

全光纤自调 Q 双包层 Er-Yb 共掺光纤环形激光器

吴端端, 罗正钱*, 蔡志平, 许惠英

(厦门大学 信息科学与技术学院, 电子工程系光电子技术研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:报道了一种结构紧凑的自调 Q 双包层 Er-Yb 共掺光纤(EYDF)环形激光器。利用双包层 EYDF 同时作为增益光纤和可饱和吸收体, 光纤光栅(FBG)作为波长选择器, 实现了中心波长 1539.80 nm 的稳定自调 Q 脉冲输出。自调 Q 运转可在泵浦功率 376~1208 mW 的较大范围内获得, 调 Q 重复频率从 7.40 kHz 到 64.2 kHz 连续可调谐。自调 Q 最短脉冲宽度为 1.8 μ s, 最大单脉冲能量为 1.65 μ J, 最大平均输出功率为 81.3 mW, 调 Q 脉冲的频谱信噪比(SNR)最高可达 60 dB。

关键词:自调 Q; Er-Yb 共掺光纤(EYDF)激光器; 可饱和吸收体; 重复频率; 信噪比(SNR)

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2014)03-0460-05

An all fiber self-Q-switched Er-Yb co-doped double-cladding fiber ring laser

WU Duan-duan, LUO Zheng-qian*, CAI Zhi-ping, XU Hui-ying

(Institute of Optoelectronic Technology, Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A compact self-Q-switched erbium/ytterbium co-doped double-cladding fiber (EYDF) ring laser is demonstrated. Using an EYDF as both the gain fiber and saturable absorber, a fiber Bragg grating (FBG) as the wavelength-selective element, the laser can operate at the status of stable self-Q-switching with the central wavelength of 1539.80 nm and narrow linewidth of 0.07 nm. The self-Q-switching operation can keep in a wide pump power range from 376 mW to 1208 mW. As the pump power increasing, the pulse repetition rate can be continuously tuned from 7.40 kHz to 64.2 kHz. When the pump power reaches 1208 mW, the largest pulse repetition rate of 64.2 kHz can be achieved. The largest average output power of 81.3 mW is obtained from the 90% port of the optic coupler. The shortest pulse duration and the largest single pulse energy of the Q-switched laser are 1.8 μ s and 1.65 μ J, respectively. The self-Q-switching operation is stable with the radio-frequency signal-to-noise ratio (SNR) of more than 60 dB.

Key words: self-Q-switched; Er-Yb co-doped fiber (EYDF) laser; saturable absorber; repetition rate; signal-to-noise ratio (SNR)

1 引言

调 Q 光纤激光器^[1~6]产生大能量且高峰值功率的光脉冲, 可广泛应用于激光加工、医疗、遥感和光通信等领域。近年, 随着石墨烯^[7]等新型纳米材料的出现以及掺杂光纤可饱和吸收特性的提出, 可饱和吸收体调 Q 光纤激光器被广泛研究。

尽管石墨烯具有可饱和阈值低、恢复时间快和可饱和吸收范围宽等特点, 但其与光纤耦合过程中易引入损耗、导致腔体结构复杂等问题, 直接影响了激光器的工作性能。

相比较而言, 掺杂光纤可饱和吸收体具有结构简单、易于设计、插入损耗低和可实现全光纤化。掺 Bi^[8]、掺 Sm^[9~11]、掺 Tm^[12] 和掺 Ho^[13,14]

* E-mail: zqluo@xmu.edu.cn

收稿日期: 2013-08-19 修订日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61177044)和福建省自然科学基金(2011J01370)资助项目

等稀土离子光纤已被证实为有效的可饱和吸收材料,且具有很高的损伤阈值。利用掺杂光纤实现的调Q光纤激光器能够获得很高的单脉冲能量。Dvoyrin等人^[8]利用掺Bi光纤作为可饱和吸收体,在掺Yb光纤激光器中产生了最大单脉冲能量100 μJ 的调Q脉冲。Lu等人^[10]利用掺Sm光纤可饱和吸收体,在掺Yb光纤激光器中获得28 μJ 的调Q单脉冲能量。Kurkov等人^[12,13]分别利用掺Tm和掺Ho光纤作为可饱和吸收体,实现了单脉冲能量70 μJ 和0.35 mJ的掺Er和掺Yb激光器调Q脉冲输出。然而,附加的掺Bi等光纤使得腔体结构复杂、成本增加。

本文仅采用一段5 m长的Er-Yb共掺光纤(EYDF)为可饱和吸收体,无需附加掺Tm、Sm等较昂贵特殊的光纤,即可实现一种结构紧凑的全光纤自调Q光纤激光器。自调Q运转可在泵浦功率376~1208 mW的较大范围内获得,调Q脉冲的频谱信噪比(SNR)最高可达60 dB,性能优于文献^[15]的自调Q、自锁模Er-Yb共掺光纤激光器。

2 实验装置与原理

全光纤自调Q双包层EYDF环形激光器的实验装置如图1所示。最大输出功率9 W的976 nm LD,通过合束器(WDM)泵浦一段5 m长的双包层EYDF(Nufern公司,SM-EYDF-7/130)。10/90光纤耦合器(OC)的90%端作为激光输出端。光纤环行器(circulator)保证激光在腔内逆时针单向运转。光纤光栅(FBG)作为激光波长选择部件,其中心波长为1539.80 nm,谱线宽度为0.27 nm,反射率为89%。光纤环形腔总腔长约10 m。光谱分析仪、频谱分析仪、功率计、光探测器和示波器分别用于测量激光光谱、输出脉冲频谱特性、输出功率和脉冲序列。

实验中,所用的EYDF在915 nm的吸收系数为 0.75 ± 0.2 dB/m,在1535 nm附近的纤芯吸收系数为 35 ± 10.0 dB/m。在一定的泵浦范围内,该EYDF不仅充当激光增益介质,而且可提供可饱和吸收特性实现激光调Q或锁模。泵浦功率相对较弱时,泵浦光仅能对前部分EYDF光纤形成粒子数反转,而后部分EYDF光纤可对1539 nm激光产生可饱和吸收特性。其机理解释如下:当腔内1539 nm激光较弱时,后部分EYDF光纤对其吸收很强;而当腔内1539 nm激光较强时,后部分EYDF光纤容易吸收饱和(吸收较小)。同时,OC的90%输出和环形器的功率损耗减弱了返回EYDF的光功率,极大拓宽了激光器的可调Q范围。

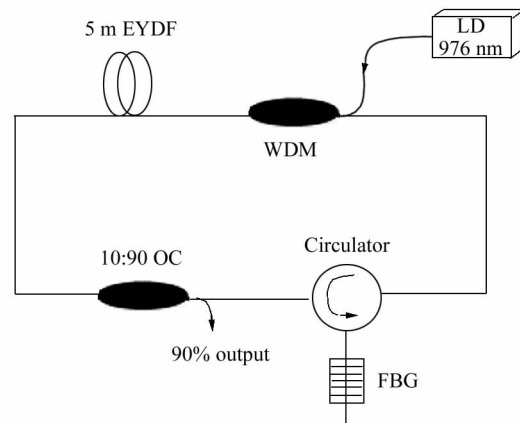


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

3 结果与讨论

实验中,激光器的激射阈值为376 mW。图2为实验测得的激光器输出光谱图,激射中心波长为1539.80 nm,谱线宽度约为0.07 nm。由于FBG的波长选择作用,不同功率下激光中心波长波动仅为0.01 nm,有利于实现稳定的自调Q运转。

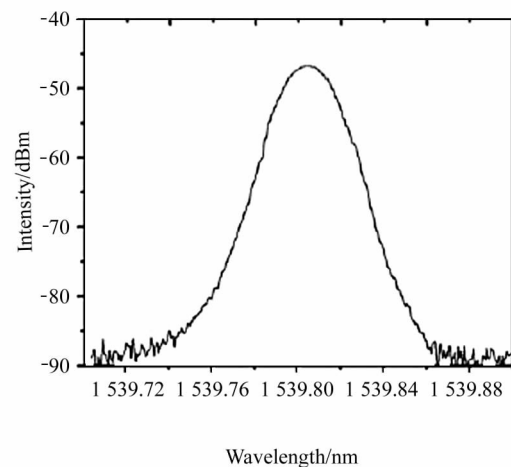


图2 泵浦功率671 mW的自调Q激光光谱图

Fig. 2 Spectrum of the self-Q-switched laser at the pump power of 671 mW

当泵浦功率达到激光激射阈值时,示波器上即观察到自调Q脉冲。随着泵浦功率的增加,自调Q脉冲重复频率不断增加。图3为实验观察到的不同重复频率的自调Q脉冲,当泵浦功率从376 mW增加到1208 mW时,自调Q脉冲的重复频率能够从7.40 kHz到64.2 kHz宽范围连续可调谐。在不同

泵浦功率下,自调Q脉冲很稳定,没有观察到明显的抖动。即使激光腔连续工作超过10 h,稳定的自调Q脉冲仍然可以重复。

随着泵浦功率的增加,平均输出功率逐渐增加,斜效率约为9.3%。由图4(b)可见,在泵浦功率为

1208 mW时,激光器获得最大的输出功率81.3 mW;随着泵浦功率的增加,脉冲呈现越来越短的趋势,在泵浦功率为1076 mW时自调Q脉冲宽度最短可达1.8 μs;继续增加泵浦功率,脉冲宽度反而增加,这是强光作用下腔内非线性效应等导致的;单脉

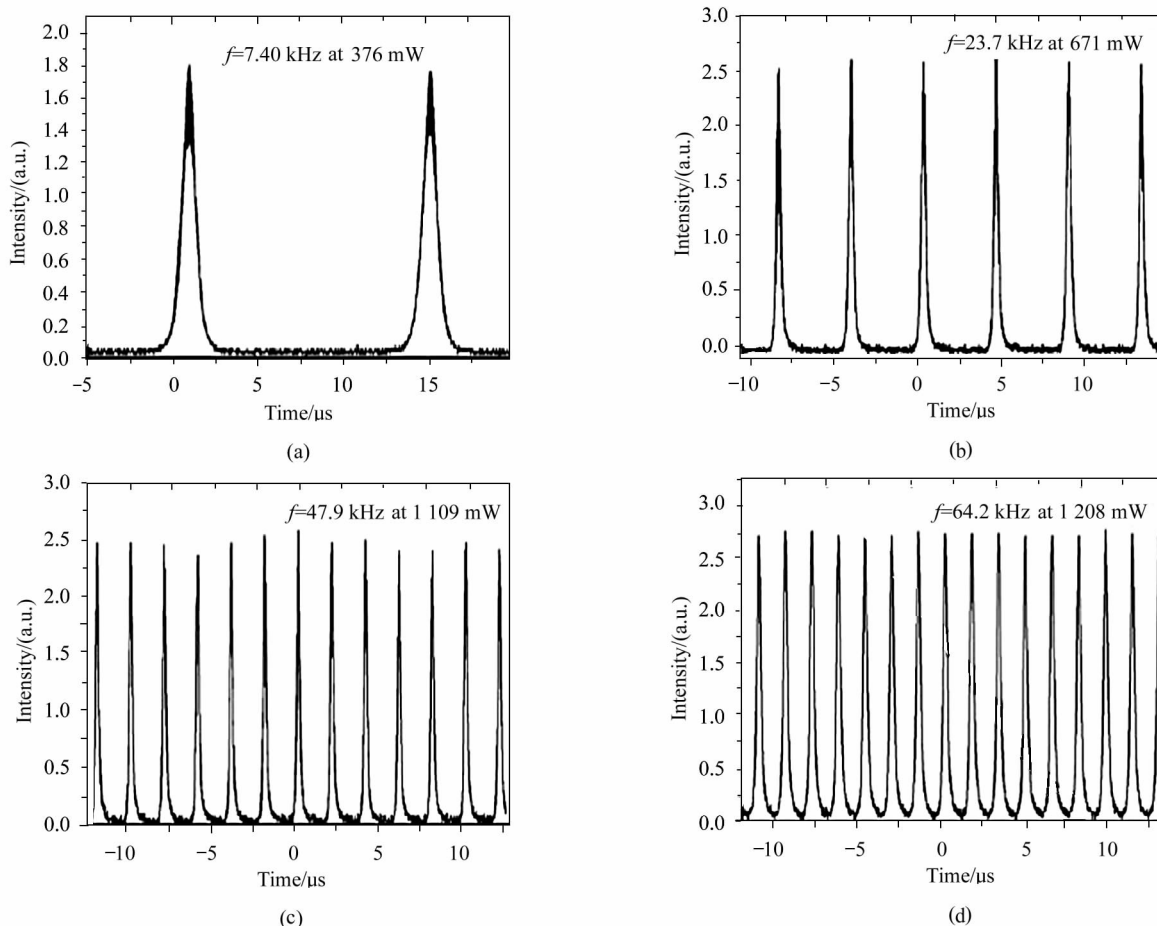


图3 不同泵浦功率下的自调Q脉冲序列:(a) $P_p=376$ mW; (b) $P_p=671$ mW; (c) $P_p=1109$ mW; (d) $P_p=1208$ mW

Fig. 3 Oscilloscope traces of the self-Q-switched pulse trains under different pump power values;

(a) $P_p=376$ mW; (b) $P_p=671$ mW; (c) $P_p=1109$ mW; (d) $P_p=1208$ mW

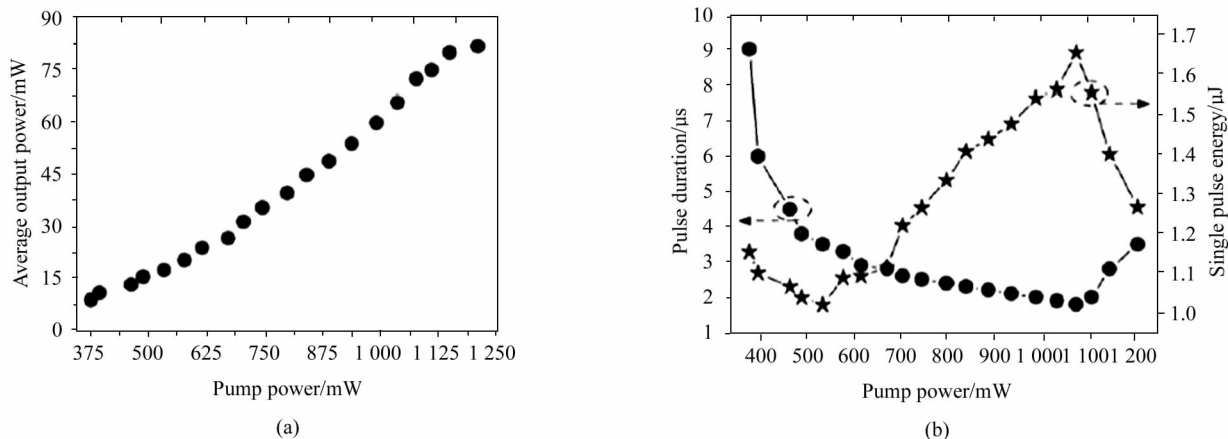


图4 (a) 平均输出功率、(b) 自调Q脉冲宽度和单脉冲能量随泵浦功率的变化曲线

Fig. 4 (a) Average output power, (b) pulse duration and pulse energy as a function of the pump power

冲能量随着泵浦功率的变化也大体呈现增加的趋势,高泵浦功率下同样在1076 mW时出现转折,最大单脉冲能量可达1.65 μJ 。

当泵浦功率为1109 mW时,测量了自调Q脉冲的频谱特性。从图5(a)可看出,基频的SNR高达

60 dB,说明激光器工作在稳定的自调Q状态。从图5(b)可见,二次谐波的SNR仍然大于55 dB,十次谐波同时达到40 dB,说明腔内的自调Q状态相当稳定。图5(b)中,底座包络是仪器(GWINSTEK GSP-930)自带的电噪声。

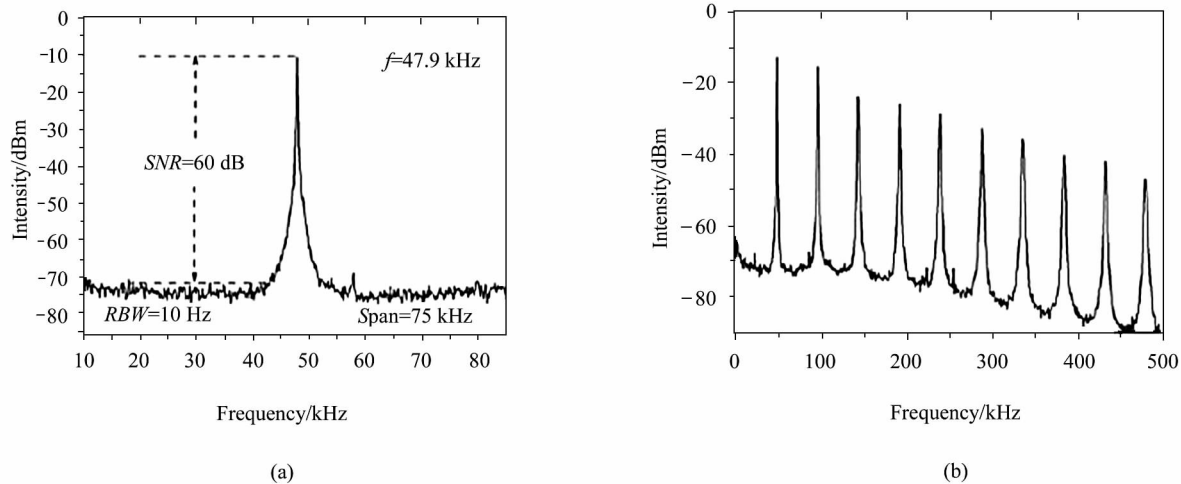


图5 泵浦功率为1109 mW的频谱图:(a)基频49.7 kHz的频谱图;(b)500 kHz的宽带频谱图

Fig. 5 RF output spectra at the pump power of 1109 mW:(a) At the fundamental repetition rate of 47.9 kHz;(b) Broadband RF spectrum with 500 kHz span

4 结论

对结构紧凑的自调Q双包层EYDF环形激光器进行了研究。利用增益光纤EYDF同时作为可饱和吸收体,FBG作为波长选择器,实现了中心波长为1539.80 nm、谱线宽度为0.07 nm的稳定自调Q脉冲输出。自调Q运转可在泵浦功率376~1208 mW的较大范围内获得,自调Q重复频率从7.40~64.2 kHz连续可调谐。当泵浦功率为1076 mW时,获得了脉冲宽度为1.8 μs 、单脉冲能量为1.65 μJ 的自调Q脉冲。激光器最大平均输出功率为81.3 mW,自调Q脉冲的频谱SNR最高可达60 dB。激光器长时间的稳定工作以及宽范围、高性能的调Q脉冲输出,说明将掺杂光纤作为可饱和吸收体用于调Q光纤激光器是可行的。

参考文献:

[1] Zhao H M, Lou Q H, Zhou J, et al. An acousto-optic Q-switched fiber laser using China-made double-cladding fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(9): 522-523.
[2] Luo Z Q, Zhou M, Weng J, et al. Graphene-based passive-

ly Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser [J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3709-3711.
[3] Yap Y K, De La Rue R M, Pua C H, et al. Graphene-based Q-switched pulsed fiber laser in a linear configuration [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(4): 041405.
[4] Luo Z Q, Zhou M, Wu D D, et al. Graphene-induced nonlinear four-wave-mixing and its application to multiwavelength Q-switched rare-earth-doped fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(18): 2732-2739.
[5] Liu C, Ya C C, Luo Z Q, et al. High-energy passively Q-switched 2 μm Tm³⁺-doped double-clad fiber laser using graphene-oxide-deposited fiber taper [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 204-209.
[6] FAN Ye-xian, LV Fu-yun, HU Shu-ling, et al. Progress of cladding-pumped Q-switched fiber laser [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(8): 872-875.
樊亚仙, 吕福云, 胡姝玲, 等. 包层泵浦调Q光纤激光器的研究进展[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(8): 872-875.
[7] CHENG Hui-hui, LUO Zheng-qian, YE Chen-chun, et al.

Graphene-based erbium-doped fiber soliton laser with passive mode locking and tunable harmonic orders[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, **23**(6): 1035-1038.

程辉辉,罗正钱,叶陈春,等.石墨烯被动锁模谐波阶数可调的掺铒光纤孤子激光器[J].光子学报,2012, **23**(6):1035-1038.

- [8] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M. Yb-Bi pulsed fiber lasers[J]. Optics Letters, 2007, **32**(5): 451-453.
- [9] Preda C E, Ravet G, Mégret P. Experimental demonstration of a passive all-fiber Q-switched erbium-and samarium-doped laser [J]. Optics Letters, 2012, **37**(4): 629-631.
- [10] Lu Y, Gu X. All-fiber passively Q-switched fiber laser with a Sm-doped fiber saturable absorber[J]. Optics Express, 2013, **21**(2): 1997-2002.
- [11] Fotiadi A A, Kurkov A S, Razdobreev I. All-fiber passively Q-switched ytterbium laser[A]. Lasers and Electro-Optics Europe[C]. 2005, 515.

[12] Kurkov A S, Ya E S, Marakulin A V, et al. All fiber Er-Tm Q-switched laser [J]. Laser Physics Letters, 2010, **7**(11): 795-797.

[13] Kurkov A S, Sholokhov E M, Medvedkov O I. All fiber Yb-Ho pulsed laser[J]. Laser Physics Letters, 2009, **6**(2): 135-138.

[14] Sholokhov E M, Marakulin A V, Kurkov A S, et al. All fiber Q-switched holmium laser [J]. Laser Physics Letters, 2012, **8**(5): 382-385.

[15] XIE Chun-xia, LV Fu-yun, ZHANG Shu-min, et al. Self-Q-switched and self-mode-locked erbium/ytterbium co-doped fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, **35**(4): 385-389.

谢春霞,吕福云,张书敏,等.自调Q、自锁模铒/镱共掺光纤激光器[J].光子学报,2006, **35**(4): 385-389.

作者简介:

吴端端 (1988-),女,福建泉州,博士研究生,主要从事脉冲光纤激光器方面的研究.