

基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲 掺镱光纤激光器

周冠锐 师红星 金东臣 谭方舟 刘江 王潜 王璞

北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100124

摘要 设计了一种基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱全光纤激光器。该激光器采用主振荡功率放大结构,由调制半导体激光种子源和一级单模单包层掺镱光纤放大器组成。半导体激光种子源的光谱中心波长通过种子光自注入方式被定义为 978.3 nm,调制之后的激光脉冲宽度为 4.5 ns,重复频率在 10~50 MHz 范围内可调。当半导体激光种子源调制重复频率为 50 MHz 时,种子光被一级单包层掺镱光纤放大器放大至 115 mW,相应的激光中心波长为 978.3 nm,3 dB 光谱带宽为 0.11 nm,放大之后光谱中没有出现明显的放大自发辐射现象。

关键词 激光器;光纤放大器;半导体激光器调制;掺镱光纤

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801005

Nanosecond-Pulsed Yb-Doped Fiber Laser at 978 nm Based on Diode Laser Modulation Technique

Zhou Guanrui Shi Hongxing Jin Dongchen Tan Fangzhou Liu Jiang
Wang Qian Wang Pu

National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Based on diode laser modulation technique, a 978 nm nanosecond-pulsed Yb-doped fiber laser is designed. The structure of the laser is master oscillator power amplifier. The laser system consists of the seed of modulated laser diode and one stage Yb-doped fiber amplifier with single-mode and single-cladding. The spectral central wavelength of laser diode seed is set as 978.3 nm by self-seeding. The laser pulse width after modulation is 4.5 ns and the repetition frequency is tunable at 10~50 MHz. The seed light is amplified to 115 mW by one stage Yb-doped fiber amplifier with single-cladding when the repetition frequency of laser diode seed modulation is 50 MHz. The corresponding central wavelength of the laser is 978.3 nm, 3 dB spectral bandwidth is 0.11 nm. The obvious amplified spontaneous emission does not appear in the spectrum after amplification.

Key words lasers; fiber amplifier; diode laser modulation; Yb-doped fiber

OCIS codes 140.3510; 140.2020; 060.3510; 140.3615

1 引 言

近年来光纤激光器因具有亮度高、结构紧凑、性能稳定可靠等特点,在科学研究、工业加工、军事国防等领域有广泛的应用前景,已迅速成为激光技术领域的研究热点^[1-3]。其中,980 nm 光纤激光器可以作为掺铒、掺镱光纤激光器与放大器的高亮度抽运源,其本身经过倍频之后可以得到优质蓝绿光源^[4-6]。980 nm 光

收稿日期: 2015-12-07; 收到修改稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61527822)、国家自然科学基金重点项目(61235010)

作者简介: 周冠锐(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器和光纤放大器方面的研究。

E-mail: zhouguanrui@126.com

导师简介: 王璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

纤激光器的增益介质一般为掺镱光纤,由掺镱光纤的能级结构可以看出,980 nm 波段属于三能级系统,1030 nm 波段属于四能级系统,这导致 980 nm 光纤激光器中放大自发辐射(ASE)的增益高于 980 nm 激光的增益,从而严重阻碍了 980 nm 激光输出功率、效率和信噪比的提高,因此有效抑制 ASE 是实现 980 nm 光纤激光器的前提。

1998 年,Nilsson 等^[7]对三能级系统中 ASE 的产生与抑制办法进行了研究,研究表明,即使 980 nm 光纤激光器中 ASE 的增益比 980 nm 激光的增益高,仍然可以通过增大增益光纤纤芯包层直径比的方式抑制 ASE。基于此,人们开始尝试使用不同结构的增益光纤构建 980 nm 光纤激光器,最早采用的增益光纤是单模单包层掺镱光纤。2000 年,Zenteno 等^[8]用 946 nm 的 Nd:YAG 激光器正向抽运单模 CS980 光纤,获得最高输出功率为 0.655 W、斜率效率为 59% 的 979.8 nm 连续激光输出。单模单包层掺镱光纤作为 980 nm 光纤激光器的增益介质,可以实现纤芯抽运,使得纤芯中抽运光的功率密度保持在较高水平,能够持续满足 980 nm 处的粒子数反转条件,使激光器的优势振荡波长保持在 980 nm 附近,可以直接抑制 ASE 而无需其他损耗元件,并且其输出激光光束质量接近衍射极限。但单模单包层掺镱光纤的小芯径导致抽运耦合效率较低,为提高注入增益光纤的抽运光功率,外包层为空气孔的 JAC(jacketed air-clad)单模双包层光纤以及超大纤芯光子晶体光纤先后作为增益介质被应用到 980 nm 光纤激光器中^[9-11]。已报道的 980 nm 纳秒脉冲光纤激光器中,纳秒脉冲多采用空间调 Q 方式产生。2010 年,Li 等^[12]用 946 nm Nd:YAG 固体激光器抽运单模掺镱光纤,获得脉冲宽度为 15 ns、重复频率为 16 kHz、平均功率为 167 mW 的 980 nm 调 Q 脉冲激光。同年,Boulet 等^[13]以超大纤芯光子晶体光纤作为增益光纤,通过主振荡功率放大结构获得脉冲宽度为 12 ns、重复频率为 80 kHz、平均功率为 69 W 的 977 nm 调 Q 脉冲激光,斜率效率为 35%。2013 年,He 等^[14]用 915 nm 半导体激光器抽运设计了纤芯/内包层直径为 85 μm/200 μm 的棒状光子晶体光纤,获得脉冲宽度为 9 ns、重复频率为 10 kHz、平均功率超过 2 W 的 978 nm 线偏振调 Q 脉冲激光。然而,自由空间调 Q 器件、超大纤芯光子晶体光纤以及其他损耗元件的引入,增加了系统复杂程度,降低了系统稳定性,并提高了成本。相比调 Q 技术而言,半导体激光器调制技术作为一种高质量脉冲产生方式,其输出脉冲宽度、重复频率灵活可调,易于实现全光纤结构,更利于实际应用。目前,性能稳定、成本低廉的半导体激光器调制技术已经在 1.06^[15-16],1.5^[17],2.0 μm^[18] 波段得到了广泛的研究与应用。

本文设计了一种基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱光纤激光器。该激光器采用全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构,以调制半导体激光器作为种子源。种子源输出激光脉冲宽度为 4.5 ns,重复频率在 10~50 MHz 范围内可调,其中心波长通过种子光自注入的方式被定义为 978.3 nm。

2 实验装置

基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱光纤激光器实验装置如图 1 所示,由纳秒脉冲半导体激光种子源和一级单模单包层掺镱光纤放大器(YDFA)组成。实验中的调制电脉冲由任意波形发生器产生,经过偏置电路后加载到带有尾纤的单模半导体激光器上,该半导体激光器为法布里-珀罗(F-P)腔半导体激光器。在不进行种子光注入的情况下,半导体激光器的输出光谱较宽,并且其光谱峰值与掺镱光纤放大器的增益峰值不统一,不利于后续功率放大工作,故采用种子光自注入的方式对半导体激光器输出光谱中

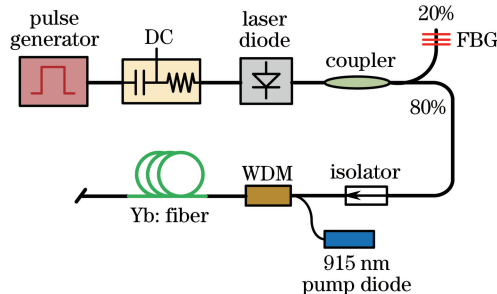


图 1 基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱光纤激光器装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nanosecond-pulsed Yb-doped fiber laser at 978 nm based on diode laser modulation technique

心波长进行重新定义。

如图 1 所示,半导体激光器经调制输出的脉冲进入一个分束比为 20/80 的光纤分束器(coupler),光纤分束器的 20%输出端熔接有一个中心波长为 978.3 nm、反射率为 90%、带宽为 0.2 nm 的光纤布拉格光栅(FBG)。为了实现光谱中心波长的定义,反馈脉冲须与半导体激光器内部发射脉冲同步,即脉冲在半导体激光器与 FBG 之间的往返时间必须是脉冲间隔时间的整数倍。为了保证调制半导体激光器种子源的稳定性,光纤分束器的 80%输出端连接一个带尾纤的隔离器,调制脉冲激光经由隔离器后进入掺镱光纤放大器。掺镱光纤放大器采用纤芯抽运方式,由一个最大输出功率为 330 mW 的 915 nm 单模半导体激光抽运源、一个 915/980 nm 波分复用器(WDM)和一段 45 cm 长的单模单包层掺镱光纤组成。其中,掺镱光纤的纤芯直径为 6 μm ,相应的数值孔径(NA)为 0.14,包层直径为 125 μm 。因为放大器须采用较短的增益光纤以抑制 ASE,所以增益光纤必须在 915 nm 处有较高的吸收系数以提供尽可能多的增益,实验中采用的掺镱光纤在 915 nm 处的吸收系数为 140 dB/m。为了避免光纤末端的菲涅耳反射影响系统稳定性,光纤分束器 20%输出端及增益光纤输出端以 8°角切割。

3 实验数据与分析

由任意波形发生器产生的调制电脉冲经过偏置电路后加载到 F-P 腔半导体激光器上,调制输出的光脉冲宽度为 4.5 ns,脉冲重复频率调谐范围为 10 ~ 50 MHz。使用带宽为 1 GHz 的示波器(Agilent DSO7104B)和带宽为 1.2 GHz 的光电探头(THORLABS DET01CFC)测得脉冲宽度以及重复频率为 50 MHz 时的脉冲序列分别如图 2(a)和(b)所示。从图 2(b)中可以看出,调制的脉冲序列具有良好的稳定性,没有出现明显的幅值抖动和周期性抖动。

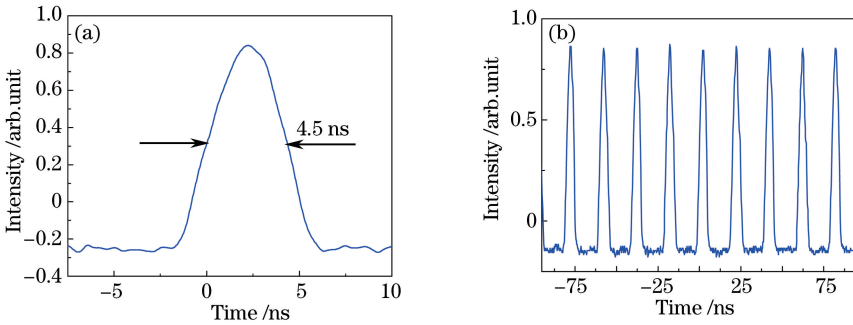


图 2 半导体激光种子源(a)脉冲宽度与(b)脉冲序列

Fig. 2 (a) Pulse width and (b) pulse train of diode laser seed

在未进行种子光注入的情况下,F-P 腔半导体激光器输出光谱较宽,使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370B)测得其光谱如图 3 中蓝色线所示,其峰值位于 972 nm 附近。测得单模单包层掺镱光纤放大器的 ASE 光谱如图 4 所示,其增益峰值位于 978 nm 处。为了使半导体激光种子源的输出光谱中心波长与掺镱光纤放大器的增益峰值相匹配,从而最大限度地提高光纤放大器的效率,实验中采用种子光自注入的方法对半导体激光种子源的中心波长进行重新定义,定义后的种子源输出光谱如图 3 中红色线所示,其光谱中心波长为 978.3 nm,3 dB 光谱带宽为 0.10 nm,光学信噪比为 17 dB。当脉冲重复频率为 50 MHz 时,测得光纤分束器 80%输出端的平均输出功率为 0.6 mW。

调制半导体激光种子源的输出经过一个带尾纤的隔离器之后通过 915 nm/980 nm 波分复用器进入单模单包层掺镱光纤放大器中,放大器的抽运源是一个最大输出功率为 330 mW 的 915 nm 单模半导体激光器,放大器的增益光纤纤芯/包层直径为 6/125 μm ,其在 915 nm 处的吸收系数为 140 dB/m。使用截止波长为 950 nm 的长通滤波器(THORLABS FEL0950)滤除抽运光后对信号光功率进行测量,图 5 为单包层掺镱光纤放大器平均输出功率随 915 nm 半导体抽运激光功率变化的关系图。从图 5 中可以看出,当调制半导体激光种子源的重复频率为 50 MHz 时,单包层掺镱光纤放大器的平均输出功率随 915 nm 半导体抽运激光功率变化的斜率效率基本上是线性的。当抽运功率增加到 330 mW 时,掺镱光纤放大器的平均输出功率为

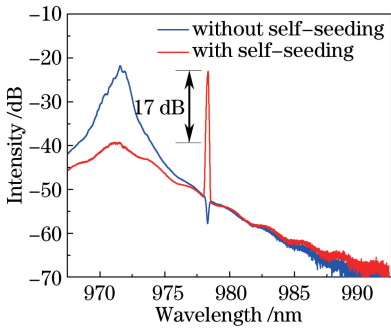


图 3 种子光自注入前半导体激光器输出光谱(蓝色)与种子光自注入后半半导体激光器输出光谱(红色)

Fig. 3 Output spectrum of diode laser before self-seeding (blue line) and output spectrum of diode laser after self-seeding (red line)

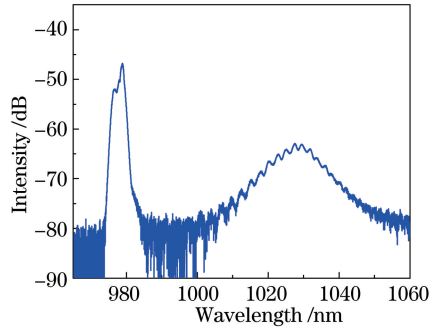


图 4 掺镱光纤放大器 ASE 光谱

Fig. 4 ASE spectrum of Yb-doped fiber amplifier

115 mW, 相应的斜率效率为 45%, 放大器光光转换效率为 34.8%。此时测得掺镱光纤放大器输出激光脉冲宽度与半导体激光种子源的输出激光脉冲宽度相同, 图 6 为此时掺镱光纤放大器输出激光脉冲序列。从图 6 中可以看出, 掺镱光纤放大器输出激光脉冲串具有一定的稳定性, 没有出现明显的幅值抖动以及周期性抖动; 放大后脉冲后沿出现了小“台阶”, 这是由于直流偏置过大导致调制脉冲后沿出现了微小拖尾, 该现象可以通过减小直流偏置的方式加以抑制。

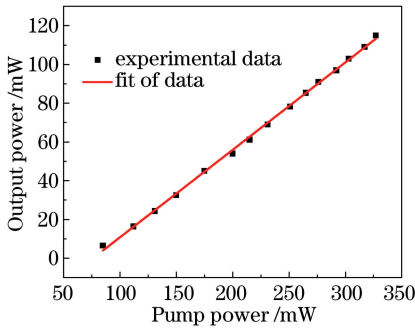


图 5 掺镱光纤放大器平均输出功率随 915 nm 注入抽运功率的变化

Fig. 5 Average output power of YDFA versus 915 nm injection pump power

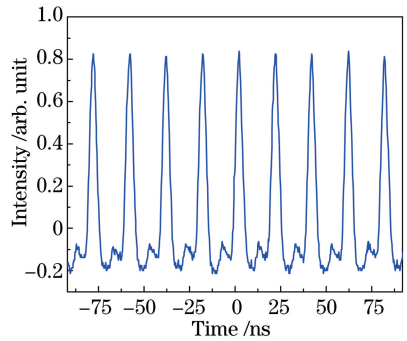


图 6 掺镱光纤放大器在最大输出功率下的输出脉冲序列

Fig. 6 Output pulse train of YDFA at maximum output power

图 7 为掺镱光纤放大器平均输出功率为 115 mW 时的输出光谱, 其光谱中心波长为 978.3 nm, 因为放大过程中并未出现明显的非线性效应, 放大后的光谱带宽与半导体激光种子源的光谱带宽基本相同, 放大后 3 dB 光谱带宽为 0.11 nm, 光学信噪比达 25 dB。由于掺镱光纤放大器采用纤芯抽运方式, 并且放大器采用

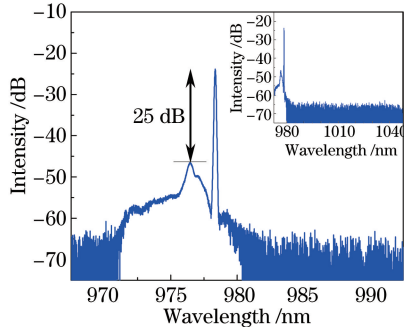


图 7 掺镱光纤放大器在最大输出功率下的输出光谱

Fig. 7 Output spectrum of YDFA at maximum output power

了较短的增益光纤长度,使得增益光纤纤芯中抽运功率密度较高,能够持续满足 980 nm 处的粒子数反转条件,从而掺镱光纤放大器的优势振荡波长始终保持在 980 nm 附近,1030 nm 波段的 ASE 被抑制。从图 7 中可以看出,当掺镱光纤放大器平均输出功率为 115 mW 时,1030 nm 波段并未出现明显的 ASE 现象。

4 结 论

提出一种基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱光纤激光器。结合半导体激光器调制技术与种子光自注入技术实现了输出脉冲宽度为 4.5 ns、脉冲重复频率在 10~50 MHz 范围内可调谐的半导体脉冲激光种子源,其光谱中心波长为 978.3 nm,3 dB 光谱带宽为 0.10 nm。将该半导体脉冲激光种子源的输出在一级单模单包层掺镱光纤放大器中进行放大,当种子源输出脉冲重复频率为 50 MHz 时,掺镱光纤放大器最大平均输出功率为 115 mW,对应光谱中心波长为 978.3 nm,3 dB 光谱带宽为 0.11 nm。整个激光器采用全光纤设计,系统结构简单,输出脉冲参数可调,输出光束质量接近衍射极限。但受限于目前的实验条件,本文只采用了单包层掺镱光纤放大器,导致平均输出功率水平有限,并且半导体种子源调制重复频率偏高,不利于获得高峰值功率激光脉冲。在下一步工作中,将采用纤芯/内包层直径比为 20 μm /128 μm 的大芯径双包层掺镱光纤和高功率的 915 nm 多模半导体激光抽运源搭建一级包层放大器对该脉冲激光源进行放大,同时降低半导体种子源调制重复频率以提高激光脉冲峰值功率,进而倍频实现 489 nm 蓝绿光输出。

参 考 文 献

- Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.* Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138.
楼祺洪, 周 军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138.
- Luo Wei, Dong Wenfeng, Yang Huabing, *et al.* Development trend of high power lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 845-852.
罗 威, 董文锋, 杨华兵, 等. 高功率激光器发展趋势 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(8): 845-852.
- Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2 μm Wavelength [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601002.
王 璞, 刘 江. 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601002.
- Laroche M, Bartolacci C, Cadier B, *et al.* Generation of 520 mW pulsed blue light by frequency doubling of an all-fiberized 978 nm Yb-doped fiber laser source [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3909-3911.
- Soh D B, Codemard C, Wang S, *et al.* A 980 nm Yb-doped fiber MOPA source and its frequency doubling [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 1032-1034.
- Liu Ying, Cao Jianqiu, Xiao Hu, *et al.* Current status and future perspective of 980 nm fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 48(8): 53-57.
刘 莹, 曹涧秋, 肖 虎, 等. 980 nm 光纤激光器发展现状与展望 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 48(8): 53-57.
- Nilsson J, Minelly J D, Paschotta R, *et al.* Ring-doped cladding-pumped single-mode three-level fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 355-357.
- Zenteno L A, Minelly J D, Dejneka M, *et al.* 0.65 W single-mode Yb-fiber laser at 980 nm pumped by 1.1 W Nd:YAG [C]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 2000, 34: 440-443.
- Yla-Jarkko K H, Selvas R, Son D B. A 3.5 W 977 nm cladding-pumped jacketed air-clad ytterbium-doped fiber laser [C]. *OSA ASSP*, 2003: 103.
- Roser F, Jauregui C, Limpert J, *et al.* 94 W 980 nm high brightness Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17310-17318.
- Boullet J, Zaouter Y, Desmarchelier R. Single mode fiber laser emitting 94 W at 977nm [C]. *OSA ASSP*, 2009: TuA3.
- Li Pingxue, Zhang Xuexia, Zou Shuzhen, *et al.* A quasi-continuous-wave 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1688-1691.
李平雪, 张雪霞, 邹淑珍, 等. 980 nm 准连续单模掺镱光纤激光器及放大器实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1688-1691.
- Boullet J, Dubrasquet R, Bello-Doua R. High average power, high energy fiber laser system: operation at 977 nm and frequency doubling at 488 nm [C]. *OSA ASSP*, 2010: AwA5.

- 14 He J, Du S T, Wang Z W, *et al.* Linearly-polarized short-pulse AOM Q-switched 978 nm photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29149-29254.
- 15 Dupriez D, Piper A, Malinowski A, *et al.* High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(9): 1013-1015.
- 16 Malinowski A, Gorman P, Codemard C A, *et al.* High-peak-power, high-energy, high-average-power pulsed fiber laser system with versatile pulse duration and shape[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22): 4686-4689.
- 17 Sobon G, Kaczmarek P, Antonczak A, *et al.* Pulsed dual-stage fiber MOPA source operating at 1550 nm with arbitrarily shaped output pulse[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(4): 721-727.
- 18 Shi Hongxing, Liu Jiang, Liu Kun, *et al.* Hundred-watt-level linearly-polarized diode-seeded nanosecond thulium-doped fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 31-35.
师红星, 刘 江, 刘 昆, 等. 基于半导体激光器调制技术的百瓦级线偏振纳秒掺铥光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 31-35