

全光纤对接损耗调 Q 激光器

彭博 柳强 巩马理 闫平

(清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 激光器调 Q 技术是产生高峰值功率、窄脉冲的最有效方法之一。提出并初步验证了全光纤对接损耗调 Q 方法, 分析了调 Q 原理以及影响因素, 实现调 Q 脉冲的输出。激光腔内加入两段光纤, 两段光纤间相互靠近的一端紧密对接, 其中一段粘结在压电陶瓷 (PZT) 上。通过外部电压变化驱动压电陶瓷, 使两光纤端面间出现轴向间隙、径向错位或旋转夹角, 改变两段光纤之间的耦合连接损耗, 进而调节激光腔的损耗, 输出调 Q 脉冲。采用径向错位方式, 可以有效改变光纤之间的耦合连接损耗, 重复频率可达 10 kHz。该方法实现简单, 成本低廉, 通过外部条件控制, 可进一步提高输出脉冲的稳定性。

关键词 激光器; 光纤激光器; Q 开关; 对接损耗调 Q 方法

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

All-Fiber Q -Switched Laser by Modulating Coupling Loss

Peng Bo Liu Qiang Gong Mali Yan Pin

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Q -switched technique is one of the most efficient methods to produce high-peak-power and narrow-duration pulses. An all-fiber Q -switched laser based on the modulation of coupling loss is proposed and the Q -switching principles and relative parameters are analyzed. Two fibers are used in the laser cavity. The neighbor terminals of these fibers are placed end-to-end, one of which is mounted on a piezoelectric actuator (PZT). When a changed voltage outputted from a driver is applied to the PZT, a corresponding displacement of the fiber is generated. The displacement can be a longitudinal separation, a lateral offset or an axial tilt, which can modulate the coupling loss between the two fibers and change the round-trip loss in the fiber laser cavity as a result. When the lateral-offset mode is applied, Q -switching pulses are obtained up to the repetition rate of 10 kHz by changing the coupling loss efficiently. This method is easy and low cost, and increase its stability by external control.

Key words lasers; fiber laser; Q -switch; Q -switched method by modulating coupling loss

1 引言

无论是连续工作^[1,2] 还是脉冲输出^[3,4], 光纤激光器的输出功率和光束质量都迅速提高。光纤光栅、光纤耦合器等相关技术日益成熟, 光纤激光器全光纤化成为可能, 在工业加工、军事测控以及医疗传感等诸多领域^[5~8], 发挥越来越大的作用。传统的光纤调 Q 激光器与其他固体激光器一样, 主要有三种实现方法, 电光调 Q , 声光调 Q 以及被动调 Q 。其

中声光调 Q 方法仍然是目前获得高功率高重复频率脉冲激光的首选。但是, 随着人们对光纤激光器鲁棒性和机械稳定性要求的提高, 无需外加块状调节元件以及相应的准直、耦合系统的全光纤化 Q 开关, 逐渐成为研究热点。目前采用的全光纤化调 Q 方法包括光纤光栅调制、光纤压光效应调制、光纤干涉仪调制以及光纤化的被动调制。

本文提出并初步验证了光纤对接损耗调 Q 方法, 分析了调 Q 原理以及影响因素, 实现调 Q 脉冲的

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-02

作者简介: 彭博 (1982—), 女, 河北人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器调 Q 理论与实验研究工作。

E-mail: pengb04@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 巩马理 (1959—), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子与激光技术研究工作。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

输出。

2 光纤对接损耗调 Q 原理

光纤激光器的增益光纤由两段光纤组成,两个端头紧密靠近,但仍然可以相对移动。其中一个端头被固定在调节架上,另一个端头则固定在压电陶瓷上。当改变压电陶瓷(PZT)上的驱动电压时,光纤端头也会发生相应的移动,两段光纤之间的激光传输耦合损耗会发生明显改变。激光器的往返损耗就与压电陶瓷的驱动电压密切相关。通过简单地改变驱动电压,可以有效调节激光腔的往返损耗,实现激光器调 Q。

根据光纤在压电陶瓷上不同的加载方向,调 Q 方式也分成轴向间距方式、径向错位方式和旋转调节方式(如图 1(a)~(c)所示)。光纤不同,激光传输的耦合损耗不同,可能获得最佳调 Q 效果的方式也不同。

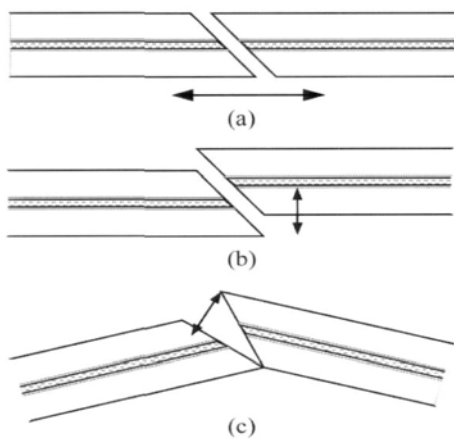


图 1 全光纤调 Q 结构。(a) 轴向间距方式; (b) 径向错位方式; (c) 旋转调节方式

Fig.1 All-fiber Q-switching structure. (a) longitudinal mode; (b) lateral mode; (c) rotational mode

采用单模光纤,两端面垂直切割且严格平行时,轴向间距不同时的传输功率透过率为^[9,10]

$$T = \frac{1}{[d\lambda / (2\pi n_0 w_0^2)]^2 + 1}, \quad (1)$$

多模光纤时,传输功率透过率为

$$T = 1 - \frac{dNA}{2an_0}, \quad (2)$$

式中 w_0 为单模光纤的模场半径, $w_0 = a \left| 0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right|$, $V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$, λ 为光纤中传输的激光波长, d 为两光纤端面轴向间距, n_0 为光纤之间介质的折射率, NA 为光纤的数值孔径, a 为光纤纤芯半径。由于两光纤端面严格平行,且未

镀增透膜,激光在光纤端面之间传输时受到菲涅耳反射的影响,出现多次反射的法布里-珀罗(F-P)效应。相同直径和数值孔径的光纤,在轴向间距不同时,传输损耗也不同。如图 2(a)所示,随光纤端面轴向间距的增大,光纤之间的透过功率比明显下降。小光纤直径、大数值孔径的光纤,轴向间距变化对透过功率比的影响较大。其中,曲线的抖动与光纤端面的法布里-珀罗效应有关。

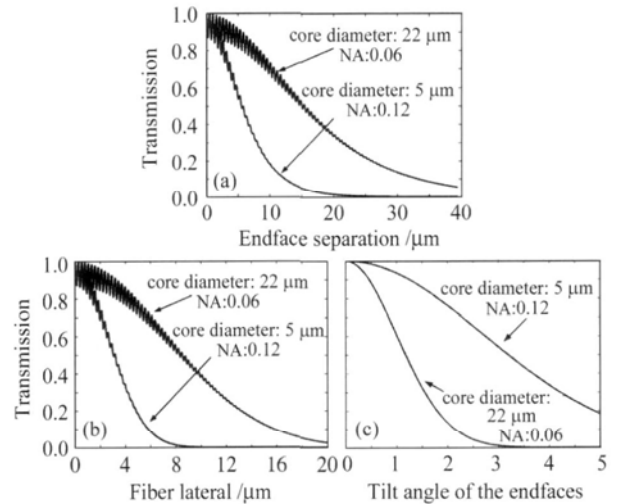


图 2 轴向间距(a), 径向错位(b)和旋转角度调节(c)对传输透过率的影响

Fig.2 Transmitted power versus endface separation in longitudinal mode (a), lateral mode (b) and tilt angle in rotational mode (c)

采用单模光纤,两端面垂直切割且严格平行时,径向错位不同时的传输功率透过率为

$$T = \exp[-(d'/w_0)^2], \quad (3)$$

多模光纤时,传输功率透过率为

$$T = 1 - \frac{8d'}{3\pi a}, \quad (4)$$

式中 d' 为两光纤轴之间的径向错位间距。径向错位对传输透过率的影响如图 2(b)所示。同样,小光纤直径、大数值孔径的光纤,径向错位变化对透过率的影响较大。

采用单模光纤,两端面垂直切割且严格平行时,旋转角度不同时的传输功率透过率为

$$T = \exp[-(n_0\pi w_0 \sin\theta/\lambda)^2], \quad (5)$$

多模光纤时,传输功率透过率为

$$T = 1 - \frac{8n_0 \sin\theta}{3\pi NA}, \quad (6)$$

式中 θ 为两光纤轴之间的旋转夹角。旋转调节对传输透过率的影响如图 2(c)所示。与图 2(a), (b)两种方式不同,小光纤直径、大数值孔径的光纤,旋转夹角变化对透过率的影响较小。由于

两光纤端面不平行, 不存在法布里-珀罗效应, 因此曲线变化光滑, 无抖动。

通过分析, 对比曲线变化可以看出, 采用径向错位调节时, 光纤耦合传输损耗对位移的变化最为敏感, 实现方式也最简单。因此, 在调 Q 过程中, 应选择径向错位方式, 同时使用较小直径、较大数值孔径的光纤。

3 实验设计与结果分析

图 3 所示为实验光路图。半导体激光器 (LD) 输出的 975 nm 附近的抽运光通过准直和耦合透镜系统注入到双包层光纤的抽运包层中。其中双包层光纤芯径 $10.5 \mu\text{m}$, 数值孔径 0.16, 包层为 $400 \mu\text{m}$ D 型。光纤分成 A 和 B 两段, A 段光纤 2 m, B 段光纤 0.2 m, 两段光纤之间相互靠近的端面通过压电陶瓷的伸缩控制距离, 构成了可以调节整个激光腔损耗的调 Q 单元。为了减少 3.5% 的非涅耳反射, A 段光纤的后端磨抛约 8° 。B 段光纤的前端磨抛相同的角度, 以保证两段光纤之间较小的耦合损耗。B 段光纤输出的激光通过透镜和高反镜重新耦合回光纤。光纤激光器前端通过双色片输出, 输出的激光经分束镜, 分别利用示波器和功率计探测输出调 Q 波形和功率。

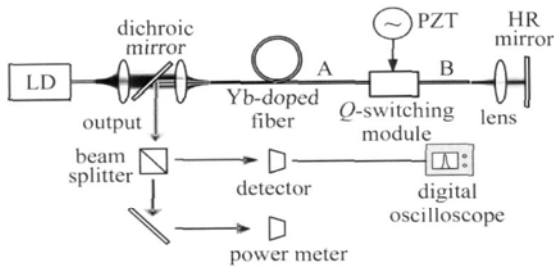


图 3 实验装置示意图

Fig.3 Experimental setup

B 段光纤加入后, 压电陶瓷上未施加电压时, 输出功率下降约 3%, 这是两方面因素的综合效果。首先, 当 B 段光纤引入后, 两段光纤之间必然引入一定的耦合损耗; 其次, B 段光纤仍为增益光纤, 尽管较短, 但是由于抽运光在耦合过程中的损耗较小, B 段光纤仍然得到抽运, 形成一定反转粒子数, 激光通过时, 会形成一定增益。但由于光纤较短, 增益较小, 可见 A 段光纤和 B 段光纤之间的耦合损耗较 3% 略大。

利用光纤激光器速率方程可以计算出不同耦合损耗下激光器的输出功率变化。两段光纤之间的耦合损耗与光纤端面之间的相对位置有关, 大体正比

于施加在压电陶瓷上的驱动电压。通过上面的方法, 可以计算出不同驱动电压下对应的输出功率变化。实验和理论的对比如图 4 所示。采用 PI 公司 P-882.3 型压电陶瓷, 当驱动电压为 100 V 时, 位移约为 $11 \mu\text{m}$ 。

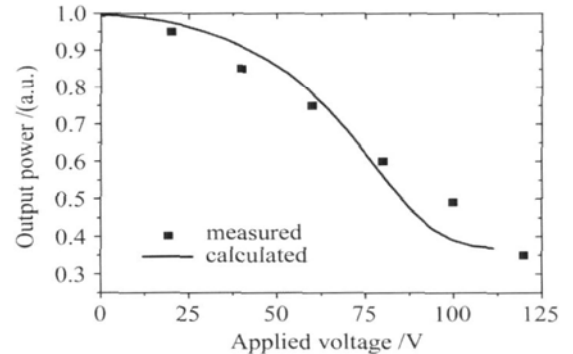


图 4 输出功率随驱动电压的变化

Fig.4 Output power versus applied voltage

利用这种调 Q 方法, 可以得到如图 5 所示的调 Q 脉冲序列。上面的曲线为输出的脉冲, 而下面的曲线为压电陶瓷上的驱动电压。输出脉冲重复频率 1 Hz ~ 10 kHz 连续可调, 脉冲宽度约 370 ns。受关断效果和重复频率的影响, 脉冲之间有一定放大自发辐射现象。另外, 由于调 Q 脉冲上的自锁模效应, 输出的激光脉冲峰值功率不够稳定, 今后需要采用一定外部控制方法加以改进, 例如采用脉冲抽运的方式。

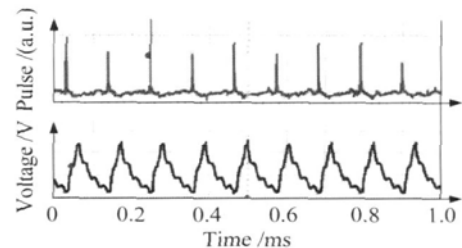


图 5 9.35 kHz 时的脉冲序列和压电陶瓷驱动电压

Fig.5 Q -switched laser pulses and PZT applied voltage at 9.35 kHz

4 结 论

提出了利用两段光纤之间的耦合损耗实现激光器调 Q 的方法。通过对光纤之间耦合损耗的分析得到, 当采用径向错位损耗调节时, 会得到较为灵敏的耦合损耗变化。实验初步证明了对接损耗调 Q 方法的可行性, 并得到了调 Q 脉冲序列。若加入光纤光栅或光纤端面镀膜可完成激光器全光纤化。通过改变两段光纤的长度, 可以方便地改变腔内调 Q 元件的位置, 对于激光腔储能和脉冲建立具有一定作用, 今

后将进一步优化选择 Q 开关位置, 发挥全光纤调 Q 激光器的潜在优势。

参 考 文 献

- 1 Wei Wenlou, Ou Pan, Yan Ping *et al.*. Experimental study of 30 W CW fiber laser by two-end pumping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 5 ~ 8
韦文楼, 欧攀, 闫平等. 双端抽运的 30 W 光纤激光器实验研究 [J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 5 ~ 8
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088 ~ 6092
- 3 Bo Peng, Qiang Liu, Mali Gong *et al.*. Acousto-optic Q -switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 415 ~ 417
- 4 C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, J. K. Sahu *et al.*. 7.7 mJ pulses from a large core Yb-doped cladding pumped Q -switched fibre laser [J]. *CLEO' 2001*. 219
- 5 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 133 ~ 136
廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用 [J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 133 ~ 136
- 6 Wang Yiping, Li Anmin, Yun Bingfeng *et al.*. Fiber Bragg grating sensor system based on virtual instrument and tunable laser technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1132 ~ 1135
汪弋平, 李安民, 恽斌峰等. 基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅传感系统 [J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1132 ~ 1135
- 7 Qian Jingren, Liu Fang, Su Jue. Investigation of frequency null-drift in polarimetric fiber laser current sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 791 ~ 794
钱景仁, 刘方, 苏觉. 激光型光纤电流传感器频率的零漂 [J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 791 ~ 794
- 8 Meng Hongyun, Liao Jianhong, Guan Banggui *et al.*. Fiber laser cutting technology on coronary artery stent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 733 ~ 736
蒙红云, 廖健宏, 官邦贵等. 心血管支架的光纤激光切割工艺 [J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 733 ~ 736
- 9 Lin Xuehuang. Optical Passive Device [M]. Beijing: Post and Telecommunications Press, 1998. 6 ~ 13
林学煌. 光无源器件 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 6 ~ 13
- 10 V. Shah, L. Curtis, W. C. Young. Transmitted power variations in single-mode fiber joints with obliquely polished endfaces [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(10): 1478 ~ 1483