

双波长 1.0 μm 调 Q 和 1.5 μm 增益开关 脉冲光纤激光器

刘伟琪¹, 郭春雨², 阮双琛², 余 军¹, 陈业旺¹, 罗若恒², 朱逸怀²

¹深圳大学电子科学与技术学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学光电工程学院深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 采用铒镱共掺光纤, 实现了一种双波长 1.0 μm 调 Q 和 1.5 μm 增益开关脉冲光纤激光器。实验装置是一个双环腔结构, 两环的公共端共用一段铒镱共掺光纤。1.0 μm 调 Q 脉冲通过未抽运铒镱共掺光纤的可饱和吸收效应产生。而铒镱共掺光纤对 1.0 μm 调 Q 脉冲的再吸收会周期性调制铒离子的反转粒子数, 从而产生重复频率相等的 1.5 μm 增益开关脉冲。随着抽运功率的增加, 这两种脉冲的重复频率从 5.4 kHz 增加到 11.7 kHz。1.5 μm 脉冲相对 1.0 μm 脉冲有一定的延迟, 并且延迟时间随着抽运功率的增大而不断减小。在最大抽运功率处, 1.0 μm 脉冲宽度、单脉冲能量和最大平均输出功率分别是 5.3 μs 、402.6 nJ 和 4.7 mW, 而对于 1.5 μm 脉冲, 分别是 4.6 μs 、374.4 nJ 和 4.4 mW。

关键词 激光器; 双波长脉冲光纤激光器; 调 Q; 增益开关; 铒镱共掺光纤

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801004

Dual-Wavelength 1.0 μm Q-Switched and 1.5 μm Gain Switched Pulsed Fiber Laser

Liu Weiqi¹, Guo Chunyu², Ruan Shuangchen², Yu Jun¹, Chen Yewang¹,
Luo Ruoheng², Zhu Yihuai²

¹Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University,
Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A dual-wavelength 1.0 μm Q-switched and 1.5 μm gain-switched pulsed fiber laser is demonstrated by using a single Er/Yb co-doped gain fiber. Experimental setup consists of two loop resonators with one common branch including the Er/Yb co-doped fiber. The 1.0 μm Q-switched pulses are generated via the saturable absorption effect of the unpumped Er/Yb co-doped fiber, whereas a reabsorption of 1.0 μm Q-switched pulses from the Yb ions modulates the population inversion of Er ions periodically to generate 1.5 μm gain-switched pulses at the same repetition rate of 1.0 μm Q-switched pulses. With the increase of pump power, the repetition rates of both pulses vary from 5.4 kHz to 11.7 kHz. However, the 1.5 μm pulses have a delay relative to 1.0 μm pulses, and the delay decreases with the increase of pump power. At the maximum pump power, the pulse duration, single pulse energy and average output power for 1.0 μm pulses are 5.3 μs , 402.6 nJ and 4.7 mW respectively, whereas

收稿日期: 2017-02-22; **收到修改稿日期:** 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61308049)、国家 863 计划(2015AA021102)、广东省优秀青年教师培养项目(YQ2015142)、深圳市科技项目(JCYJ20130329103213543, JCYJ20140418091413568)

作者简介: 刘伟琪(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器种子源及放大器等方面的研究。

E-mail: 401042606@qq.com

导师简介: 郭春雨(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤激光器及超连续谱等方面的研究。

E-mail: cyguo@szu.edu.cn(通信联系人)

they are 4.6 μs , 374.4 nJ and 4.4 mW respectively for 1.5 μm pulses.

Key words lasers; dual-wavelength pulsed fiber lasers; Q-switched; gain-switching; Er/Yb co-doped fiber

OCIS codes 140.3510; 140.3538; 140.3540

1 引 言

双波长同步脉冲光纤激光器在非线频率转换、生物医学、抽运探测光谱和拉曼散射光谱等领域具有广泛的应用^[1-4]。起初,双波长同步脉冲光纤激光器主要基于一种增益光纤来实现^[5-6],但这种方案产生的两个波长间隔较小,并且需要抑制腔内模式竞争^[7]。为了获得波长间隔大的双波长同步脉冲,有人采用两种增益光纤来实现。2004年,Rusu等^[8]将掺Yb和掺Er增益光纤级联到同一线性腔中,并基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现了1040 nm/1550 nm双波长同步锁模脉冲输出。随后,采用双环腔结构并基于两种增益光纤的双波长同步锁模光纤激光器也被论证^[9-10]。相比同步锁模光纤激光器,同步调Q光纤激光器不容易受腔长失配的影响,并且具有脉冲能量高,重复频率可变和波长可调谐性好等优势。2014年,Wu等^[11]采用掺Yb和Er/Yb共掺两种增益光纤,并通过共用一个石墨烯可饱和吸收体(SA)实现了1.06 μm /1.53 μm 双波长同步调Q光纤激光器。2016年,Jia等^[12]采用类似的结构获得1.48 μm /1.85 μm 双波长同步调Q脉冲输出。此外,还有基于光纤可饱和吸收体(FSA)的双腔光纤激光器^[13-14],其内腔增益光纤为FSA,外腔增益光纤产生的激光在此FSA的作用下产生调Q脉冲,同时内腔增益光纤对此调Q脉冲的吸收会周期性调节内腔的增益,从而产生重复频率相等的增益开关脉冲。尽管这两个波长的脉冲在时间上有一定的延迟,但通过改变这两种脉冲的光程也可以实现同步。2012年以来,Li等^[15-17]通过使用掺钛氟化物光纤,并基于钛离子的级联跃迁实现了重复频率相等的2 μm /3 μm 双波长调Q或增益开关脉冲光纤激光器。该方案通过一种增益光纤获得了波长间隔大的双波长脉冲激光,激光器结构更简化,工作更高效。另一种可行的方案是采用两种或两种以上离子掺杂的增益介质^[18]。目前,基于Er/Yb共掺光纤(EYDF)已获得了1.0 μm /1.5 μm 双波长连续激光输出^[19-20],但仍未有1.0 μm /1.5 μm 双波长脉冲光纤激光器的相关报道。

本文介绍了一种基于EYDF的全光纤化双波长1.0 μm 调Q和1.5 μm 增益开关脉冲光纤激光器。这两种脉冲的重复频率相等,其中1.0 μm 调Q脉冲产生于未抽运EYDF的可饱和吸收效应,而1.5 μm 增益开关脉冲由1.0 μm 调Q脉冲抽运产生。

2 实验装置及原理

全光纤化双波长脉冲光纤激光器实验装置如图1所示,其中包括简化的Er:Yb能级图。实验装置包含两个环形谐振腔(1.0 μm loop和1.5 μm loop),其公共端有一段1.7 m长的单包层高掺杂EYDF(EY305, Coractive,加拿大),在975 nm处的吸收高达1335 dB/m。抽运源是一个波长为975 nm、最大输出功率为623 mW的单模激光二极管(LD),抽运光通过两个串联的自制980/1064&1550 nm波分复用器(WDM)耦合到腔内。此980/1064&1550 nm WDM确保了1.0 μm 和1.5 μm 这两个波段的激光都能通过公共端。与抽运源直接连接的980/1064&1550 nm WDM用来保护LD不被后向传输的1.0 μm 和1.5 μm 激光损坏。所产生的1.0 μm 和1.5 μm 激光通过两个熔融型的1064/1550 nm WDM耦合和分离,另外两个1064/1550 nm WDM用来滤除两腔中剩余的1.0 μm 或1.5 μm 激光,从而确保每个腔的稳定性。两环中的偏振敏感隔离器(PS-ISO)确保了激光单向传输,偏振控制器(PC)用来优化激光输出。最后,两环各通过一个10/90的光纤耦合器(OC)将10%的1.0 μm 和1.5 μm 激光能量分别输出。这两个环的腔长大致相等,约15.7 m。

上述实验装置初步测量了双波长脉冲的基本特性。对实验装置进行改进,将两环中的OC移除,并在公共端插入一个对1064 nm激光50%输出,对1550 nm激光20%输出的OC来研究两种脉冲激光的关系,如图1中虚线框所示,此OC输出端还通过连接一个1064/1550 nm WDM来区分并分离这两种脉冲。

此双波长脉冲激光的输出特性通过以下仪器来测量:光谱仪(OSA, AQ6370B, YOKOGAWA, 日本)、1 GHz的数字荧光示波器(DPO, 7014C, Tektronix, 美国)、3 GHz的射频频谱分析仪(N9320A, Agilent, 美国)和光电探测器(D-100ir Detector, Newport, 美国)。

如图1中简化的Er:Yb能级图所示,由于Yb离子在抽运波长(975 nm)的吸收截面远远大于Er离子,

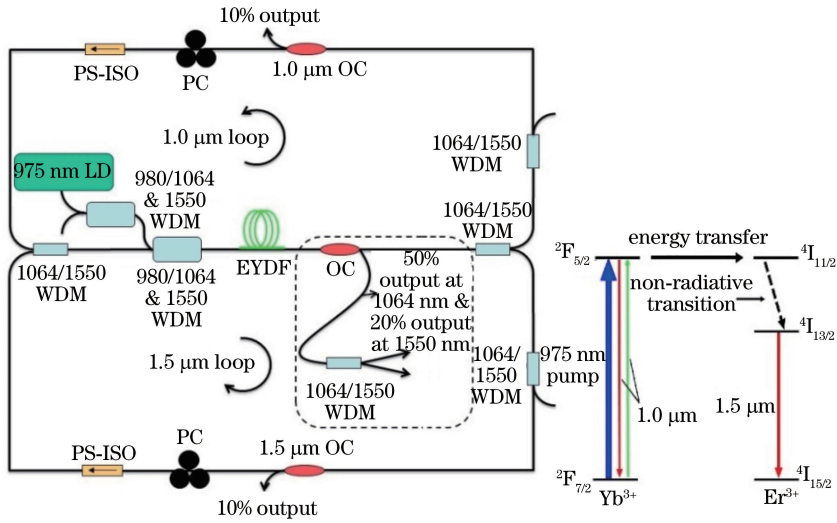


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

因此绝大部分抽运光被 Yb 离子吸收,并将 Yb 离子从基态 $^2F_{7/2}$ 能级跃迁到 $^2F_{5/2}$ 能级。实验所用的 EYDF 在 975 nm 处的吸收高达 1335 dB/m,因此 Yb 离子向 Er 离子的能量转移容易出现瓶颈效应^[21],此时处于 $^2F_{5/2}$ 能级的 Yb 离子会出现两种现象:其中一种是通过 Yb 离子共振的非辐射能量转移,Er 离子从基态 $^4I_{15/2}$ 能级跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级,随后 Er 离子通过快速的非辐射跃迁从 $^4I_{11/2}$ 能级跃迁到 $^4I_{13/2}$ 能级,当 Er 离子在 $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ 能级间实现粒子数反转分布时,辐射出 1.5 μm 激光;另外一种 Yb 离子在 $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$ 能级间实现粒子数反转分布时辐射出 1.0 μm 激光。此外,1.0 μm 激光还可以被 Yb 离子再吸收作为 1.5 μm 激光辐射的二级抽运^[21-22]。实验产生 1.0 μm 和 1.5 μm 双波长脉冲的机理与基于 FSA 的双腔光纤激光器^[13-14]类似:由于实验所用的 EYDF 在 975 nm 处的吸收很高,而长度较长,因此较短长度的 EYDF 就可以把抽运光全部吸收,剩余长度为未抽运 EYDF。未抽运 EYDF 1.0 μm 激光有可饱和吸收效应,但其弛豫时间很长,大约是 Er 离子 $^4I_{13/2}$ 能级的寿命(约 10 ms),因此不是一个有效的 FSA^[23]。将未抽运 EYDF 置于 1.5 μm 环中并在腔内形成 1.5 μm 激光振荡,可以有效降低其弛豫时间,从而成为一个有效的 Q 开关。增加抽运功率,当 1.0 μm 环中的激光功率密度足以使 FSA 漂白时,产生 1.0 μm 调 Q 脉冲。同时,1.0 μm 调 Q 脉冲被 Yb 离子再吸收,并通过共振的非辐射能量转移以及快速的非辐射跃迁过程周期性调制 Er 离子 $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ 能级间的粒子数分布,最终产生重复频率相等的 1.5 μm 增益开关脉冲,这类似于 900 nm 或 975 nm 脉冲抽运的增益开关 EYDF 激光器^[24-25]。

3 实验结果及分析

当抽运功率为 470 mW 时,1.0 μm 调 Q 脉冲和 1.5 μm 增益开关脉冲同时出现,重复频率相等。抽运功率增加到 477 mW 时,两种脉冲稳定存在且重复频率均为 5.4 kHz。如图 2 所示,在抽运功率从 477 mW 增加到最大值 623 mW 的过程中,两脉冲重复频率相等且同时从 5.4 kHz 增加至 11.7 kHz。对比 1.0 μm 脉冲,1.5 μm 脉冲在较高抽运功率下出现一个拖尾,这是增益开关脉冲常见的一个特征^[26]。

在最大抽运功率 623 mW 下,这两种脉冲的中心波长分别是 1046.4 nm 和 1545.5 nm,如图 3(a)、(b)所示,相应的 3 dB 谱宽分别是 1.18 nm 和 0.72 nm。1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲的频谱分别如图 3(c)、(d)所示,其中 1.0 μm 脉冲和 1.5 μm 脉冲的信噪比(SNR)分别是 48 dB 和 41 dB,这表明两种脉冲都处于稳定状态。

图 4 为 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲宽度和脉冲能量随注入抽运功率的变化曲线。如图 4 所示,随着抽运功率的增加,1.0 μm 脉冲宽度不断减小,同时脉冲能量不断增加。类似地,1.5 μm 脉冲能量随抽运功率的增加而不断增加,而脉冲宽度先变小,然后几乎保持不变。在最大抽运功率处,1.0 μm 脉冲宽度、单脉冲能量和最大平均输出功率分别是 5.3 μs 、402.6 nJ 和 4.7 mW,而对于 1.5 μm 脉冲,分别是 4.6 μs 、374.4 nJ 和 4.4 mW。

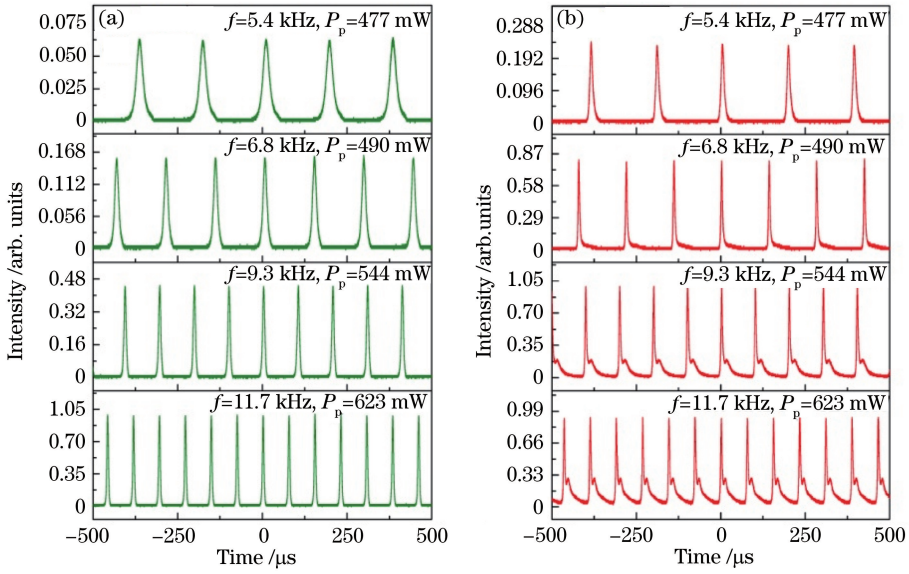


图 2 不同抽运功率下的脉冲序列。(a) 1.0 μm 脉冲序列;(b) 1.5 μm 脉冲序列

Fig. 2 Pulse trains under different pump powers. (a) 1.0 μm pulse trains; (b) 1.5 μm pulse trains

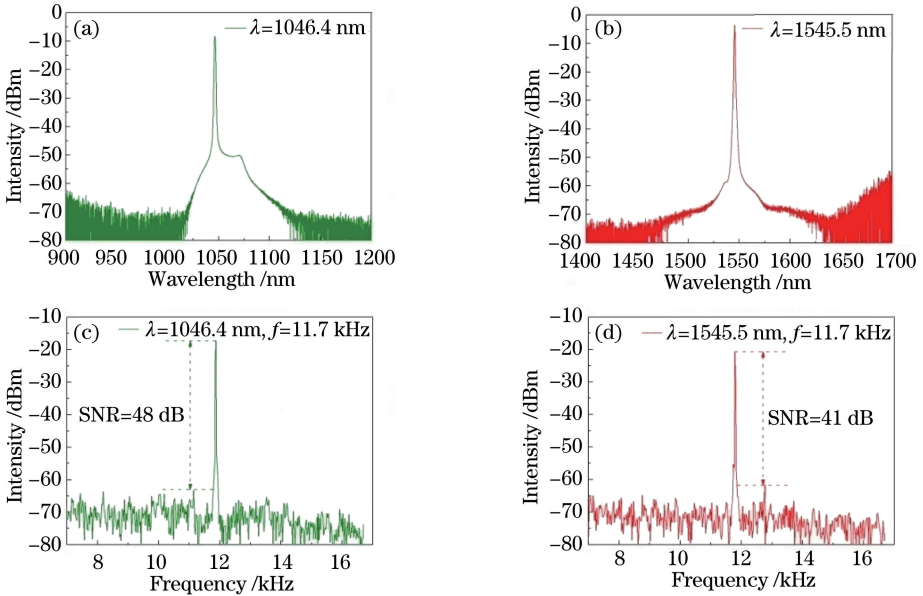


图 3 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲光谱图及其频谱图。(a) 1.0 μm 脉冲光谱;(b) 1.5 μm 脉冲光谱;

(c) 1.0 μm 脉冲频谱;(d) 1.5 μm 脉冲频谱

Fig. 3 Optical spectra and corresponding frequency spectra of 1.0 μm and 1.5 μm pulses. (a) Optical spectrum of

1.0 μm pulses; (b) optical spectrum of 1.5 μm pulses; (c) frequency spectrum of 1.0 μm pulses;

(d) frequency spectrum of 1.5 μm pulses

通过使用改进后的实验装置来研究 1.0 μm 和 1.5 μm 这两种脉冲之间的关系。当抽运功率为 544 mW 时,观察到两个稳定、重复频率相等的脉冲序列,如图 5 所示。此时这两脉冲重复频率皆为 4.8 kHz,脉冲延迟时间大约是 26 μs 。如图 1 虚线框所示,从耦合器输出端接一个 1064/1550 nm 的 WDM 将 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲分开,发现 1.5 μm 脉冲在 1.0 μm 脉冲之后(图 5),这与 1.0 μm 和 1.5 μm 双波长脉冲产生的机理相符合。此外,两脉冲的延迟时间随着抽运功率的增加而逐渐减小,这是因为随着抽运功率的增加,1.0 μm 调 Q 脉冲的脉冲宽度不断减小,脉冲能量不断增加,1.0 μm 脉冲被 Yb 离子再吸收后最终使 Er 离子 $^4I_{13/2} - ^4I_{15/2}$ 能级间更快形成粒子数反转,因而 1.5 μm 增益开关脉冲更快形成。在最大抽运功率处,两种脉冲完全重叠,如图 6 所示。此时两脉冲的联合光谱如图 6(a) 所示,光谱有两个峰值波长,分别是

1059.5 nm和 1536.0 nm。图 6(b)、(c)分别是利用 1064/1550 nm 的 WDM 分开的 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲序列,重复频率都是 9 kHz。

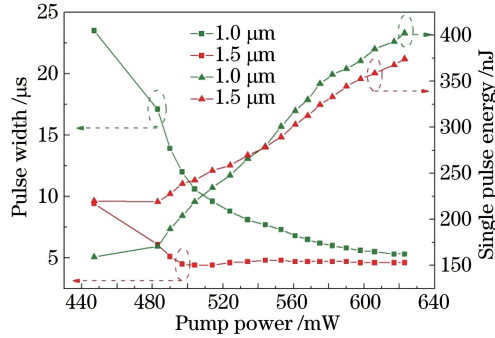


图 4 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲宽度和单脉冲能量随注入抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Curves of pulse width and single pulse energy at 1.0 μm and 1.5 μm versus the incident pump power

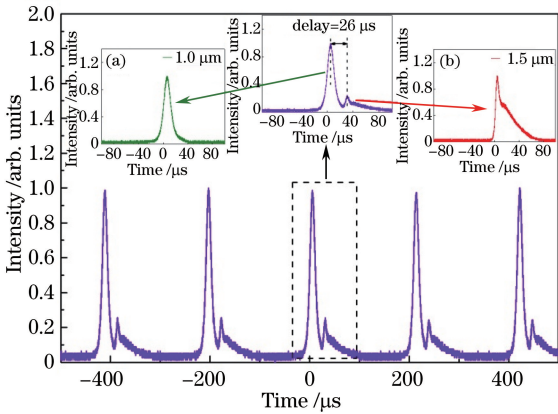


图 5 当抽运功率为 544 mW 时从公共端输出的脉冲序列。

(a) 1.0 μm 单脉冲;(b) 1.5 μm 单脉冲

Fig. 5 Output pulse trains from the common branch when

pump power is 544 mW. (a) 1.0 μm single pulse;

(b) 1.5 μm single pulse

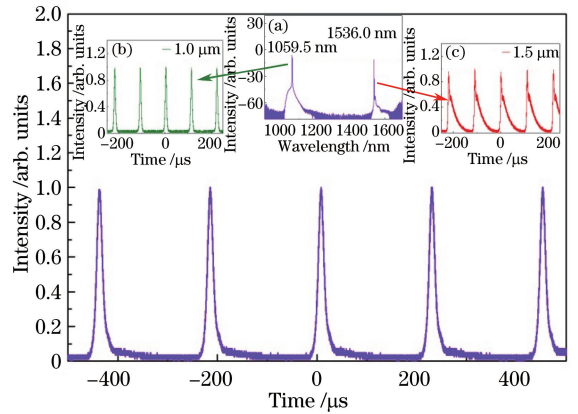


图 6 当抽运功率为 623 mW 时从公共端输出的脉冲序列。

(a) 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲联合光谱;

(b) 1.0 μm 脉冲序列;(c) 1.5 μm 脉冲序列

Fig. 6 Output pulse trains from the common branch when

pump power is 623 mW. (a) 1.0 μm and 1.5 μm pulses

combined optical spectrum; (b) 1.0 μm pulse train;

(c) 1.5 μm pulse train

通过一些定性实验进一步验证 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲的类型和产生机制。在最初实验装置基础上,将两环中的 PS-ISO 换成偏振不敏感隔离器(PI-ISO),并将两个最大损耗为 60 dB 的可调衰减器(VA)分别接入两环中来调节每个腔的损耗,同时将每个环的 PC 移除。此时在合适的抽运功率下,仍可观察到两种重复频率相等的脉冲稳定存在。考虑到此时两个腔中并没有任何偏振器件,说明这两种脉冲不是由非线性偏振旋转(NPR)效应产生的。将 1.7 m 的 EYDF 截短至 0.3 m,此长度足以将抽运光全部吸收完,此时 1.0 μm 和 1.5 μm 脉冲腔中仅有更高功率的连续光输出而并没有出现脉冲激光。这说明 1.0 μm 调 Q 脉冲是由未抽运 EYDF 的可饱和吸收效应产生的。实验中对比了 0.3, 0.5, 1.7, 2.2 m 这四种不同长度的 EYDF,除了 0.3 m 外,其余三种长度都可产生重复频率相等的 1.0 μm 调 Q 和 1.5 μm 增益开关脉冲,并且随着 EYDF 长度的增加,脉冲质量越来越好,而输出功率逐渐变小,这说明未抽运 EYDF 长度越长,可饱和吸收效应越强,但同时引入了更大的损耗。若 EYDF 长度仍为 1.7 m,断开 1.5 μm 腔或调节 1.5 μm 腔 VA 使之损耗很大而不能产生 1.5 μm 激光振荡时,1.0 μm 腔始终没有出现 1.0 μm 调 Q 脉冲。这说明未抽运 EYDF 在 1.5 μm 腔的辅助下才成为一个有效的 FSA,从而产生 1.0 μm 调 Q 脉冲。断开 1.0 μm 腔或调节 1.0 μm 腔 VA 使之损耗很大,从而不形成 1.0 μm 激光或只有连续激光产生,此时 1.5 μm 腔只出现连续激光。这进一步说明 1.5 μm 脉冲是由 1.0 μm 调 Q 脉冲抽运产生的增益开关脉冲。

此外,实验观察到当 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔损耗增大时, $1.5\ \mu\text{m}$ 腔输出功率增大;当 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔损耗增大时, $1.0\ \mu\text{m}$ 腔输出功率也增大。这说明 $1.0\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光存在增益竞争。两个激光的增益竞争原因为 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔损耗增大提高了 Yb 离子向 Er 离子的能量转移, $1.5\ \mu\text{m}$ 腔获得了更大的增益,因此 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔输出功率变大;而 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔损耗增大减小了 Yb 离子向 Er 离子的能量转移, $1.0\ \mu\text{m}$ 腔获得更大的增益,因此 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔输出功率变大。实验还观察到当增大 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔的损耗时, $1.0\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 脉冲的重复频率同时减小,这是因为 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔内功率降低减小了 FSA 的漂白速率, $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲重复频率变小,由 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲抽运产生的 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关脉冲重复频率也随着减小。然而,增大 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔的损耗时, $1.0\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 脉冲的重复频率同时增大,这是因为增大 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔损耗减小了 Yb 离子向 Er 离子的能量转移,Yb 离子的反转粒子数增加从而增大了 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔内功率,进而加快了 FSA 的漂白速率,最终 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲重复频率变大,由 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲抽运产生的 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关脉冲重复频率也随着增大。

$1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关脉冲产生的条件总结如下:对于 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲,首先未抽运 EYDF 的长度要保证对 $1.0\ \mu\text{m}$ 激光有足够的可饱和吸收效应,其次 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔的损耗不能太大,要保证腔内能形成 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光振荡从而使未抽运 EYDF 的弛豫时间降低,成为一个有效的 Q 开关,最后在合适的抽运功率下, $1.0\ \mu\text{m}$ 腔中的激光功率密度足以使未抽运 EYDF 漂白时,产生 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲。对于 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关脉冲,由于它是由 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲抽运产生的,所以要保证 $1.0\ \mu\text{m}$ 腔内形成调 Q 脉冲。

4 结 论

通过使用一段铟镱共掺增益光纤实现了重复频率相同的 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关双波长脉冲光纤激光器。相对使用两种增益介质的方案,本方案使激光器更高效,结构更简单。 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲由未抽运铟镱共掺光纤的可饱和吸收效应产生,此未抽运铟镱共掺光纤在 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光腔的辅助下弛豫时间更短,是一个有效的光纤可饱和吸收体。同时, $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲被 Yb 离子的再吸收会周期性调制 $1.5\ \mu\text{m}$ 腔的增益,从而产生与 $1.0\ \mu\text{m}$ 调 Q 脉冲相同重复频率的 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关脉冲。通过改变这两种脉冲的光程可以实现同步,因此,该双波长脉冲光纤激光器具有很多潜在的应用,比如差频、和频的产生。然而,本实验中 $1.5\ \mu\text{m}$ 脉冲存在拖尾,并且输出功率较低,需要后续工作中进一步改进。

参 考 文 献

- [1] Lü Jiantao, Wang Kejia, Chen Guojie. Theoretical investigation of terahertz generation in GaP via difference frequency pumped by dual-wavelength ceramic laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 061902.
吕健滔, 王可嘉, 陈国杰. 双波长陶瓷激光抽运磷化镓差频产生太赫兹波的理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 061902.
- [2] Chen Hongli, Wang Hong, Wang Chao, *et al.* Research of oxidative stress reaction induced by 635 nm/808 nm double wavelength low level laser therapy on CCC-ESF[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081703.
陈洪丽, 王宏, 王超, 等. 635 nm/808 nm 双波长低能量激光对人成纤维细胞氧化应激反应的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081703.
- [3] Manzoni C, Polli D, Cerullo G. Two-color pump-probe system broadly tunable over the visible and the near infrared with sub-30 fs temporal resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 77(2): 023103.
- [4] Ganikhanov F, Evans C L, Saar B C, *et al.* High-sensitivity vibrational imaging with frequency modulation coherent anti-Stokes Raman scattering (FM CARS) microscopy[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1872-1874.
- [5] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, *et al.* Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3709-3711.
- [6] Lin H Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Tunable and switchable dual-wavelength dissipative soliton operation of a weak birefringence all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501807.
- [7] Wang Feng, Bi Weihong, Fu Xinghu, *et al.* Dual-wavelength fiber laser based on Er^{3+} -doped superimposed fiber gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0402002.
王枫, 毕卫红, 付兴虎, 等. 基于掺铒光纤重叠光栅的双波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0402002.
- [8] Rusu M, Herda R, Okhotnikov O G, *et al.* Passively synchronized erbium (1550 nm) and ytterbium (1040 nm) mode-

- locked fiber lasers sharing a cavity[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(19): 2246-2248.
- [9] Zhang M, Kelleher E J R, Pozharov A S, *et al.* Passive synchronization of all-fiber lasers through a common saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 3984-3986.
- [10] Sotor J, Sobon G, Tarka J, *et al.* Passive synchronization of erbium and thulium doped fiber mode-locked lasers enhanced by common graphene saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5536-5543.
- [11] Wu D D, Luo Z Q, Xiong F F, *et al.* Passive synchronization of 1.06- and 1.53- μm fiber lasers Q-switched by a common graphene SA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(14): 1474-1477.
- [12] Jia C, Shastri B J, Abdukerim N, *et al.* Passively synchronized Q-switched and simultaneous mode-locked dual-band Tm³⁺: ZBLAN fiber laser at 1.48- and 1.85- μm using common graphene saturable absorber[C]. *Specialty Optical Fibers*, Optical Society of America, 2016: SoTu1G.4.
- [13] Tsai T Y, Fang Y C, Huang H M, *et al.* Saturable absorber Q- and gain-switched all-Yb³⁺ all-fiber laser at 976 and 1064 nm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23523-23528.
- [14] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M. Yb-Bi pulsed fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(5): 451-453.
- [15] Li J, Hu T, Jackson S D. Dual wavelength Q-switched cascade laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2208-2210.
- [16] Li Jianfeng, Hu T, Jackson S D. Q-switched induced gain switching of a two-transition cascade laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13123-13128.
- [17] Li Jianfeng, Luo Hongyu, Wang Lele, *et al.* Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10770.
- [18] Walsh B M. Dual wavelength lasers[J]. *Laser Physics*, 2010, 20(3): 622-634.
- [19] Bouillet J, Lavoute L, Desfarges B A, *et al.* Tunable red light source by frequency mixing from dual band Er/Yb co-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 3936-3941.
- [20] Jusoh Z, Harun S, Shahabuddin N, *et al.* Dual-wavelength erbium-ytterbium co-doped fibre laser operating at 1064 and 1534 nm[J]. *Ukrainian Journal of Physical Optics*, 2014, 15(3): 118-122.
- [21] Han Qun, Ning Jiping, Sheng Zhaoxia. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er/Yb codoped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(11): 1535-1541.
- [22] Han Qun, Yao Yunzhi, Chen Yaofei, *et al.* Highly efficient Er/Yb-codoped fiber amplifier with an Yb-band fiber bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2634-2636.
- [23] Kurkov A S. Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers[J]. *Laser Physics Letter*, 2011, 8(5): 335-342.
- [24] Jackson S D, Dickinson B C, King T A. Sequence lasing in a gain-switched Yb³⁺, Er³⁺-doped silica double-clad fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(9): 1698-1703.
- [25] Yang Jianlong, Tang Yulong, Zhang Rui, *et al.* Modeling and characteristics of gain-switched diode-pumped Er-Yb codoped fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(12): 1560-1567.
- [26] Yang Jianlong, Tang Yulong, Xu Jianqiu. Development and applications of gain-switched fiber lasers [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2013, 1(1): 52-57.