

全光纤环形腔多程脉冲放大特性

刘丰年^{1,2} 王文亮¹ 冷进勇¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; ² 湖南工业大学计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要 构建全光纤环形腔放大器,对重复频率在 10~50 kHz 范围、脉宽数百纳秒的调 Q 脉冲进行多程放大。本实验研究未对脉冲放大程数进行控制,讨论了脉冲多程放大的增益特性及脉冲时域波形演变特性;该放大系统自动改变脉冲重复频率。实验得到多程放大增益相对于单程放大的增益,最大可提高 7 dB 以上。研究结果表明,对于重复频率在 10kHz 及以下的脉冲,采用环形腔多程放大将显著提高放大器的转换效率和信号增益。实验研究为更低重复频率的脉冲实现全光纤再生放大打下基础。

关键词 光纤光学; 脉冲激光放大器; 环形腔多程放大; 全光纤; 低占空比脉冲

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0702006

Characteristics of All-Fiber Ring Cavity Multi-Pass Pulse Amplifier

Liu Fengnian^{1,2} Wang Wenliang¹ Leng Jinyong¹

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² School of Computer and Communications, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China

Abstract Based on the all-fiber ring-cavity multi-pass pulse amplifier, pulses of Q-switched with a few hundred nanosecond duration and repetition rate of 10~50 kHz range are amplified. Although the number of pass is not controlled, some important phenomena such as characteristics of gain and time domain evaluation in multi-pass amplification are acquired, and the output frequency of pulse is changed by the ring-cavity multi-pass amplifier. A gain of 7 dB higher than that of single pass amplification is obtained. Experimental results demonstrate that signal gain and conversion efficiency can be greatly enhanced by using ring cavity multi-pass amplification for a pulse repetition rate of 10 kHz or lower than that. The results can be helpful to investigation on all-fiber regenerative amplifier.

Key words fiber optics; pulse laser amplifier; ring-cavity multi-pass amplification; all-fiber; low-duty-cycle pulse

OCIS codes 140.3280; 140.3538; 140.3560; 140.4480

1 引 言

高功率、高能量脉冲在工业加工以及非线性(如拉曼激光/放大器、超连续谱产生)等领域具有广泛的应用价值。通常情况下,高功率脉冲在低占空比下获得。但低占空比脉冲在放大时,对放大器上能级粒子数的提取能力有限,致使放大自发辐射(ASE)积累而产生 ASE 噪声以及寄生激射噪

声^[1]。如何在提高脉冲放大的功率和单脉冲能量的同时,抑制 ASE 和寄生激射噪声,是低占空比脉冲放大的技术关键。最初对低占空比脉冲采用级联单程放大,脉冲能量输出达 4.5 mJ^[2-4]。该方案典型特点是单模光纤(SMF)预放大与大模面积光纤功率放大级联,并且采用光纤耦合与空间耦合相结合的方式,重复频率在千赫兹量级。对于重复频率更

收稿日期: 2012-12-26; 收到修改稿日期: 2013-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(61235008,61077076,10904173,11004247)、中国博士后科学基金(2012M512166)

作者简介: 刘丰年(1974—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光和放大器等方面的研究。E-mail: 836354185@qq.com

低的脉冲(如数百赫兹及以下),级联多级放大已不再为首选方案。采用的关键技术包括:再生预放大技术、多程功率放大技术、啁啾技术和脉冲抽运技术。以上方法的综合利用已使波长为 1030 nm、重复频率为 100 Hz 范围的单脉冲能量达 100 mJ 左右^[5-7],但整个系统均采用空间结构。

为了实现简捷又紧凑的高能量脉冲放大系统,本文采用全光纤环形腔多程预放大技术,对重复频率在 10~50 kHz 范围的 1064 nm 脉冲进行多程放大,但未对脉冲进行放大程数进行控制,研究了环形腔脉冲多程放大的增益特性及脉冲时域波形演变特性,为下一步对更低重复频率脉冲的全光纤再生放大(对脉冲放大程数进行精确控制^[8])打下基础。

2 实验装置

如图 1 所示,脉冲源为自行搭建的 10~50 kHz 调 Q 脉冲,对于每个重复频率,脉宽均为 500 ns,占空

比(0.5T, T 为脉冲周期)为 50%,通过隔离器注入环形放大器,其中利用一个 2×1 的 3 dB 耦合器对种子光和环形腔内放大再生信号进行耦合;一个 30:70 耦合器将放大脉冲能量的 70%耦合输出,30%能量耦合回腔内。此耦合器比例还可以更小,如 10:90、5:95 等。采用的高掺镱单模光纤长度约为 30 cm,带通滤波器(BPF)抑制 ASE 引起的自激振荡。

实验的基本原理如下:对于重复频率为 10~50 kHz 的脉冲,周期在 100~20 μs 范围内。图 1 所示的实验结构中,精确测量各器件的光纤长度,并补充了一定长度的无源单模光纤,所构建的环形腔长度约为 40 m,则脉冲单程行进时间为 0.2 μs。脉冲周期为行进时间的 100~500 倍。放大脉冲的 30%通过 3 dB 耦合器进入放大器,因此相当于腔内能量的 30%的一半,即 15%。随着程数增加,放大器逐渐达到增益饱和,则腔内趋于稳定状态,输出能量趋于稳定。

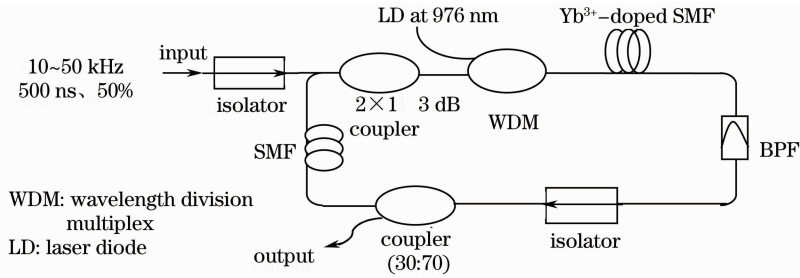


图 1 全光纤环形腔多程脉冲放大器

Fig. 1 All-fiber ring cavity multi-pass pulse amplifier

3 实验结果及分析

3.1 不同重复频率的脉冲放大时域演变特征

实验中腔外调制电脉冲的脉宽 τ 为 500 ns,输入重复频率 f_{in} 分别为 10、20、30、40、50 kHz。经过环形腔放大后,相应的脉宽和重复频率都发生了变化,如图 2(a)~(d)所示(因篇幅关系,输入重复频率为 50 kHz 时的输出脉冲序列未给出)。光谱成份无明显变化,如图 3(a)所示。将脉冲周期和脉冲在环形腔内的行进时间 t 的倍数关系、输出信号的重复频率与输入信号频率的倍数关系随输入信号重复频率变化的特性如图 3(b)所示。结果表明:信号输入重复频率较低和较高时,频率改变的倍数较小,输入重复频率在 20~40 kHz 范围对重复频率改变作用明显。这一实验结果可以从环形腔多程放大过程分析如下:每个脉冲在所有光纤长度约为 40 m 的环形放大器内单程行进时间约为 0.2 μs。在重复

频率分别为 10~50 kHz 时,脉冲周期是脉冲放大过程的单程行进时间的 100 倍以上。该环形放大器每次单程放大后都有脉冲输出,因此理论上,脉冲输出的重复频率应该也是输入重复频率的 100 倍以上。但是在控制环形腔长过程时,测量误差致使脉冲的行进时间并非精确为 0.2 μs,因此脉冲周期并非为脉冲单程行进时间的整数倍。这种不呈整数倍的关系,使得改变后的重复频率呈现随机性,而不是理论值。对于输入的重复频率在 20~50 kHz 范围内,输出重复频率与输入重复频率的倍数呈下降趋势,跟理论基本吻合;在输入信号重复频率为 10 kHz 时,实验结果与理论分析相差很大,后续研究中将进一步分析。环形腔多程放大的这种自动改变重复频率特性对脉冲放大具有可挖掘的研究价值。

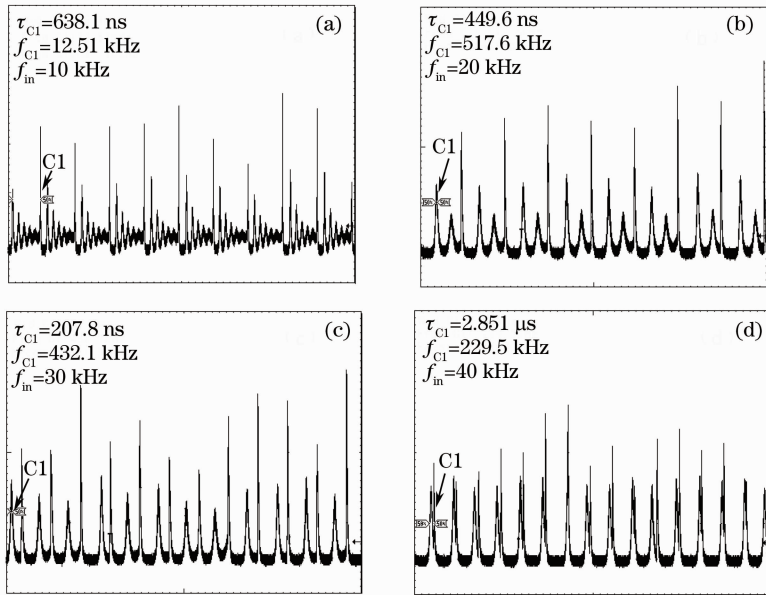


图2 重复频率分别为(a) 10、(b) 20、(c) 30、(d) 40 kHz时脉冲输出的重复频率及脉宽变化

Fig.2 Output repetition rate of (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40 kHz and pulse width versus changes of input repetition rate

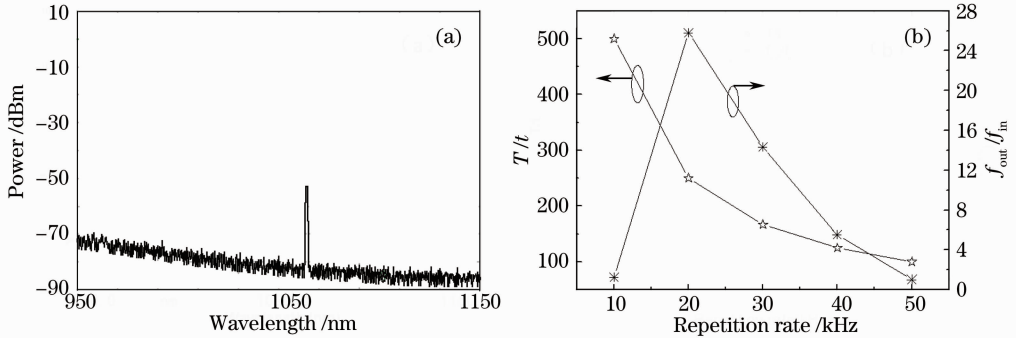


图3 (a) 脉冲输出光谱图；(b) 脉冲周期和脉冲在环形腔内的行进时间倍数关系(T/t)、输出信号的重复频率(f_{out})与输入信号频率(f_{in})的倍数关系(f_{out}/f_{in})随输入信号重复频率变化的特性

Fig.3 (a) Optical spectrum of output pulse; (b) ratios of T (pulse period) and t (transmission time), f_{out} and f_{in} versus changes of f_{in}

3.2 不同重复频率的脉冲放大的增益和转换效率的特征

实验研究结果如图4(a)所示,从放大输出的增益看出,脉宽较小的脉冲放大增益高于较宽脉冲的放大增益。说明环形腔多程放大对脉宽较小的脉冲增益提高明显。且当脉宽为500 ns时,放大输出增益随重复频率的增加总体上呈降低趋势。从放大器理论解释可以为:脉宽小,每个脉冲包含的光子数较少,因此可以视为小信号脉冲,尤其在低重复频率的时候(如10 kHz)。故小信号增益高于脉宽较宽的信号增益。随重复频率的增加,脉冲信号单位时间内所包含的光子数增多,因此增益具有降低趋势。对于占空比为50%脉冲,信号已不能视为小信号,环形多程放大极易达到增益饱和。因此占空比为

50%的脉冲多程放大时增益较低且随重复频率的增加变化幅度小于1 dB。

3.3 单程放大和多程放大的增益与转换效率分析

实验中保持信号输入重复频率为10 kHz,改变输入信号占空比。比较单程放大和多程放大的增益和转换效率。研究结果如图4(b)所示。实验结果表明,在低重复频率(10 kHz)下,多程放大的增益和转换效率均高于单程放大的增益和转换效率。多程放大的转换效率随占空比的减小而降低,但降低幅度小于单程放大时的降低幅度。说明多程放大能显著提高低重复频率脉冲放大的转换效率;尤其对低占空比的脉冲,转换效率提高14%以上。实验结果还表明,占空比越小,多程放大增益相对单程放大提高越显著。在占空比为10%时,增益提高7 dB以上。

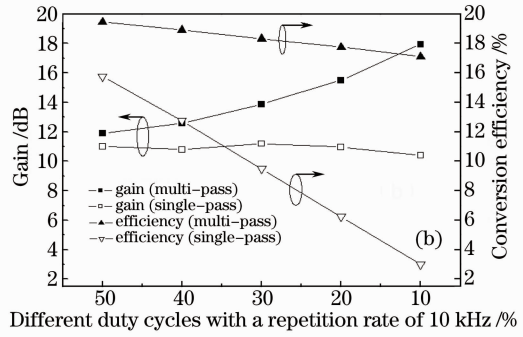
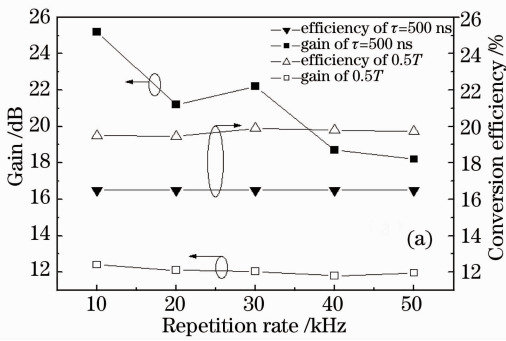


图 4 (a) 不同脉宽的脉冲放大输出增益和转换效率随重复频率的变化;

(b) 输入重复频率为 10 kHz 的脉冲放大输出信号的增益与转换效率随占空比变化的关系

Fig. 4 (a) Conversion efficiency and gain for different widths versus changes of input repetition rate;

(b) conversion efficiency and gain of multi-pass or single-pass amplification versus changes of duty cycle

4 结 论

构建环形腔多程放大器,对自行搭建的调 Q 脉冲进行多程放大。实验结果表明:不对脉冲进行放大程数控制,该放大系统自动改变脉冲重复频率;对低重复频率和低占空比脉冲,相对于单程放大,环形腔多程放大能够显著提高放大增益和转换效率。实验研究结果对低重复频率和低占空比脉冲放大具有借鉴意义。在本实验研究中,如果采用脉冲单选,对多程脉冲放大实现程数控制,使放大脉冲能量达到最大时输出,同时单选出来的后一个脉冲,从而实现低重复频率全光纤再生放大。对脉宽更窄的(50ns 以下)低重复频率脉冲实现全光纤单选再生放大的研究将在后续工作中开展。

参 考 文 献

- 1 J R Marciante, J D Zuegel. High-gain, polarization-preserving, Yb-doped fiber amplifier for low-duty-cycle pulse amplification [J]. Appl Opt, 2006, 45(26): 6798-6804.
- 2 F D Teodoro, C D Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses[J]. Opt Lett, 2005, 30(24): 3299-3301.

- 3 Wang Xiaochao, Fan Wei, Chang Liping, *et al.*. 100 ps pulse amplification in ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1379-1384.
- 汪小超, 范 薇, 常丽萍, 等. 百皮秒脉冲在掺镱双包层光纤放大器中的放大[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1379-1384.
- 4 Almantas Galvanauskas, Ming-Yuan Cheng, Kai-Chung Hou, *et al.*. High peak power pulse amplification in large-core Yb-doped fiber amplifiers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 559-566.
- 5 D N Papadopoulos, A Pellegrina, L P Ramirez, *et al.*. Broadband high-energy diode-pumped Yb : KYW multipass amplifier[J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3816-3818.
- 6 Wang Xiangfeng, Dai Yaping, Wang Tao, *et al.*. Optimization design of 1 J-level optical parametric chirped-pulse amplification system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702009.
- 王翔峰, 戴亚平, 王 韬, 等. 焦耳级光参量啁啾脉冲放大系统的优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702009.
- 7 A H Curtis, B A Reagan, K A Wernsing, *et al.*. Demonstration of a compact 100 Hz, 0.1 J, diode-pumped picosecond laser[J]. Opt Lett, 2011, 36(11): 2164-2166.
- 8 Hua Lin, Jinfeng Li, Jinping He, *et al.*. High-power picoseconds regenerative amplifier based on CW diode side-pumped Nd:YAG with high beam quality[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(8): 081404.

栏目编辑:王晓琰