

高亮度 1018 nm 光纤激光实验研究

王岩山^{1,2} 孙殷宏^{1,2,3} 马毅^{1,2} 李腾龙^{1,2} 高清松^{1,2} 唐淳^{1,2} 张凯^{1,2}

¹中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 搭建了 1018 nm 全光纤激光系统, 实验研究了增益光纤长度、光纤布拉格光栅的反射率以及增益光纤的芯包比等参数对 1018 nm 激光性能的影响。实验研究表明: 对于双包层掺镱光纤, 可通过减小增益光纤长度使短波长激光获得更大增益, 进而实现 1018 nm 激光输出; 通过增加低反布拉格光栅反射率和增益光纤芯包比可以更好地抑制自发辐射以及提升激光器的效率。基于 15/130 μm 的国产双包层掺镱光纤, 在 1018 nm 波段获得了大于 150W 的激光输出, 光光转换效率为 71%, 自发辐射得到了有效的抑制。

关键词 激光器; 光纤激光器; 1018 nm; 双包层掺镱光纤; 同带抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102007

Experimental Study on High Brightness 1018 nm Ytterbium Doped Fiber Laser

Wang Yanshan^{1,2} Sun Yinhong^{1,2,3} Ma Yi^{1,2} Li Tenglong^{1,2} Gao Qingsong^{1,2}
Tang Chun^{1,2} Zhang Kai^{1,2}

¹Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract High power 1018 nm ytterbium doped fiber laser system is constructed. Output characteristics of 1018 nm laser with the length of gain fiber, the reflectivity of fiber Bragg gratings (FBG) and the diameter of core/cladding are experimentally investigated. It is found that the laser at short wavelength will get bigger gain by reducing the length of gain fiber for ytterbium doped fiber laser, 1018 nm laser can be obtained by shortening the length of gain fiber. Increasing the fiber bragg grating reflectivity and core/cladding area ratio are available approach to suppress the amplified spontaneous emission (ASE) gain and increase the laser efficient. A record output power more than 150 W at 1018 nm is obtained through using the domestic double cladding ytterbium doped fiber, with an optical-optical conversion efficiency of 71%, the ASE is suppressed efficiently.

Key words lasers; fiber laser; 1018 nm; double cladding ytterbium doped fiber; tandem pumping

OCIS codes 140.3480; 140.3510; 140.3615

1 引 言

光纤构型的激光介质具有大的体面积, 有利于介质散热, 具有近衍射极限的光束质量, 可实现全光纤化设计, 系统结构简单, 转换效率高, 具有小型化、轻量化优势, 易于满足工业加工、医疗应用需求。随着双包层掺镱光纤和半导体激光器(LD)的发展, 光纤激光器的输出功率得到了迅速的提高^[1-9]。对于 1070 nm 波段

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-09-02

作者简介: 王岩山(1985—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事光纤激光器技术方面的研究。E-mail: wangyanshande@163.com

的掺镱光纤激光器,目前通用的抽运源为 915 nm 或 976 nm 波段的半导体激光器(LD)。然而 LD 的亮度不高,且 915 nm 或 976 nm 激光抽运掺镱光纤时具有较高的量子亏损,导致其热效应非常严重。相对于 LD,1018 nm 光纤激光具有极高的亮度,作为掺镱光纤抽运源可极大提升注入抽运功率水平以及改善增益光纤的热效应。2009 年,IPG 公司采用多路 1018 nm 光纤激光抽运掺镱光纤实现了单纤单模万瓦输出^[10]。掺镱光纤在 1018 nm 波段的发射截面很小,在 1018 nm 实现激光输出时自发辐射(ASE)会比较严重,且容易出现其他波段的自激现象,因此,这方面报道的文章并不是很多。虽然在 2009 年 IPG 公司就实现了 270W 的 1018nm 激光输出,但未进行公开报道。在国内,2011 年, Li 等^[11]报道了 7.5 W 的 1018 nm 光纤激光器,斜率效率约为 16%。2013 年,王一礴等^[12]采用 15/130 μm 的双包层掺镱光纤获得了 22.8 W 的 1018 nm 光纤激光,光光转换效率为 62.8%。2013 年, Xiao 等^[13]采用 30/250 μm 的双包层掺镱光纤实现了 309 W 的 1018 nm 激光输出。

本文实验研究了增益光纤长度、光纤布拉格光栅的反射率以及增益光纤的芯包比等参数对 1018 nm 激光性能的影响,并基于 15/130 μm 的国产双包层掺镱光纤,获得了 155 W 的 1018 nm 激光输出,光光转换效率为 71%。

2 实验原理及装置

1018 nm 激光实验系统结构如图 1 所示,整个系统采用全光纤结构,采用一对光纤布拉格光栅作为谐振腔振荡,抽运源采用 976 nm 的 LD,采用光纤合束器将抽运光耦合至增益光纤。光纤布拉格光栅中心波长位于 1018 nm,高反光栅(HR)反射率大于 99%,低反光栅(OC)反射率为 10% 或 16%。增益光纤采用 Nufern 公司 10/130 μm 和国产 15/130 μm 双包层掺镱光纤(YDF),纤芯/包层数值孔径均为 0.07/0.46。包层模剥离器(CPS)用来剥离剩余的抽运光。输出端切 8°角用来防止端面的回光。

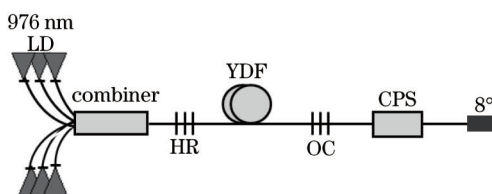


图 1 1018 nm 激光实验设计方案

Fig.1 Experiment design scheme of 1018nm fiber laser

3 实验结果与讨论

3.1 增益光纤长度对 1018 nm 激光性能的影响

实验中,采用纤芯/包层直径大小为 10/130 μm 的双包层掺镱光纤(YDF1)作为增益介质,利用一对中心波长位于 1018 nm,反射率分别为 99% 和 10% 的光纤布拉格光栅作为谐振腔,将抽运光注入增益光纤后测试了 YDF1 在不同长度下的光谱特性,1018 nm 光纤激光器在不同 YDF1 长度下的输出光谱如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出,当 YDF1 长度为 8 m 时,掺镱光纤未实现 1018 nm 激光输出,且在 1050~1070 nm 存在两个自激振荡峰。将 YDF1 长度减短至 3 m 后,从图 2(b)中可以明显的看出,在 1018 nm 激光输出的同时,1033 nm 波段也有自激振荡产生。从图 2(c)中可以看出,当 YDF1 长度为 2 m 时,在获得 1018 nm 激光的同时自激振荡也得到了有效的抑制。

以上现象可以这样解释:对于石英基掺镱光纤,一般来说, Yb^{3+} 的发射峰值位于 1030 nm 左右,而 Yb^{3+} 在 1018 nm 波段的吸收截面要远远高于 1030~1070 nm。因此,1018 nm 波段的小信号增益要远远低于 1030~1070 nm 波段,虽然在实验中采用了一对中心波长位于 1018 nm 的光纤布拉格光栅作为谐振腔,即使光纤布拉格光栅在 1030~1070 nm 波段没有反射,但是由于光纤端面或熔接点处会存在菲涅耳反射和瑞利散射,如果光纤长度过长,自发辐射增益增强,1018 nm 激光与自发辐射在增益竞争中会处于不利的地位。所以在实验中当 YDF1 长度过长时只有自激振荡输出而没有 1018 nm 激光输出,当 YDF1 光纤长度缩短后获得了 1018 nm 激光输出。实验结果表明,对于双包层掺镱光纤,可通过减小光纤长度使短波长激光获得更大增益,进而获得 1018 nm 激光输出。

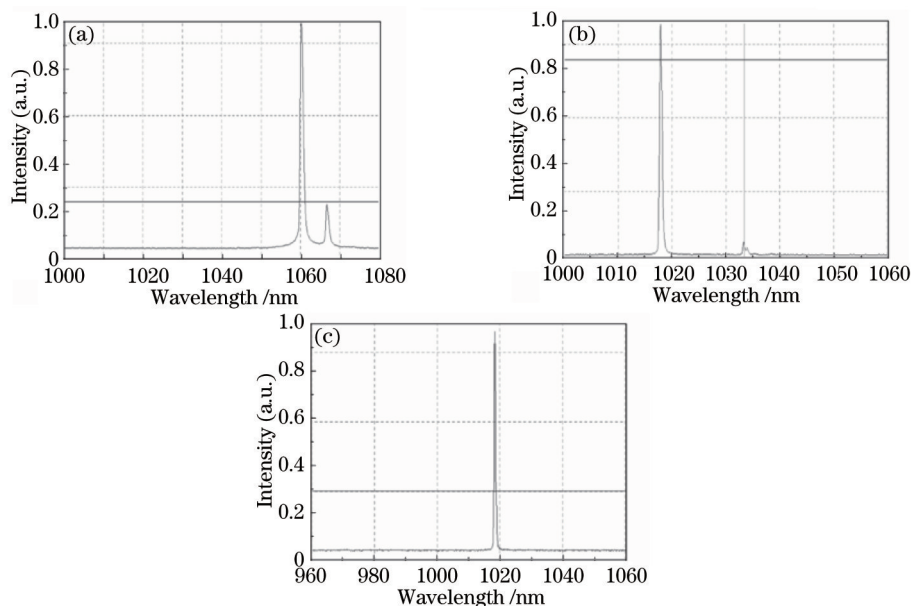


图2 1018 nm 激光器在不同YDF1长度下的输出光谱

Fig.2 Spectra of 1018 nm fiber laser versus different lengths of YDF1

3.2 OC的反射率对1018 nm激光性能的影响

从之前实验结果可知,HR和OC反射率分别为99%和10%,当YDF1长度优化至2 m时可获得高信噪比的1018 nm激光,其激光功率随抽运功率的变化关系如图3所示,在注入抽运功率为17.68 W时获得了5.1 W的1018 nm激光,光光转换效率为29%,但由于光纤长度过短,其抽运光吸收较少,导致其激光功率不高且效率偏低。

采用中心波长位于1018 nm,反射率分别为99%和16%的HR和OC作为谐振腔,使用YDF1作为增益介质进行了进一步的实验研究,将YDF1长度为优化至3 m时获得了高信噪比的1018 nm激光输出,没有明显的自发辐射产生。其激光输出功率随抽运功率的变化关系如图3所示,当注入抽运功率为17.68 W时获得了11 W的1018 nm激光,光光转换效率达到了62%。从图3中可以看出,相对于反射率为10%的OC,采用反射率为16%的OC后其激光器功率和效率提升了一倍多。

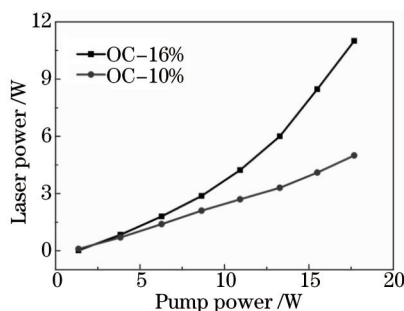


图3 激光功率随抽运功率的变化关系

Fig.3 Laser power versus pump power

激光起振需满足增益大于等于损耗,对于全光纤激光振荡系统,腔内损耗主要来自于OC的透射率,增加OC反射率可降低1018 nm激光的损耗和阈值,有利于1018 nm激光起振以及其他波段ASE的抑制,进而可以提升激光器的转换效率。但OC的反射率也不能太高,当激光在腔内形成稳定振荡时,增益等于损耗,较低的损耗会导致其激光增益过低,进而降低激光器效率。因此,在搭建1018 nm全光纤激光振荡系统时,需要对OC反射率进行优化,从而在获得高信噪比激光的同时也获得较高的转换效率。

3.3 增益光纤芯包比对1018 nm激光性能的影响

掺镱光纤的自发辐射峰值位于1030 nm波段,根据理论计算,掺镱光纤在1030 nm增益可表示为^[14]

$$G_{1030} = 0.25G_{977} + 0.72\beta\alpha,$$

式中 G_{1030} 和 G_{977} 分别为掺镱光纤在 1030 nm 和 977 nm 波段的增益, β 为掺镱光纤的包层和纤芯的直径比, α 为抽运吸收系数。从式中可以看出,采用较高芯包比的掺镱光纤可以更好地抑制自发辐射增益,而且芯包比的增加还会提高增益光纤对抽运光的吸收效率。

实验中,增加了增益光纤的芯包比,采用纤芯/包层直径大小为 15/130 μm 的双包层掺镱光纤(YDF2)作为增益介质,利用一对中心波长位于 1018 nm,反射率分别为 99%和 10%的 HR 和 OC 作为谐振腔,在注入抽运光后测试了其激光性能。优化了增益光纤长度,当 YDF2 长度为 5 m 时获得了高信噪比的 1018 nm 激光,其光谱图如图 4 所示,从图中可以看出,有明显的 1018 nm 激光输出,未观察到 ASE 和自激振荡现象。激光输出功率随抽运功率的变化关系如图 5 所示,从图中可以看出其光光转换效率随抽运光的增加而增加,这是因为随着抽运功率的增加,抽运光的中心波长逐渐向 976 nm 波段移动,使得掺镱光纤的吸收效率提升,从而使激光器光光转换效率提升。当抽运功率为 217 W 时,其激光输出功率达到了 154.8 W,光光转换效率为 71%。可以看出,对于相同的实验系统,相对于 10/130 μm 的双包层掺镱光纤,采用 15/130 μm 的双包层掺镱光纤后激光器的效率得到了较大的提升。理论和实验结果表明,增加增益光纤的芯包比可以更好地抑制自发辐射以及提升激光器的效率。由于较大的纤芯会带来更多的激光模式并降低激光亮度,所以增益光纤芯包比也不易过大。

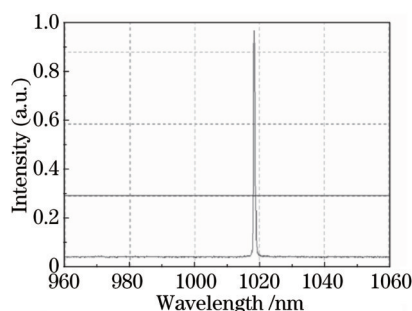


图 4 1018 nm 激光器在 YDF2 长度为 5 m 时的输出光谱

Fig.4 Spectra of 1018 nm fiber laser with the length of YDF2 of 5 m

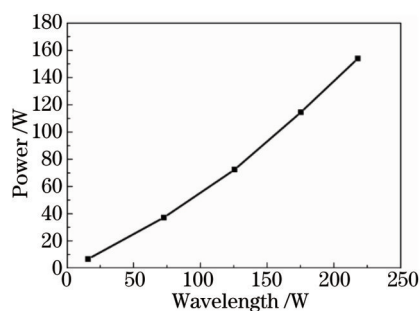


图 5 激光输出功率随抽运功率的变化关系

Fig.5 Laser power versus pump power

4 结 论

搭建了 1018 nm 全光纤激光振荡系统,实验研究了增益光纤长度、光纤布拉格光栅的反射率、增益光纤芯包比等参数对 1018 nm 激光性能的影响。研究表明,短的增益光纤长度有利于短波长激光输出,通过优化增益光纤长度可获得 1018 nm 激光输出,但是较短的光纤长度会导致激光器转换效率过低。对于 10/130 μm 的双包层掺镱光纤,将低反布拉格光栅反射率由 10%增加至 16%后激光器输出功率和效率提升了约一倍,实验研究表明,对于 1018 nm 光纤激光振荡系统,可通过优化低反光纤光栅反射率来提升激光器的效率。理论和实验结果表明,通过增加增益光纤的芯包比可以提升抽运光吸收效率以及更好的抑制自发辐射,进而可提高 1018 nm 光纤激光器的效率。利用一对中心波长位于 1018 nm,反射率分别为 99%和 10%的光纤光栅作为谐振腔,采用芯包比为 15/130 μm 的国产双包层掺镱光纤作为增益介质,在抽运功率为 217 W 时,获得了大于 150 W 的激光输出,光光转换效率为 71%,自发辐射和自激振荡得到了有效的抑制。

参 考 文 献

- 1 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, *et al.*. 110 W fibre laser[J]. Electron Lett, 1999, 35(14): 1158-1160.
- 2 Limpert J, Liem A, Zellmer H, *et al.*. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality[J]. Electron Lett, 2003, 39(8): 645-647.
- 3 Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.

- 4 Horley R, Norman S, Zervas M N. Progress and development in fibre laser technology[C]. SPIE, 2007, 6738: 67380K.
- 5 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75 kW Yb-doped double cladding fiber laser made in China[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.
- 6 Jeong Y, Alexander J B, Jayanta K S, *et al.*. Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. J Opt Soc Korea, 2009, 13(4): 416-422.
- 7 Christian W, Oliver S, Igor T, *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. Opt Lett, 2011, 36(16): 3118-3120.
- 8 Yan Ping, Xiao Qirong, Fu Chen, *et al.*. 1.6 kW Yb-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416001.
闫 平, 肖起榕, 付 晨, 等. 1.6 kW 全光纤掺镱激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416001.
- 9 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. 1.5 kW near single-mode all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- 10 O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009 CThA3.
- 11 Li Z, Zhou J, He B, *et al.*. Diode-pumped 1018-nm ytterbium-doped double-clad fiber laser[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 091401.
- 12 Wang Yibo, Chen Gui, Xie Lu, *et al.*. Experimental research of high performance fiber and fiber lasers at 1018 nm[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 064210.
王一礴, 陈 瑰, 谢 璐, 等. 高性能 1018 nm 光纤及激光器实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064210.
- 13 Xiao H, Zhou P, Wang X L, *et al.*. High power 1018 nm ytterbium doped fiber laser with an output power of 309 W[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(6): 065102.
- 14 Nilsson J, Minelly J D, Paschotta R, *et al.*. Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser[J]. Opt Lett, 1998, 23(5): 355-357.

栏目编辑: 胡 冰