

文章编号: 1001-3806(2012)02-0170-04

主动调 Q 全光纤激光器的发展评述

尚连聚 杨秀芹 马任德

(曲阜师范大学 物理工程学院 山东省激光偏光与信息技术重点实验室 曲阜 273165)

摘要: 调 Q 全光纤激光器相比非全光纤激光器具有效率高、结构紧凑和携带方便等潜在优点,并且主动 Q 开关的重复频率稳定、易于控制,所以全光纤化和主动 Q 开关的完美结合将引发调 Q 光纤激光器质的飞跃。在调 Q 全光纤激光器的发展历程中,布喇格光栅的出现是调 Q 全光纤激光器发展的重要一步, Q 开关的光纤化更是关键的环节。目前,已光纤化的主被动 Q 开关均很常见,但主动光纤型 Q 开关技术并不成熟,或许将传统工艺上比较成熟的声光或电光 Q 开关光纤化是解决该问题的可行途径。

关键词: 光纤光学;主动调 Q ;光纤型 Q 开关;全光纤化

中图分类号: TN248.4; TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.006

Review of actively Q -switched all-fiber lasers

SHANG Lian-ju, YANG Xiu-qin, MA Ren-de

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, College of Physics Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: Compared with the Q -switched non-all-fiber lasers, the Q -switched all-fiber laser has many inherent merits such as high efficiency, compact size and portability. Active Q -switches, whose repetition rate is stable, can be controlled easily. Therefore, perfect combining all-fiberization with active Q -switch will initiate a breakthrough of Q -switched fiber lasers. In the development of the Q -switched all-fiber lasers, the appearance of the FBG is an important step; whereas, the fiberization of the Q -switches is an even more crucial step. Presently, the fiberized Q -switches, whether passive or active, are common, but the technology of active fibered Q -switch is not yet mature. Probably to fiberize the traditional acousto-optic or electro-optic Q -switches is a feasible way.

Key words: fiber optics; actively Q -switched; fibered Q -switches; all-fiberization

引言

调 Q 光纤激光器的研究始于 20 世纪 80 年代中期^[1]。人们最先把已有的体 Q 开关应用于光纤激光器,由于体 Q 开关与光纤和腔镜的耦合效率较低,再加之耦合时需要透镜等分立式的光学元件,调 Q 光纤激光器的实验装置显得比较复杂,光路对准值误差敏感,系统的失调灵敏度也较高。避免上述问题的根本途径就是研究开发调 Q 全光纤激光器^[2-40]。20 世纪 90 年代初,国外研究者们发现了光纤中基于背向受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)效应的自调 Q 现象。在适当的参量和调节下,背向散射光

形成比较稳定的纳秒量级脉冲光,引起光纤谐振腔的 Q 值周期性地发生突变,相当于 Q 开关周期性地调节光纤谐振腔的品质因数。基于 SBS 效应的被动调 Q 全光纤激光器呈现出迅速发展的势头^[2-3, 11-12]。紧接着,基于双光束干涉原理的主动光纤型 Q 开关也为调 Q 全光纤激光器的发展提供了新思路^[4-5, 13]。国内南开大学和中国科学院上海光精密机械研究所等单位开展了大量研究工作,并取得了成果^[3-6, 11]。国外学者对调 Q 全光纤激光器的研究也一度出现了热潮^[7-8, 10, 14]。纵观国内外研究状况,调 Q 全光纤激光器的研究集中于 SBS 效应的被动调 Q 或双光束干涉原理的主动调 Q 方面,对其它被动或主动调 Q 全光纤激光器的研究很少^[8-10, 15]。基于 SBS 效应的被动调 Q 全光纤激光器的缺点是重复频率不稳定且不易调节,基于双光束干涉原理的主动调 Q 全光纤激光器的可控性和开关效果(属于慢 Q 开关)也相对较差。从目前情况看,主动调 Q 全光纤激光器的发展并不完美,原因是可用的主动光纤型 Q 开关仍然存在诸多缺陷。

基金项目:曲阜师范大学博士科研启动基金资助项目(20070212);山东省教育厅资助项目(1LA12)

作者简介:尚连聚(1975-),男,副教授,博士,主要从事激光技术、光电子技术与非线性光学等方面的研究工作。

E-mail: shanglianju@163.com

收稿日期:2011-07-15;收到修改稿日期:2011-07-28

笔者认为,将传统工艺上非常成熟的声光或电光Q开关光纤化或许是解决问题的可行途径。但就目前国内外研究状况和相关技术水平看,研究开发光纤型的声光或电光Q开关(尤其是波导型而非尾纤型)应该是一项非常具有挑战性和开创性的科研工作^[16]。

1 全光纤化是调Q光纤激光器发展的鲜明特色

光纤激光器谐振腔的光纤化是调Q全光纤激光器发展的重要一步,谐振腔的光纤化应归功于光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的出现。早期,光纤激光器的谐振腔由反射镜或光纤端面的反射膜与耦合透镜组成,非光纤化的谐振腔存在耦合效率低和封装困难等问题,光纤端面的反射膜在振荡功率或抽运功率较高时容易损坏,严重制约着光纤激光器输出功率的提高。1989年,美国的MELTZ等人^[17]利用相干紫外光从光纤侧面成功写入了FBG,FBG代替反射镜或反射膜成为光纤激光器研究的热点^[18-19]。FBG是一种低损耗的波长选择器件,它的使用简化了光纤激光器的结构(见图1),提高了光纤激光器的信噪比,压窄了输出激光的线宽,改善了激光光束质量,并可以通过施加应力或改变温度实现一定范围内的波长调谐。由于FBG的使用,具有谐振腔功能的工作光纤与半导体抽运源的尾纤通过锥形光纤(尺寸一致时可不用)能很容易地熔接为一体(见图1),光纤之间的熔接克服了双色镜与透镜组耦合损耗大的缺点^[20-21],不但可以降低光纤激光器的阈值,而且大大提高整体的光光转换效率,同时也便于光纤激光器的实用化与商品化。

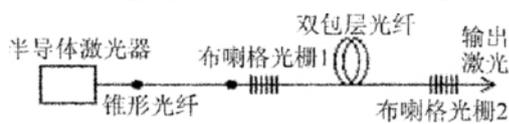


图1 基于FBG的连续波全光纤激光器

FBG的出现仅仅为调Q光纤激光器的全光纤化扫除了一大障碍,Q开关的光纤化更是关键的一步。传统的体Q开关在实现光纤化方面存在很大困难,于是人们首先想到利用光纤中的SBS效应^[2-3,11]或某些主动光纤型Q开关实现调Q。基于SBS效应的被动调Q在压窄脉宽方面占绝对优势,SBS效应不受激光波长限制,Q开关的插入损耗也非常小,这方面的研究成为人们关注的焦点^[2-3,11],但基于SBS效应的被动调Q全光纤激光器存在重复频率不稳定且不易调节等固有缺点,如何更有效地实现主动调Q光纤激光器的全光纤化仍是大家非常关心的问题。近几年来,关于主动调Q全光纤激光器的报道集中在基于双光束干涉原理的主动调Q方面^[4-5,13],其它的零星报道集中

在带尾纤的声光主动调Q、调节耦合效率的主动调Q和基于FBG的磁致主动调Q方面^[8-10]。

2 主动光纤型Q开关是主动调Q全光纤激光器的关键部件

主动光纤型Q开关是实现主动调Q全光纤激光器的关键部件。目前,基于双光束干涉原理的主动光纤型Q开关最为常见,其它类型的主动光纤型Q开关很少,仅在参考文献[8]~参考文献[10]中提到几种,现作简单介绍。

2.1 基于双光束干涉原理的光纤型Q开关

这是一些双光束干涉装置,通常有两个光纤干涉臂,利用压电陶瓷周期性地改变两臂的光程差 ΔL ,当光程差 $\Delta L = k\lambda$ 时(必要时考虑耦合器的相位延迟),便达到谐振腔的高Q值状态,其中 k 为自然数, λ 为振荡光波长。压电陶瓷在周期性电信号驱动下实现了重复频率的可调与可控,但在重复频率稍高时光纤干涉臂伸缩的机械振动可能跟不上压电陶瓷的振动,甚至在重复频率较高(偏离共振区)时光纤干涉臂还可能停止振动。再者,压电陶瓷振动的振幅不均匀时(压电陶瓷的振动频率变化时其振幅可能变化), k 就不是定数了;实际脉冲的重复频率是压电陶瓷振动频率的 k 倍, k 的不确定使光脉冲输出的重复频率真实值不能通过压电陶瓷的电信号频率读出来,主动调Q也就失去其应有的可操控性。然而,在主动光纤型Q开关技术还不成熟的情况下,它们仍然在主动调Q全光纤激光器的研究中倍受青睐^[4-5,13]。

2.1.1 光纤环形镜Q开关 光纤环形镜Q开关是基于光纤布喇格光栅和压电陶瓷的环状光纤型Q开关。如图2所示,光纤干涉环被光纤光栅分为基本相等的两段,满足光纤光栅中心波长的信号光被光纤光栅反射后在3dB耦合器处发生干涉,干涉极大值的出现取决于两臂的光程差,其中一臂上的压电陶瓷在正弦电压信号的驱动下周期性地改变两臂的光程差,3dB耦合器输出端上的光强随之发生周期性变化,于是谐振腔的增益被周期性地调制,调制的结果相当于某个Q

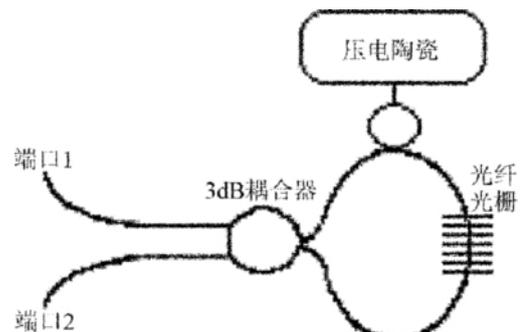


图2 光纤环形镜调Q装置

开关在起作用。

2.1.2 光纤迈克尔逊干涉仪 Q 开关 光纤迈克尔逊干涉仪的原理类似于光纤环形镜。如图 3 所示,两个光纤光栅相当于普通迈克尔逊干涉仪中的反射镜,光纤光栅反射的两束光在 3dB 耦合器处发生干涉。通过压电陶瓷周期性地改变双臂差,3dB 耦合器输出端的光强随之发生周期性变化,调制的过程也与光纤环形镜 Q 开关类似。



图 3 光纤迈克尔逊干涉仪调 Q 装置

2.1.3 光纤马赫-曾德尔干涉仪 Q 开关 光纤马赫-曾德尔干涉仪由两个 3dB 耦合器和两段长度基本相等的干涉臂组成。如图 4 所示,入射光经第 1 个 3dB 耦合器后分成两部分,这两部分光在第 2 个 3dB 耦合器处发生干涉,通过压电陶瓷周期性地改变其中一臂的长度,第 2 个 3dB 耦合器上的出射光随之发生周期性变化,整个装置串接到谐振腔中便起到 Q 开关的作用。



图 4 光纤马赫-曾德尔干涉仪调 Q 装置

2.2 带尾纤的声光 Q 开关^[8]

在体声光 Q 开关的基础上增加了两个耦合尾纤,严格说来算不上真正意义上的光纤型 Q 开关,因为声光 Q 开关本身并未光纤化。图 5 中的声光调制器就是带尾纤的声光 Q 开关。由于尾纤与声光 Q 开关的耦合技术水平的问题,整个 Q 开关的插入损耗比较高,但它自身所带的尾纤使其使用比较方便。另外,声光 Q 开关属于快开关,需要的调制电压低,脉冲周期稳定,衍射效率高,其优点也是显而易见的。

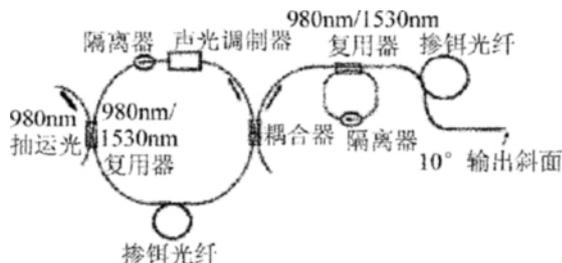


图 5 全光纤声光调 Q 掺铒光纤激光器

2.3 调节耦合效率的光纤型 Q 开关^[9]

通过压电陶瓷调节工作光纤与反射光纤光栅的耦合效率,使光纤中产生周期性损耗也能起到 Q 开关的作用。图 6 所示的调 Q 全光纤激光器就是利用该 Q

开关实现了脉冲输出。由于它离不开压电陶瓷的驱动作用,重复频率稍高时也存在光纤的振动可能跟不上压电陶瓷振动的情况,甚至在重复频率较高(偏离共振区)时光纤还可能停止振动,而且 Q 开关打开与关闭的效果并不理想,仍属于“慢”Q 开关范畴。

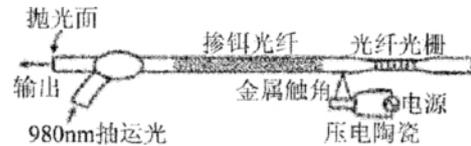


图 6 基于声波调制衰减器的全光纤调 Q 掺铒光纤激光器

2.4 基于 FBG 的磁弹性光纤型 Q 开关^[10]

基于 FBG 的磁弹性光纤型 Q 开关是 PÉREZ-MILLÁN 等人的最新研究成果,实验上完全实现了主动调 Q 光纤激光器的全光纤化。Q 开关通过磁弹性调制器周期性地调节反射 FBG 的长度实现。根据 FBG 的相关理论,FBG 长度发生改变时其反射率随之改变,谐振腔的净增益也就相应改变。如图 7 所示,磁弹性调制器的磁弹性换能器与刻有 FBG 的光纤熔为一体,整个 Q 开关体积小,可与工作光纤实现无缝耦合,实乃名副其实的主动光纤型 Q 开关。报道中实现了重复频率 0kHz ~ 125kHz 可调。虽然 Q 开关的上升时间稍有些长,但 Q 开关结构实现了高度集成化设计。

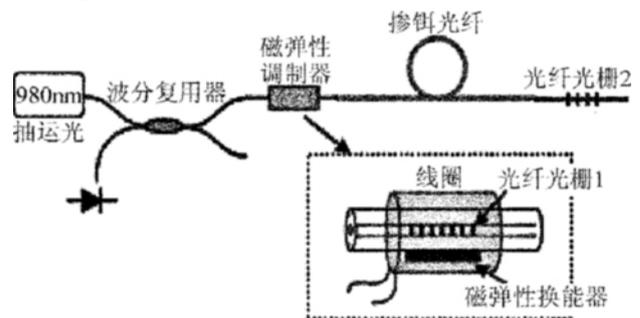


图 7 利用磁弹性调制器的全光纤调 Q 掺铒光纤激光器

3 主动调 Q 与全光纤化相结合是调 Q 光纤激光器的发展方向

调 Q 全光纤激光器相比普通调 Q 光纤激光器具有效率高(耦合效率高、信号光反馈效率高和光光转换效率高)、结构紧凑和携带方便等潜在优点,主动调 Q 的重复频率又易于控制而且调制效率高。若能把主动调 Q 和全光纤化完美地结合起来,将引起调 Q 全光纤激光器发展上质的飞跃,这其中最关键的一个环节就是开发高性能的主动光纤型 Q 开关。目前的主动光纤型 Q 开关技术还很不成熟,可用的主动光纤型 Q 开关均存在诸多缺陷。笔者认为,将传统工艺上非常成熟的声光或电光 Q 开关技术与现代光波导技术相结合或许是解决该问题的较佳途径^[16]。可以相信,在科技工作者们的共同努力下,调 Q 全光纤激光器的发

展必将出现历史性变革 效率高、可控性强的主动调Q全光纤激光器必将呈现出蓬勃发展的势头。

4 展 望

对于主动调Q全光纤激光器研究发展,提高主动光纤型Q开关的性能指标是关键。声光和电光Q开关的优势是不言而喻的,开展主动调Q全光纤激光器的研究很容易想到使用光纤型的声光或电光Q开关。光纤型声光Q开关的研究已取得了阶段性进展,但由于技术的原因,光纤型声光Q开关的优势没有完全体现出来,相信它的指标必将达到体声光Q开关的水平,因此,开展这方面的研究意义重大。目前,光纤型电光Q开关的研究还未见报道,电光Q开关属于快开关,若能实现电光Q开关的光纤化,主动调Q全光纤激光器的发展必将出现质的飞跃。

参 考 文 献

- [1] GAETA C J, DIGONNET M J F, SHAW H J, *et al.* Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 15(12): 1645-1651.
- [2] ZHANG J, LI J H, JIANG X, *et al.* LD pumped Q-switching and self-starting mode-locked all fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, B4(3): 229-234.
- [3] HU Sh L, LU F Y, XIE Ch X, *et al.* Self-Q-switched Yb³⁺ all-fiber laser based on fiber interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(6): 637-639 (in Chinese).
- [4] GE Ch F, YUAN Sh Zh, FAN Y X, *et al.* All-fiber tunable Q-switched laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1645-1648 (in Chinese).
- [5] XIA J Zh, CAI H W, REN H, *et al.* Pulse study of an all-fiber Q-switch erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8): 989-992 (in Chinese).
- [6] FAN Y X, DAI W T, ZHAI A T, *et al.* The optimization for a Q-switched all fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2001, 12(9): 906-909 (in Chinese).
- [7] TORDELLA L, DJELLOUT H, DUSSARDIER B, *et al.* High repetition rate passively Q-switched Nd³⁺:Cr⁴⁺ all-fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(18): 1307-1308.
- [8] ROY P, PAGNOUX D, MOUNEU L, *et al.* High efficiency 1.53mm all-fibre pulsed source based on a Q-switched erbium doped fibre ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(15): 1317-1318.
- [9] HUANG D W, LIU W F, YANG C C. Q-switched all-fiber laser with an acoustically modulated fiber attenuator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1153-1155.
- [10] PÉREZ-MILLÁN P, DÍEZ A, ANDRÉS M V, *et al.* Q-switched all-fiber laser based on magnetostriction modulation of a Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5046-5051.
- [11] LU F Y, FAN Y X, WANG H J, *et al.* Experimental study of cladding pumped Q-switched fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(12): 1057-1060 (in Chinese).
- [12] ZHANG L, WANG Zh Y, ZHANG H, *et al.* Study on Q-switched fiber laser based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 44-46 (in Chinese).
- [13] DU W Ch, TAN H Y, LIU S H. Novel structure for Q-switched Er doped fiber laser using a fiber grating Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(8): 1077-1079 (in Chinese).
- [14] RAVET G, FOTIADI A A, BLONDEL M, *et al.* Passive Q-switching in all-fibre Raman laser with distributed Rayleigh feedback [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(9): 528-529.
- [15] CAO L, YANG L Zh, GUO X Y, *et al.* Experimental study Er³⁺-doped fiber laser based on the nonlinear optical loop mirror [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 613-615 (in Chinese).
- [16] NING J P, SUN L Y, HAN Q, *et al.* Q-switched all-fiber cladding-pumped ytterbium-doped fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5627: 560-564.
- [17] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [18] BAEK S, SOH D B S, JEONG Y, *et al.* A cladding-pumped fiber laser with pump-reflecting inner-cladding Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(2): 407-409.
- [19] HU G J, PAN Y Zh, GUO Y B, *et al.* High-power fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 405-408 (in Chinese).
- [20] SOH D B S, YOO S, NILSSON J, *et al.* Neodymium-doped cladding-pumped aluminosilicate fiber laser tunable in the 0.9mm wavelength range [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(9): 1275-1282.
- [21] HUO Y, CHEO P K, KING G G, *et al.* Modeling and experiments of actively Q-switched Er³⁺-Yb³⁺ codoped clad-pumped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(4): 573-580.