

文章编号: 0258-7025(2008)05-0651-04

掺 Yb^{3+} 全光纤环形腔主动调 Q 光纤激光器

高存孝^{1,2} 赵卫¹ 王屹山¹ 朱少岚^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 报道了用 976 nm 激光二极管(LD)抽运掺 Yb^{3+} 增益光纤,用光纤耦合的声光调制器(AOM)实现全光纤环形腔主动调 Q 激光输出的实验研究。激光器的调制频率在 200 Hz~60.9 kHz 之间调节时获得稳定的调 Q 脉冲输出。当抽运光功率为 183 mW,调制频率为 500.2 Hz 时,获得输出峰值功率为 2.7 W,脉冲宽度为 53.2 ns,单脉冲能量为 145.5 nJ 的激光脉冲,激光器的输出波长为 1030 nm。当 Q 开关关闭时间较短时,从实验中观察到高低脉冲间隔输出的情况,利用调 Q 原理给出了相应解释。从实验和理论上分析了调制频率和抽运功率对激光器输出脉冲的影响,并进行了相应的计算,计算值和实验结果符合得较好。

关键词 激光器;光纤激光器;全光纤环形腔;主动调 Q ;声光调制器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Actively Q -Switched Yb^{3+} -Doped All Fiber Ring Laser

Gao Cunxiao^{1,2} Zhao Wei¹ Wang Yishan¹ Zhu Shaolan^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract An all-fiber Q -switched Yb^{3+} -doped fiber ring laser pumped with a 976 nm laser diode (LD), which uses a fiber-pigtailed acousto-optic modulator (AOM) as the active Q -switching element, was reported. The stable pulse can be obtained when the modulation frequency was adjusted from 200 Hz to 60.9 kHz. The laser pulse with maximum peak power of 2.7 W, pulse width of 53.2 ns and pulse energy of 145.5 nJ is obtained, when the pumping power is 183 mW and the modulation frequency is 500.2 Hz. The alternate output of high and low energy pulse is observed with the shorter Q -switched turnoff time, and it is explained by the principle of the Q -switched laser. The characteristics of pulse versus modulation frequency and pump power are investigated, and the theoretical calculation is in good agreement with the experimental result.

Key words lasers; fiber laser; all fiber ring cavity; active Q -switch; acousto-optical modulation

1 引言

与分离元件调 Q 激光器和固体调 Q 激光器^[1,2] 相比较,全光纤调 Q 激光器具有体积小、易耦合、光波模式好、免维护、稳定性高等特点,在通信、军事、医学和工业加工等许多领域有着广泛的应用。目前全光纤调 Q 激光器主要采用光纤干涉仪、光纤光栅环形镜、增益光纤自调 Q 和腔内加入可饱和吸收

体^[3~5] 等方式,集中在掺 Er^{3+} 光纤激光器的研究上。对于掺 Yb^{3+} 全光纤调 Q 激光器,国内外报道并不是很多^[6~8],这些方法多为被动调 Q ,虽然脉冲宽度相对较短,但是组成激光器的元件确定后调 Q 脉冲的重复频率不可连续调节,稳定性也相对主动调 Q 差一些。

本文报道的全光纤掺 Yb^{3+} 调 Q 激光器采用两

收稿日期:2007-05-15;收到修改稿日期:2007-11-23

基金项目:国家自然科学基金(60537060)资助项目。

作者简介:高存孝(1979—),男,陕西人,博士研究生,主要从事光纤激光器和光纤放大器方面的研究。

E-mail: cxgao@opt. ac. cn

导师简介:赵卫(1963—),男,河南人,研究员,博士生导师,主要从事超快光学、超快光电子学、高时空分辨诊断以及光通信技术方面的研究。E-mail: weiz@opt. ac. cn

端带有尾纤耦合的声光调制器(AOM)作为调Q元件实现了全光纤主动调Q,激光器可以实现重复频率、脉冲宽度连续可调,并且输出脉冲的稳定性较高,由于没有分离的机械元件,激光器的热稳定性和机械稳定性非常高,实现了随开随用,并能长时间稳定工作。

2 实验装置

激光器的结构如图1所示,波分复用器(WDM)、增益光纤、隔离器、光纤声光调制器和耦合器依次首尾相接构成一个环形腔。抽运光源为中心波长976 nm的单模激光二极管(LD),抽运光通过一个980 nm/1060 nm的波分复用器耦合进掺Yb³⁺单模增益光纤,腔内加入光隔离器保证光路的单向运行。声光调制器采用单模尾纤耦合并由外部的TTL信号源控制其开关时间。调Q光脉冲通过光纤分束器耦合输出,用快速PIN光电探测器(上升沿小于1 ns)和LeCroy 8600A示波器观测激光输出的时域特性,并用COHERENT 45662A型功率计测量激光输出功率。

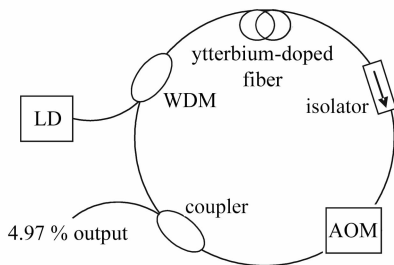


图1 环形腔调Q掺Yb³⁺光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of Q-switched Yb³⁺-doped fiber ring laser

为了获得尽可能短的激光脉冲,需要尽可能减短腔的长度和提高调制器的速度。选用高掺杂浓度的光纤,其在976 nm处的吸收为612 dB/m,并尽量减短其他器件的尾纤长度以缩短腔长,激光器使用54 cm增益光纤,腔长为3.6 m。由调Q理论知在开关打开时激光振荡阈值与腔内的Q值成反比,为了提高Q值,必须尽量降低腔内损耗;在开关关闭时需要腔内的Q值尽量低,以积累更多的上能级粒子数,从而提高激光脉冲的峰值功率。因此,选用消光比尽可能高但插损尽可能小的声光调制器,实验中所选器件的消光比可达50 dB,对1000~1100 nm激光的插损<3 dB。

3 实验结果及分析

在调Q运转状态下,调制频率在200 Hz~60.9 kHz之间调节时都可得到稳定的调Q脉冲输出。固定调制频率为1.0 kHz时,测得输出激光的脉冲宽度及平均功率随抽运功率变化的关系如图2所示。从图2中可以看出随着抽运功率的增加,脉冲的峰值功率逐渐增加,最终趋于稳定。这是由于抽运速率逐渐提高,使得Yb³⁺上能级积累的反转粒子数逐渐增多直到饱和,从而导致脉冲峰值功率的变化;脉冲宽度的变化则是逐渐减小并趋于稳定。脉冲的建立时间为^[9]

$$T_b = K_0 / (n_i - n_{th}), \quad (1)$$

式中 n_i 为初始反转粒子数, n_{th} 为阈值反转粒子数, K_0 为系数。随着抽运功率的增加, n_i 逐渐增加直至饱和,由(1)式可得脉冲宽度逐渐减小直至趋于稳定。

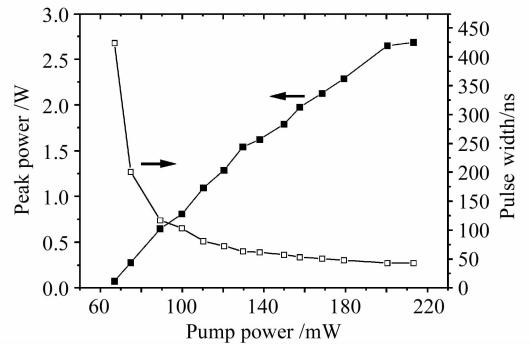


图2 输出脉冲的峰值功率、脉冲宽度随抽运功率的变化关系

Fig. 2 Peak power and pulse width versus pump power

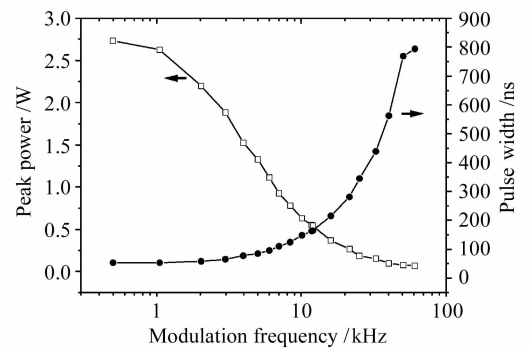


图3 输出脉冲的峰值功率和脉冲宽度随调制频率的变化关系

Fig. 3 Peak power and pulse width versus modulation frequency

当抽运功率保持在183mW时,测量输出脉冲的脉冲宽度和平均功率,在不同调制频率下,得到峰值功率、脉冲宽度随调制频率变化的关系曲线如图

3 所示。

从图 3 中可以看到随着调制频率的增加, 脉冲的峰值功率在逐渐减小而脉冲宽度在逐渐增加, 在 500 Hz 左右两者的变化相对都比较小。这是因为当调制频率为 500 Hz 左右时, 增益光纤的储能达到饱和, 使得输出脉冲的峰值功率最大, 脉冲宽度最短, 是调 Q 的最佳工作状态。而当调制频率变大时, 工作物质的储能时间随之减小, 从而造成储能降低, 导致脉冲建立时间增加, 峰值功率下降。

整个调节过程中激光器都有较高质量的脉冲输出, 图 4 为调制频率 3 kHz 时激光器输出的脉冲序列, 在调制频率为 500.2 Hz, 抽运功率为 183 mW 时, 输出脉冲的峰值功率为 2.7 W, 脉冲宽度为 53.2 ns, 单脉冲能量达到 145.5 nJ, 激光器输出的波长为 1030 nm, 从示波器上得到的激光器输出脉冲的波形图如图 5 所示。

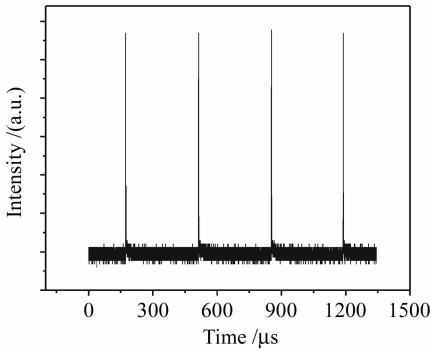


图 4 调制频率 3 kHz 时的调 Q 脉冲序列

Fig. 4 Measured Q-switched pulse train at modulation frequency of 3 kHz

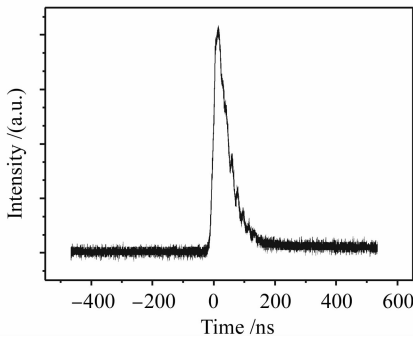


图 5 调制频率 500 Hz 时的调 Q 脉冲波形图

Fig. 5 Typical Q-switched pulse at the modulation frequency of 500 Hz

由调 Q 激光器的理论可估算输出脉冲的参数, 对连续抽运的光纤激光器其峰值功率最大值为^[10]

$$P_{\text{peak}} = h\nu_s \left(\frac{cT_1}{2n_1l} \right) \cdot \left[n_{t,1} \ln \frac{n_{t,1}}{n_{in}} - (n_{t,1} - n_{in}) \right], \quad (2)$$

式中 ν_s 为输出光的频率, T_1 为激光腔的输出透射率, n_1 为光纤纤芯的折射率, l 为腔长, $n_{t,1}$ 为阈值反转粒子数, n_{in} 为初始反转粒子数。其中

$$n_{t,1} = \frac{\delta_1}{2\sigma} \frac{1}{F_1}, \quad (3)$$

式中 δ_1 为高 Q 状态下的腔内损耗, σ 为受激发射截面, $F_1 = \frac{F_{0000}}{LA_f}$ 为基模抽运光和信号光的重叠因子, $A_f = \pi a^2$ 为光纤纤芯面积, F_{0000} 计算值为 0.33^[11]。

$$n_{in} = \left(\frac{\tau_f}{h\nu_p} \right) p_{\text{abs}}, \quad (4)$$

式中 τ_f 为上能级寿命, ν_p 为抽运光的频率, p_{abs} 为增益光纤吸收的抽运光功率。系统的参数 $\delta_1 = 0.654$, $\sigma = 0.119 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $a = 3.1 \mu\text{m}$, $l = 3.6 \text{ m}$, $\tau_f = 0.45 \text{ ms}$, $p_{\text{abs}} = 150 \text{ mW}$, 由 (2)~(4) 式计算得脉冲的峰值功率为 2.8 W, 与实验得到的 2.7 W 非常接近, 考虑到误差, 可以认为两者符合得很好。

实验中发现, 当 Q 开关关闭时间较短时, 调节 Q 开关的打开时间会出现如图 6 所示的现象, 脉冲呈高低间隔输出。图 7 中, t_0 到 t_1 时刻, 激光腔内为低 Q 储能状态, 在激光二极管抽运下, 腔内的反转粒子数开始逐渐增加, 腔内粒子数由 n_{i2} 增加至 n_{i1} , 但由于 Q 开关关闭的时间较短, 腔内积累的反转粒子数

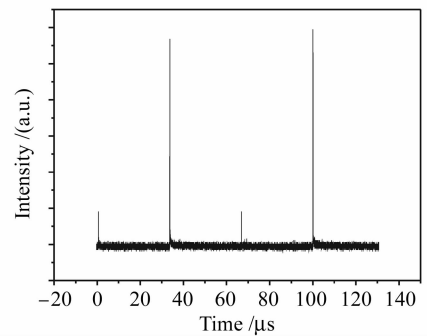


图 6 能量高低间隔输出脉冲图

Fig. 6 Alternate output of high and low energy pulse

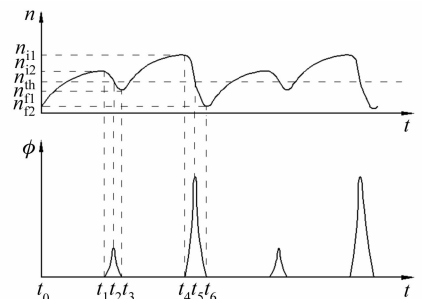


图 7 腔内反转粒子数、光子通量与时间的关系图

Fig. 7 Population inversion and photon flux versus time

并未达到饱和。 t_1 到 t_3 时刻 Q 开关打开, 脉冲开始建立并输出, 在这一阶段 Q 开关打开时间不够长, 腔内反转粒子数降低到 n_{11} , 增益光纤内还存有未消耗的储能。 t_3 到 t_4 时刻 Q 开关再次关闭, 如果 t_0 到 t_4 的时间小于反转粒子的上能级寿命, 则腔内反转粒子数将在 n_{11} 的基础上增加到 n_{12} , t_4 到 t_6 时刻 Q 开关再次打开, 这一次由于腔内积累的初始反转粒子数较多, 因此脉冲建立的时间较短^[9], 在相同的 Q 开关打开时间内, 可将腔内储能消耗干净, 反转粒子数从 n_{11} 降低至 n_{12} , 同时激光器也将输出一个峰值较高的脉冲, 如此往复就会出现高低脉冲间隔输出的情况。在这种情况下会破坏输出脉冲的质量, 所以要保证 Q 开关打开足够长的时间来消耗腔内的反转粒子数以避免此类情况的出现。

4 结 论

使用光纤耦合的声光调制器研制全光纤环形腔掺 Yb³⁺ 光纤调 Q 激光器, 并进行了实验研究和理论分析。在保证稳定脉冲输出的条件下, 当调制频率一定时, 输出脉冲的峰值功率随着抽运功率的增大而增大, 并最终趋近稳定, 脉冲宽度则逐渐减小并趋于稳定; 在抽运功率一定时, 输出脉冲的峰值功率随着调制频率的增加而减小, 而脉冲宽度则随之增加; 实验观察到腔内初始反转粒子数不同引起的能量高低间隔输出的脉冲, 并进行了分析。利用光纤调 Q 的理论进行计算, 计算值和实验结果符合得较好。

参 考 文 献

1 Weiqing Gao, Gongmin Yao, Lixin Xu *et al.*. Passively Q-

- switched Nd³⁺:YAG laser with corner cube [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):332~335
- 2 Zhang Xinlu, Ju Youlun, Wang Yuezhu. Laser-diode-pumped acoustooptic Q-switched Tm, Ho:YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1072~1076
- 张新陆, 鞠有伦, 王月珠. 激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 晶体声光调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1072~1076
- 3 Liguo Luo, P. L. Chu. Passive Q-switched erbium-doped fiber laser with saturable absorber [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **161**:257~263
- 4 Valery N. Filippov, Andrei N. Starodumov, Alexander V. Kir'yanov. All-fiber passively Q-switched low-threshold erbium laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6):343~345
- 5 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and mode-locking Yb³⁺-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
- 6 S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor *et al.*. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5):298~300
- 7 Hu Shuling, Lü Fuyun, Xie Chunxia *et al.*. Self-Q-switched Yb³⁺ all-fiber laser based on fiber interferometer [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(6):637~639
- 胡妹玲, 吕福云, 谢春霞等. 基于光纤干涉环的掺 Yb³⁺ 全光纤自调 Q 激光器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(6):637~639
- 8 Liang Jianzhong, Hu Yimei, Sun Diechi *et al.*. Study on the self mode-locking Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):865~867
- 梁建中, 胡谊梅, 孙迭旒等. 自锁模掺镱光纤激光器研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):865~867
- 9 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465
- 冯立春, 霍玉晶, 何淑芳等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532nm 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):461~465
- 10 C. J. Gaeta, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(12):1645~1650
- 11 M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(3):333~342