

亚皮秒 L 波段掺铒全光纤锁模激光器

贾浩天¹ 王军利¹ 滕浩² 吕志国¹ 刘文军³ 魏志义²

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

³北京邮电大学理学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 报道了一种 L 波段的高功率亚皮秒掺铒光纤激光器。在全光纤环形腔内熔接 2 个偏振控制器(PC)和偏振相关的光隔离器(ISO),基于非线性偏振旋转锁模原理实现了全光纤结构锁模激光脉冲输出。输出激光的中心波长为 1603 nm,脉冲重复频率为 37.8 MHz,单脉冲能量为 4 nJ,平均输出激光功率为 152 mW。对此全光纤锁模激光器进行合理的色散控制,可得到脉冲宽度为 370 fs 的锁模激光输出。实验中使用高掺杂浓度的掺铒光纤,有效减少了其使用长度,提高了抽运转换效率,实现了结构简单紧凑、性能稳定可靠的 L 波段亚皮秒光纤激光器。

关键词 光纤光学; 掺铒光纤; 光纤激光器; 锁模激光器

中图分类号 TN248.1; O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101008

Sub-Picosecond L-Band Erbium-Doped All Fiber Mode-Locked Laser

Jia Haotian¹ Wang Junli¹ Teng Hao² Lü Zhiguo¹ Liu Wenjun³ Wei Zhiyi²

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, College of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A L-band high power sub-picosecond erbium-doped fiber laser is reported. Two polarization controllers (PC) and a polarization dependent optical isolator (ISO) are fused in all fiber ring cavity, and the mode-locked laser pulse output of all fiber structure is realized based on nonlinear polarization rotation mode locking principle. The center wavelength of the laser is 1603 nm, the pulse repetition rate is 37.8 MHz, the single pulse energy is 4 nJ, and the average output laser power is 152 mW. Reasonable dispersion management is carried out on the all fiber mode-locked laser, and the mode-locked laser output with pulse width of 370 fs can be obtained. The erbium-doped fiber with high doping concentration is adopted in experiment, and its length is reduced effectively. The pump conversion efficiency is improved. The L-band sub-picosecond fiber laser with simple and compact structure, stable and reliable performance is realized.

Key words fiber optics; erbium-doped fiber; fiber laser; mode-locked laser

OCIS codes 060.2410; 060.3510; 140.4050

1 引言

现代通信业务发展迅速,人们对通信系统容量的需求急剧增长。为了满足这种日益膨胀的需求,提高现有光纤通信系统的容量,系统扩容势在必行^[1]。一种有效的系统扩容方法是充分发掘光纤宽带传输的潜力,

收稿日期: 2016-06-16; 收到修改稿日期: 2016-07-17

基金项目: 科技部重大仪器开发专项(2012YQ120047)

作者简介: 贾浩天(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: 1074155570@qq.com

导师简介: 王军利(1976—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事新型超快激光器方面的研究。

E-mail: dispersion@126.com(通信联系人)

利用常规 C 波段(1530~1565 nm)以外的 L 波段(1570~1610 nm)实现这两个波段信号的共同传输^[2]。掺铒光纤(EDF)不能对 C 波段和 L 波段同时同程度地放大^[3],所以宽带掺铒光纤放大器(EDFA)需要由这两个波段的 EDFA 组合构成。C 波段的 EDFA 技术已经非常成熟,实现宽带 EDFA 系统的关键问题是如何实现 L 波段的 EDFA^[4],所以扩大传统 EDFA 带宽的 L 波段 EDFA 一直是研究热点。1994 年,Wang 等^[5]研究了掺铒碲化物光纤中 L 波段的放大特性;1999 年 Akasaka 等^[6]报道的光纤拉曼放大器也是实现 L 波段 EDFA 的一种途径;2000 年,Flood 等^[2]基于增益位移效应实现了 L 波段的放大;2009 年,Bakar 等^[7]实验研究了受激拉曼散射在远程抽运 L 波段 EDFA 中的作用,观察了 C 波段受激拉曼散射作为二次抽运源时对 L 波段 EDFA 增益、噪声指数及拉曼分布增益的影响;2013 年,Singh 等^[8]报道了一种利用分布式拉曼放大器与 EDFA 组合成的混合装置,实现了增益平坦的 L 波段放大器。国内研究人员在 L 波段掺铒放大器领域也做了很多工作。2008 年,费海峰等^[9]研究了 L 波段 EDFA 的本征平坦增益特性,确定了形成平坦增益的最佳粒子数反转条件(40%),在 EDFA 前端加入 1 个光纤环形镜(FLM)来反射后向放大自发辐射光,较好地解决了 L 波段 EDFA 抽运效率低的问题;2011 年,杨扬等^[10]应用一种新型的光纤环形镜,通过改变环对不同波长的反射率控制腔内的增益,得到波长在 1564~1592 nm 范围可调谐的激光输出。

1990 年,Massicott 等^[11-12]研究发现,通过控制掺铒增益光纤的长度使铒离子的粒子反转度稳定在很低的程度,即可实现 L 波段的放大。为使粒子反转度维持在很低的水平,一个最简单有效的途径就是增加掺铒增益光纤的使用长度,所以在相同的掺杂浓度下 L 波段 EDFA 使用的光纤长度比较长,一般是 C 波段 EDFA 的 4~5 倍,达几十甚至上百米。使用的掺铒光纤过长会带来一系列的问题:比如增加损耗、降低抽运转换效率、增加噪声指数、增加四波混频等非线性效应等^[13-22]。高掺杂浓度掺铒光纤的出现使上述问题在一定程度上得到了解决。提高 Er^{3+} 的掺杂浓度会使铒光纤单位长度的增益增大,故较短的掺铒光纤就可以满足 L 波段 EDFA 的增益要求^[9]。

本文基于掺铒光纤的增益位移效应进行 L 波段掺铒光纤激光的优化研究。实验中使用高掺杂浓度的掺铒光纤(Er -110-4/125, Liekki,在 976 nm 处的吸收效率为 68 dB/m),有效减少了掺铒光纤的使用长度,提高了抽运转换效率,实现了结构简单紧凑、性能稳定可靠的 L 波段亚皮秒光纤激光器。

2 基本原理与实验

全光纤锁模掺铒光纤激光器装置如图 1 所示,它分为 2 部分,第 1 部分是环形腔结构的激光振荡器,用以提供种子源;第 2 部分是放大级,将种子光源进行直接放大。整个激光器为全光纤结构,没有空间分离器件,保证了激光器的抗干扰能力和稳定性。种子源部分由输出功率为 850 mW、波长为 976 nm 的激光二极管(LD)作为抽运源,抽运光通过波分复用器(WDM)注入掺铒光纤,由 WDM、掺铒光纤、输出耦合器(OC)、2 个偏振控制器(PC1 和 PC2)、偏振相关隔离器(PD-ISO)及单模光纤(SMF)组成环形腔。PD-ISO 保证腔内的激光单向运转,PD-ISO 具有起偏、检偏作用,与 PC1、PC2 组合在一起构成等效可饱和吸收体,通过合理调节 PC1、PC2 的角度可以形成锁模激光输出。从振荡器 OC 输出的锁模激光经 PC3、PD-ISO 进入 95 cm 的掺铒光纤,实现锁模脉冲的直接放大,抽运激光采用最大输出功率为 850 mW、波长为 976 nm 的激光二极管。

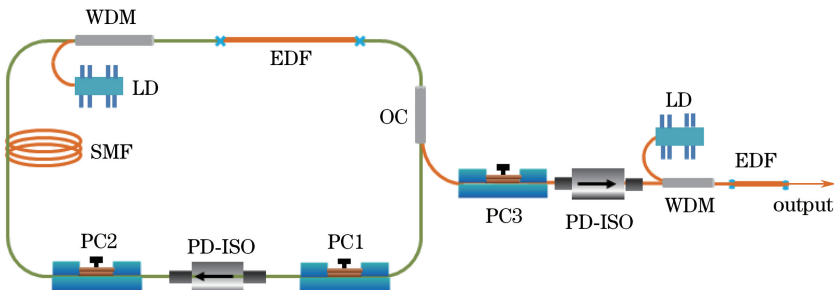


图 1 全光纤掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of all fiber erbium-doped fiber laser

使用型号为 YOKOGAWA AQ6370C 的光谱仪测量激光光谱,型号为 TEK DPO2024B 的示波器测量激光波形,型号为 E4402B Agilent 的频谱仪测量激光频谱。振荡器部分使用的光纤的长度和群速度色散(GVD)如表 1 所示,腔内净色散大约是一 -0.025 ps^2 。

表 1 全光纤锁模腔中的光纤参数

Table 1 Parameters of fiber in all fiber mode-locked cavity

	Erbium-doped fiber	OFS980	SMF
Length /mm	1150	2000	2000
GVD /(fs^2/mm)	13	1.8	-22

3 实验结果与分析

对振荡器的运行状态进行了研究。抽运激光的功率为 50 mW 时开始出现连续激光输出;继续增加抽运功率并调节偏振控制器的角度,功率增加到 200 mW 时出现了稳定的调 Q 状态。用高速光电二极管和示波器观测并记录了调 Q 脉冲序列,如图 2(a)所示,调 Q 脉冲的重复频率为 65 kHz。抽运激光功率增加到 300 mW 时,首次锁模通过精细调节 PC1、PC2 的角度实现,锁模脉冲序列如图 2(b)所示,其重复频率为 37.8 MHz,稳定的幅度表现出良好的连续锁模状态。之后只要抽运激光达到 300 mW 激光器就可以实现自启动锁模。

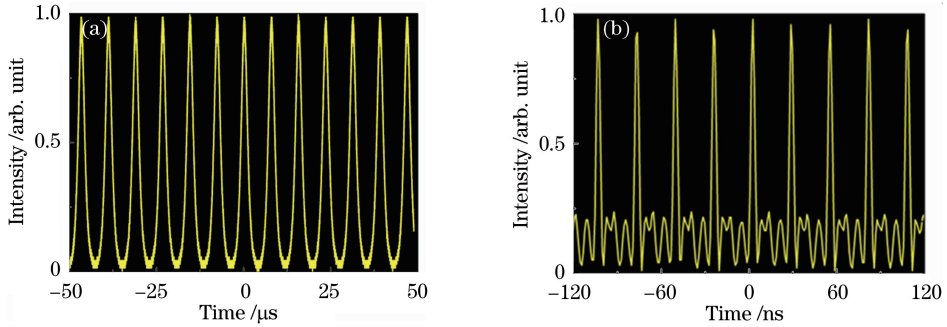


图 2 (a)调 Q 序列;(b)锁模脉冲序列

Fig. 2 (a) Q-switching sequence; (b) mode-locked pulse sequence

图 3(a)给出了相应的锁模光谱图,可以看到其中心波长为 1603 nm,光谱的 3 dB 带宽为 7 nm,光谱图中明显的 Kelly 边带表明激光器运转在孤子锁模状态。用强度自相关仪对锁模激光的脉冲宽度进行了测量,结果如图 3(b)所示,在双曲正割拟合近似下达到了约 330 fs 的脉冲宽度。

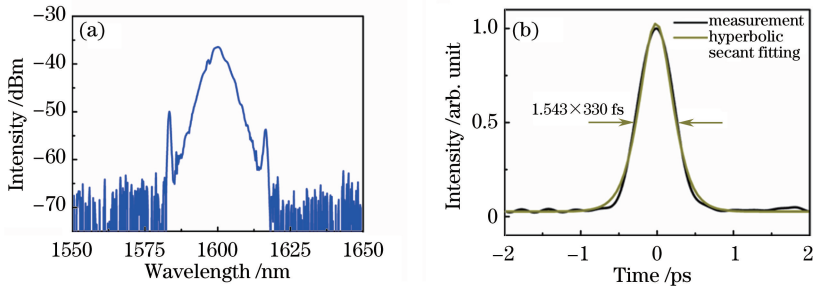


图 3 (a)锁模光谱;(b)自相关曲线

Fig. 3 (a) Mode-locked spectrum; (b) auto-correlation curve

将振荡器输出的锁模激光注入到放大级进行放大。图 4 是放大后测量的脉冲序列,随着抽运激光功率的增加,脉冲序列一直保持稳定。图 5 是放大级抽运功率与输出锁模激光功率的对应关系,从图中可以看出,输出激光的功率一直呈线性增长,没有出现饱和现象。放大级抽运激光增加到 532 mW 时,最大输出功率为 152 mW,相应的单脉冲能量为 4 nJ,峰值功率为 12 kW。根据种子激光输出功率 40 mW,可以求得抽运转换效率约为 21%。高掺杂铒光纤的使用减少了增益光纤的使用长度(种子源 1.15 m,放大级 0.95 m)。

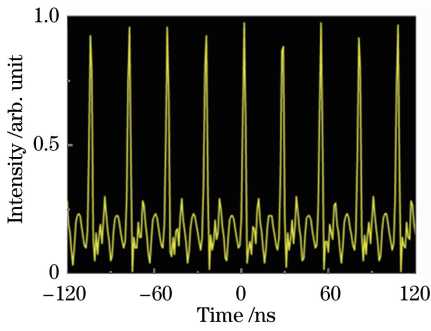


图 4 放大后的脉冲序列

Fig. 4 Amplified pulse sequence

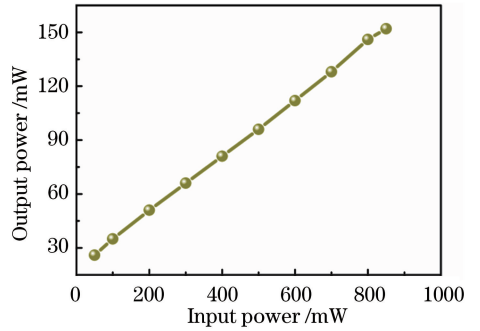


图 5 放大输出功率随抽运激光功率的变化

Fig. 5 Variation of output power with pump laser power

在使用低掺杂铒光纤得到 L 波段激光的实验中往往要用到几米甚至几十米的掺铒光纤^[4,18],过长的光纤会带来较大的损耗,同时也会降低抽运转换效率。

输出功率达到最大(152 mW)时测量了锁模激光的脉冲特性,图 6(a)是放大之后的光谱图,其中心波长为 1598 nm,光谱宽度为 9 nm。与振荡器的光谱图比较可以看出,Kelly 边带数目增加了,这可能是在放大过程中更多的非线性效应和色散累积所致。2014 年,Luo 等^[18]用类似的腔型得到了 768 fs 的 L 波段锁模激光。此处实验中进行了合理的色散控制,得到了 370 fs 的 L 波段锁模激光,脉宽测量结果如图 6(b)所示。放大之后的脉冲宽度比振荡器的脉冲宽度要宽一些,这可能是放大过程中更多的色散累积所致。采用频谱分析仪测量了锁模脉冲的频谱,结果如图 6(c)所示,信噪比达到 65 dBm,表现出非常好的锁模状态,锁模脉冲的重复频率约为 37.8 MHz,图 6(c)内插图为 1 GHz 范围内的射频频谱。

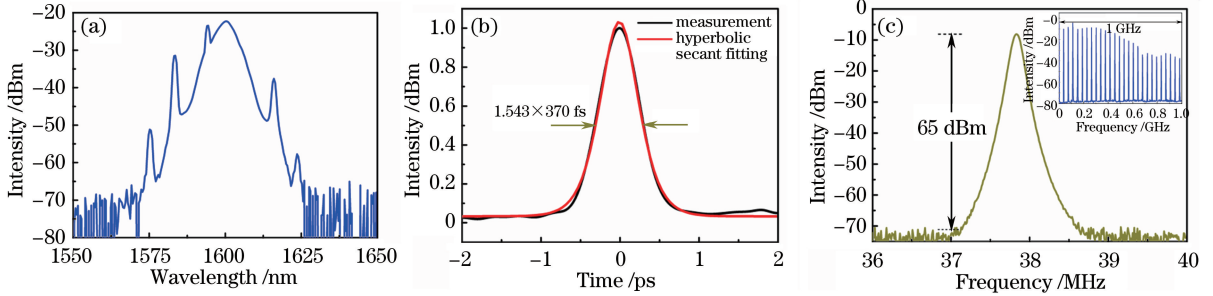


图 6 放大后的数据。(a)光谱;(b)自相关曲线;(c)频谱

Fig. 6 Amplified data. (a) Optical spectrum; (b) auto-correlation curve; (c) frequency spectrum

文献[11]中,Massicott 等做了如下研究:在一定的抽运功率下测量不同长度掺铒光纤的增益谱,发现随着增益光纤长度的增加,在 1530 nm 峰值附近波长的输出功率不断降低,而 L 波段上输出的功率逐渐增加,表现出增益位移的特性,最终表现为全部的 L 波段输出,即比较长的 C 波段掺铒光纤构成了 L 波段掺铒光纤放大器。这意味着,想得到长波方向的发射,可通过增加 EDF 长度使粒子反转度保持在较低的水平(约

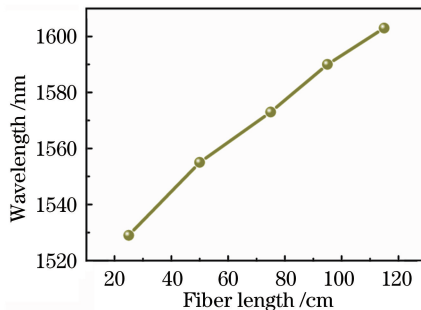


图 7 输出波长随光纤长度变化曲线

Fig. 7 Variation curve of output wavelength with fiber length

0.4),实现 L 波段的放大。实验中通过改变增益光纤长度得到了不同中心波长的激光输出,验证了增益谱随增益光纤长度增加向长波方向移动的理论。图 7 为输出激光中心波长随增益光纤长度变化的曲线。随着增益光纤的增加,中心波长在 1530~1605 nm 之间变化,表明可以通过控制增益光纤的长度使铒离子的粒子反转度维持在不同程度,从而移动 Er^{3+} 的增益谱,实现不同波长的激光输出。

4 结 论

报道了一种基于非线性偏振旋转锁模机制的 L 波段全光纤掺铒光纤激光器,实现了重复频率为 37.8 MHz、中心波长为 1603 nm、脉冲宽度为 370 fs、最大输出功率为 152 mW 的 L 波段亚皮秒激光输出。该全光纤激光器结构简单、运转稳定,对设计用于 L 波段的 EDFA 具有重要参考价值。

参 考 文 献

- Ji Yuefeng. Optical wavelength division multiplexing system [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1999: 98-100.
纪越峰. 光波分复用系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999: 98-100.
- Flood F A. L-band erbium-doped fiber amplifiers[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2000, 2: 102-104.
- Flood F A. Gain saturation behavior in L-band EDFAs[J]. Photonics Technology Letters, 2000, 12(9): 1156-1158.
- Choi B H, Park H H, Chu M, *et al.* High-gain coefficient long-wavelength-band erbium-doped fiber amplifier using 1530 nm band pump[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(2): 109-111.
- Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: A new candidate for fiber devices[J]. Optical Materials, 1994, 3(3): 187-203.
- Akasaka Y, Morita I, Ho M C, *et al.* Characteristics of optical fibers for discrete Raman amplifiers [C]. European Conference on Optical Communication, 1999, 1: 288-289.
- Bakar M H A, Mahdi M A, Mokhtar M, *et al.* Investigation on the effect of stimulated Raman scattering in remotely-pumped L-band erbium-doped fiber amplifier[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(8): 602-606.
- Singh S, Kaler R S. Flat-gain L-band Raman-EDFA hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(3): 250-252.
- Fei Haifeng, Yu Zhenhong, Ji Changjun. Characteristics of L-band EDFA and its optimization design[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2008, 25(1): 94-98.
费海峰, 余震虹, 纪长军. L 波段 EDFA 特性研究及优化设计[J]. 量子电子学报, 2008, 25(1): 94-98.
- Yang Yang, Qiao Xueguang, Liu Yinggang, *et al.* L-Band variable wavelength erbium-doped fiber laser based on over-coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214003.
杨 扬, 乔学光, 刘颖刚, 等. 基于过耦合器的 L 波段可变波长掺铒光纤激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214003.
- Massicott J F, Armitage J R, Wyatt R, *et al.* High gain, broadband 1.6 μm Er^{3+} -doped silica fiber amplifier [J]. Electronics Letters, 1990, 26(20): 1645-1646.
- Massicott J F, Wyatt R, Ainslie B J. Low noise operation of Er^{3+} -doped silica fiber amplifier around 1.6 μm [J]. Electronics Letters, 1992, 28(22): 1924-1925.
- Liu Y, Burtsev S, Hegarty S, *et al.* Four-wave mixing in EDFAs[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2000, 2: 111-113.
- Tan li, Wang Yanyong, Ding Yongkui, *et al.* The research and development of L-band EDFA [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(1): 40-46.
谭 莉, 王衍勇, 丁永奎, 等. L 带掺铒光纤放大器的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(1): 40-46.
- Myslinski P, Szubert C, Bruce A J, *et al.* Performance of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(8): 973-975.
- Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Li Zhaohui, *et al.* 21 nm range wavelength-tunable L-band Er-doped fiber linear cavity laser [C]. SPIE, 2001, 4595: 196-199.
- Qian L, Fortusini D, Benjamin S D, *et al.* Gain-flattened, extended L-band (1570-1620 nm), high power, low noise erbium-doped fiber amplifiers[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002, ThJ: ThJ4.
- Luo J L, Li L, Ge Y, *et al.* L-band erbium-doped fiber laser using the nonlinear polarization rotation technique[C]. International Photonics and Optoelectronics Meetings, 2014, FTh4F: FTh4F.4.

- 19 Tammela S K, Hotoleanu M, Kiiveri P T, *et al.* Very short Er-doped silica glass fiber for L-band amplifiers[J]. Optical Fiber Communications Conference, 2003, 1: 376-377.
- 20 Wang Tianshu, Wang Ke, Guo Yubin, *et al.* Experimental investigation on high flattening Er-doped C+L-band superfluorescent fiber source[J]. Journal of Optoelectronics· Laser, 2006, 17(7): 821-823.
王天枢, 王 珂, 郭玉彬, 等. 高平坦 C+L 波段掺 Er 光纤超荧光光源实验研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(7): 821-823.
- 21 Meng Hongyun, Gao Weiqing, Liu Yange, *et al.* Gain enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifiers based on fiber loop mirror[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 825-828.
蒙红云, 高伟清, 刘艳格, 等. 基于光纤环形镜的 L-波段掺铒光纤放大器增益的提高[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 825-828.
- 22 Yang Shiquan, Meng Hongyun, Yuan Shuzhong, *et al.* Wavelength changeable L-band Er-doped fiber laser using a high-birefringence fiber loop mirror[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(10): 868-870.
杨石泉, 蒙红云, 袁树忠, 等. 由高双折射光纤环镜构成的可变波长输出的 L-波段掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 868-870.