

文章编号: 0258-7025(2008)08-1177-04

基于 PLZT 开关的全光纤单模调 Q 掺 Yb³⁺ 光纤激光器

许党朋^{1,2} 李明中¹ 王建军¹ 张 锐¹ 林宏奂¹ 车雅良^{1,3} 卢振华¹

(中国工程物理研究院¹ 激光聚变研究中心, ² 研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)
³ 西安通信学院军用光纤通信教研室, 陕西 西安 710106)

摘要 PLZT 电光陶瓷具有良好的透明性、高电光系数等特性, 用来实现全光纤调 Q 开关具有很大的优势。分析了 PLZT 全光纤调 Q 开关的原理, 测量了调 Q 开关的时间波形, 研究了基于 PLZT 开关的全光纤单模环形调 Q 掺 Yb³⁺ 光纤激光器。抽运光功率为 180 mW, 重复频率为 1 kHz 时, 得到峰值功率 25.6 W, 脉冲宽度 80 ns, 光谱宽度 1 nm, 脉冲能量 2.0 μJ 的调 Q 脉冲。此外, 分别研究了抽运功率和重复频率对脉冲峰值功率和脉冲宽度的影响, 结果表明, 同一重复频率情形下, 随着抽运功率的升高, 峰值功率增大, 脉冲宽度降低; 同一抽运功率水平下, 随着重复频率的增大, 脉冲的峰值功率减小, 脉冲宽度增大。

关键词 激光器; 光纤激光器; 调 Q; PLZT; 掺 Yb³⁺ 光纤

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1177

All Fiber Single-Mode Q-Switched Ytterbium-Doped Fiber Laser Based on PLZT Switch

Xu Dangpeng^{1,2} Li Mingzhong¹ Wang Jianjun¹ Zhang Rui¹
Lin Honghuan¹ Che Yaliang^{1,3} Lu Zhenhua¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
³Department of Electronic Engineering, The Optic Fiber Staff Room,
Xi'an Communication Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China

Abstract PLZT electro-optic (EO) ceramic has good transparency and high EO effect. It has many advantages for realizing the all-fiber Q-switch. The principle of Q-switch based on PLZT was analyzed. And the time distribution of the Q-switch was measured. An all fiber single-mode actively Q-switched ytterbium-doped ring fiber laser based on PLZT switch was studied in experiment. The peak power, pulse width, spectral width and pulse energy of the Q-switched pulse are 25.6 W, 80 ns, 1 nm and 2.0 μJ respectively. At the same time, the effect of the pump power and repetition rate on pulse width and peak power was presented. The results show that the peak power of the pulse increases with the pump power and the pulse width decreases at the same repetition rate, and the pulse width increases with the repetition rate and the peak power decreases at the same pump power.

Key words lasers; fiber laser; Q-switched; PLZT; ytterbium-doped fiber

1 引 言

掺 Yb³⁺ 光纤产生的短脉冲、高峰值功率激光脉

冲^[1]一直都在工业和军事领域有重要的应用。调 Q 是产生这种脉冲的方式之一, 特别是调 Q 光纤激光

收稿日期: 2007-10-12; 收到修改稿日期: 2007-12-26

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804303)资助课题。

作者简介: 许党朋(1982—), 男, 陕西人, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器及放大器等方面的研究。

E-mail: xudangpeng@yahoo.com.cn

导师简介: 李明中(1966—), 男, 湖北人, 研究员, 硕士生导师, 目前主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: limingzhong@sina.com

器^[2~4]具有体积小、结构紧凑、光束质量好、阈值低、斜率效率高、无需水冷等很多优点,使其在激光器的研究及应用领域颇受关注。自从将调Q技术引入光纤激光器以来,调Q光纤激光器的研究取得了很大的进展,但大多采用非全光纤型调Q开关,虽然它的装置(如声光Q开关、电光Q开关、可饱和吸收体等)有其自身的优点,但这些装置插入光纤激光器谐振腔中,增加了插入损耗,降低了开关与光纤之间的光耦合效率,使激光器的阈值抽运功率大大提高。近年来,由于工业和军事应用的需求,调Q光纤激光器的研究逐渐向全光纤、窄线宽、窄脉宽、高能量的方向发展。2001年,C. C. Renaud等^[5]用低数值孔径大模场光纤(LMA)作增益介质,采用声光调制器(AOM)调Q获得2.3 mJ的单脉冲输出能量;2002年R. Selvas等^[6]报道了采用掺Yb³⁺光纤和AOM调Q开关,在980 nm处获得脉宽小于20 ns,能量1.2 μJ的脉冲激光;2004年P. D. Dragic^[7]采用受激布里渊散射(SBS)效应和AOM共同调Q产生重复频率500 Hz,能量1.2 μJ单脉冲激光输出。在国内,2006年天津大学甘雨等^[8]报道了利用偏振旋转技术和增益光纤的未饱和吸收作用实现的调Q锁模掺Yb³⁺光纤激光器,得到了调Q重复频率为17.54 kHz,脉冲宽度为8 μs,光谱宽度为4.7 nm的激光输出,可以看出脉冲宽度相对较宽;2007年赵崇光等^[9]利用AOM开关和光纤光栅实现了Er/Yb共掺包层抽运的全光纤调Q激光器,在重复频率100 kHz下,峰值功率1.75 W,脉冲宽度100 ns。

非全光纤调Q开关存在插入损耗大、体积大等缺点,不利于光纤激光器的高度集成,而普通的全光纤调Q技术存在高调制电压、低损伤阈值等不利因素,限制了调Q脉冲的峰值功率和脉冲能量的进一步提高。基于PLZT[Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_{1-y})_{1-x/4}O₃]电光陶瓷的全光纤调Q开关具有体积小、插入损耗低、调制电压低等优点。本文采用这种调Q开关,研究了重复频率从1 Hz~15 kHz可调的全光纤单模环形掺Yb³⁺调Q光纤激光器。

2 基于PLZT的调Q开关的原理分析

实现调Q光纤激光器的途径有很多,如电光调Q,声光调Q,可饱和吸收体被动调Q等。但是由于普通的电光调Q开关的半波电压较高,易对其他电器元件造成干扰;传统的声光调Q对高能激光器的开关能力较差,一般应用于低增益的连续运转激光器;而可饱和吸收体调Q产生调Q脉冲的时刻有一定的随

机性,此外,燃料易变质,输出不稳定;基于PLZT电光陶瓷的调Q开关具有速度快、调制电压低等优点。

PLZT^[10]电光陶瓷是一种典型的铁电陶瓷,主要是通过ZrO, TiO, PbO中掺入少量的LaO经过混合、压力成形和高温烧结的情况下制成的。由于在锆钛酸铅材料中掺入镧元素,所以具有较高的光透射率,响应速度快,并具有较大的二次电光系数,在人工极化后还具有压电、光学双折射等特性,因而制作调Q开关具有很大的优势。PLZT电光陶瓷调Q的基本原理是通过调整电场来改变PLZT的折射率实现的,即利用其电光效应,在电光陶瓷材料上加上调制电压调节光纤激光器腔内的损耗。由于PLZT电光陶瓷具有很高的电光系数,所以利用PLZT电光陶瓷制成调Q开关需要较低的调制电压就可实现调Q光纤激光器,特别是对于高重复频率调Q光纤激光器具有很大优势。实验中采用的全光纤调Q开关的结构原理是通过光纤准直器将激光准直到电光陶瓷上,再通过另一只光纤准直器将激光导出,同时在电光陶瓷上加上驱动电路模块。可以根据不同的需要选择不同孔径的Q开关,应用于光纤激光器的全光纤调Q开关孔径都比较小。实验中测得基于PLZT的全光纤调Q开关的插入损耗为1.83 dB。图1表示重复频率为1 kHz时,调Q开关的时间波形与时间序列。从图1(a)可以看出,开关的上升沿很陡,在短的时间内上升到峰值后急剧下

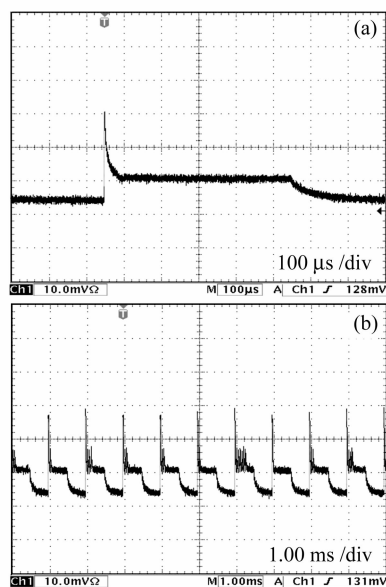


图1 基于PLZT的调Q开关的时间波形(a)与时间序列图(b)

Fig. 1 Shape (a) and time train of the Q-switch based on PLZT

降,大约40 μs 后,波形平坦,而开关的时间波形总宽度达到500 μs ,实现调 Q 所用的就是波形的前沿部分。从图 1(b)可以看出序列中个别开关波形上存在抖动,这主要是由驱动电路的性能引起的。在高重复频率下,这种抖动能使得主脉冲之后出现后续的次级脉冲,这种次级脉冲会引起主脉冲的脉冲能量有所下降。

3 光路设计

图 2 表示基于 PLZT 开关的全光纤环形调 Q 光纤激光器示意图。装置中采用标准的、最大输出功率为250 mW的半导体激光(LD)作为抽运源,抽运光通过两级 1053 nm/975 nm 的波分复用器(WDM)后耦合进入掺 Yb³⁺ 光纤,其中第一级波分复用器(环形腔内)主要作用是将抽运光耦合进激光腔内,第二级波分复用器的主要作用是隔离放大的自发辐射(ASE),防止反向激光破坏抽运源。实验中采用纤芯尺寸为5 μm ,长度为0.45 m的高掺杂光纤作为增益介质,对于波长为976 nm的抽运光,光纤的小信号吸收系数为1200 dB/m;PLZT 调 Q 开关的重复频率从1 Hz~15 kHz可调。此外,采用中心波长在1053 nm的光纤隔离器,使环形腔内的激光单向通行,并对光纤隔离器之后光路中器件反射的反向激光起隔离作用。为了得到波长为1053 nm的调 Q 脉冲,激光腔内增加中心波长1053 nm,带宽1 nm的光纤滤波器;采用 20:80 的光纤分束器将激光输出。

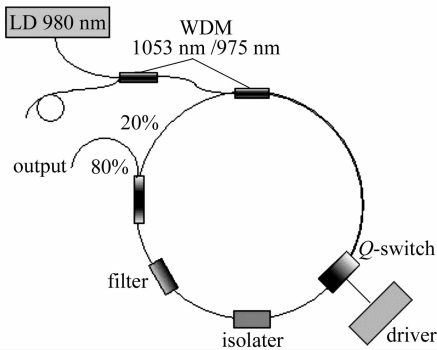


图 2 全光纤环形调 Q 光纤激光器示意图

Fig. 2 Architecture of the all fiber ring Q-switched fiber laser

4 结果与讨论

4.1 重复频率为 1 kHz 时的输出结果

为了使激光上能级的粒子数足够多,并避免 ASE 损耗,保证一定功率下最大的反转粒子数利用率,相邻两个脉冲的时间间隔,即 $1/f$ 应等于激光工

作物质的能级寿命。采用图 2 所示的全光纤环形调 Q 光纤激光器结构,选取调 Q 的重复频率为1 kHz,当抽运功率为180 mW时,得到峰值功率25.6 W,脉冲宽度80 ns,光谱宽度1 nm的调 Q 脉冲,实验结果如图 3 所示。可以看出图 3(a)中的脉冲波形存在等间隔的尖峰,这就是在主动与被动调 Q 光纤激光器中都会出现的自锁模现象,这种现象发生的主要原因是腔内纵模竞争。图 3(b)表示重复频率为1 kHz时的脉冲序列。图 4 表示调 Q 光纤激光器在加中心波长为1053 nm,带宽为1 nm的光纤滤波器后的输出光谱,可以看出输出的光谱中心波长在1053 nm。

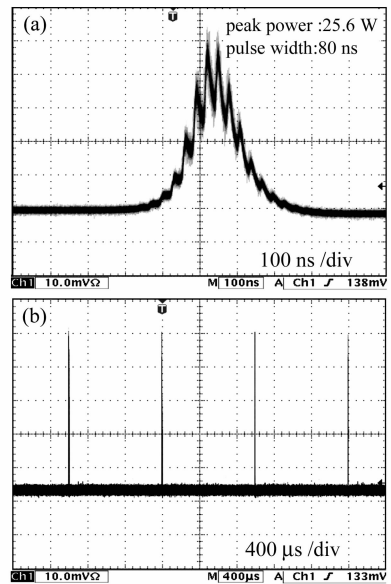


图 3 重复频率为 1 kHz 时的调 Q 脉冲波形(a)和脉冲序列(b)

Fig. 3 Q-switched pulse shape (a) and the pulse train (b) while the repetition rate is 1 kHz

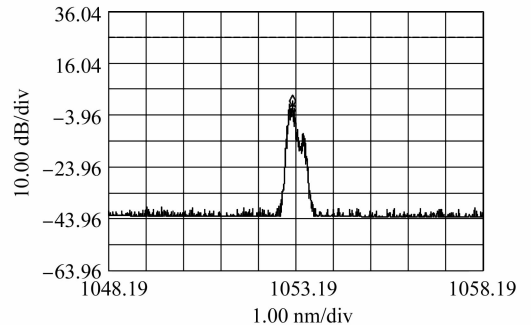


图 4 调 Q 激光脉冲的光谱结构

Fig. 4 Spectrum structure of the Q-switched pulse

4.2 抽运功率和重复频率对峰值功率和脉冲宽度的影响

图 5 表示重复频率为 1 kHz,不同抽运功率下,

脉冲峰值功率和脉冲宽度的变化情况。当抽运功率从100 mW增加到240 mW时,可以看出脉冲峰值功率也在增加,抽运功率为240 mW时,峰值功率增加到32.3 W。这主要是由于抽运功率升高,上能级储能增加,因此调Q脉冲的峰值功率也就增大。脉冲宽度则随着抽运功率的升高而降低,可以看出抽运功率100 mW时,脉冲宽度为200 ns左右;抽运功率为240 mW时,脉冲宽度为50 ns。因为抽运功率升高,激光器中的初始反转粒子数相对于阈值反转粒子数大幅增加,这样反转粒子数雪崩下来的时间就较短,因此脉冲宽度就较小。

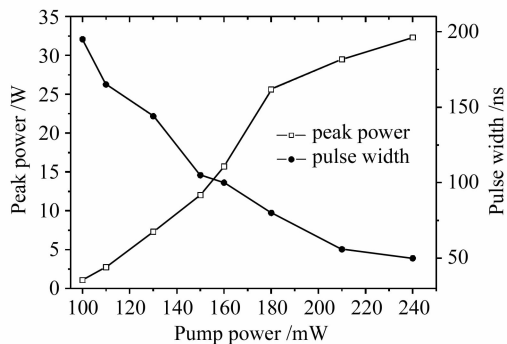


图5 峰值功率和脉冲宽度随抽运功率的变化情况
(重复频率 1 kHz)

Fig. 5 Peak power and pulse width as a function of pump power (repetition rate 1 kHz)

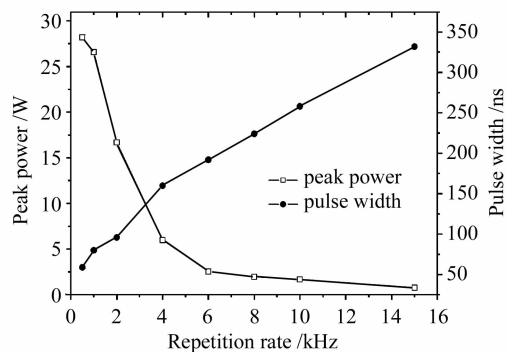


图6 重复频率对调Q脉冲的影响(抽运功率 180 mW)

Fig. 6 Effect of the repetition rate on the Q-switched pulse (pump power: 180 mW)

图6表示重复频率对调Q脉冲峰值功率和脉冲能量的影响。抽运功率为180 mW时,调Q脉冲的峰值功率在重复频率为1 kHz之后下降很快,这是由 Yb^{3+} 的上能级寿命决定的;脉冲宽度则随着重复频率升高而增大,即脉冲宽度从峰值功率最高时的50 ns增大到200 ns左右。因为随着重复频率的

增大,脉冲间隔越来越小,每个脉冲都不能充分地提取上能级的储能,实验中最高重复频率达到15 kHz。

5 结 论

采用全光纤 PLZT 调 Q 开关,研究了全光纤单模环形调 Q 光纤激光器。当重复频率为1 kHz,抽运功率为180 mW时,实现了峰值功率为25.6 W,脉冲宽度为80 ns,光谱宽度为1 nm,脉冲能量为2.0 μJ 的调Q激光脉冲输出;并且分别研究了抽运功率和重复频率对调Q脉冲的宽度和峰值功率的影响。由于使用的抽运源输出功率较小,且光纤纤芯尺寸的限制,未能实现大功率输出,但是采用了基于电光陶瓷开关的全光纤调Q方法,为实现高重复频率、高峰值功率的调Q光纤激光器提供了新的途径。

参 考 文 献

- Lin Honghuan, Sui Zhan, Wang Jianjun *et al.*. Optical pulse shaping by chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):466~470
林宏奂,隋展,王建军等. 啁啾脉冲堆积用于光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):466~470
- N. A. Russo, R. Duchowicz, J. Mora *et al.*. High-efficiency Q-switched erbium fiber laser using a Bragg grating-based modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**:361~366
- M. Delgado-Pinar, D. Zalvidea, A. Diez *et al.*. Q-switched of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3):1106~1112
- Yong Wang, Aleiandro Martinez-Rios, Hong Po. Analysis of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser with simultaneous mode locking [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**:113~123
- Cyril C. Renaud, H. L. Offerhaus, J. A. Alvarez-Chavez *et al.*. Characteristics of Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber lasers with different high-energy fiber designs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2):199~205
- R. Selvas, J. K. Sahu, J. Nilsson. Q-switched 980 nm Yb-doped fiber laser [C]. *CLEO'02*, 2002. 565~566
- Peter D. Dragic. Injection-seeded Q-switched fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8):1822~1825
- Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and modelocking Yb^{3+} -doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1021~1024
甘雨,向望华,周晓芳等. 被动调Q锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1021~1024
- Chongguang Zhao, Yang Liu, Ji Wang *et al.*. Cladding-pump Er/Yb co-doped Q-switched all fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):S115~S117
- H. Jiang, Y. K. Zou, Q. Chen *et al.*. Transparent electro-optic ceramics and device [C]. *SPIE*, 2005, **5644**:380~394