU J K, et al. 100W CW cladding-pumped Raman fiber laser at 1120 nm[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7580:75801N.
- [10] DIANOV E M, SHUBIN A V, NELKUNOV M A, et al. High-power cw bismuth-fiber lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, B24(8):1749-1755.
- [11] WANG J, HU J, ZHANG L, et al. A 100W all-fiber linearly-polarized Yb-doped single-mode fiber laser at 1120nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27):28373-28378.
- [12] ZHANG H, XIAO H, ZHOU P, et al. 322W single-mode Yb-doped all-fiber laser operated at 1120nm [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(5):052701.
- [13] KABLUKOV S I, ZLOBINA E A, PODIVILOV E V, et al. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13):2508-2510 .
- [14] MIGNON M, DESURVIRE E. An analytical model for the determination of optimal output reflectivity and fiber length in erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon Technology Letters*, 1992, 4 (8): 850-852.
- [15] KALITA M P, ALAM S, CODEMARD C, et al. Multi-watts narrow linewidth all fiber Yb-doped laser operating at 1179nm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5920-5925.