

文章编号: 1001-3806(2015)05-0679-06

自调 Q 掺铒光纤激光器动态特性研究

杨亚婷, 杜洋, 王海燕, 胡贵军*

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130012)

摘要: 为了研究自调 Q 掺铒光纤激光器输出动态特性, 采用搭建全光纤结构的线形腔和环形腔自调 Q 掺铒光纤激光器进行了理论分析和实验验证。实验中, 当抽运功率达到起振阈值后, 随着抽运功率的增加, 用示波器观察输出激光, 线形腔输出激光依次经历了连续波、自调 Q 两种运行状态, 由于抽运功率的限制, 未能再次出现连续波运行状态, 而环形腔输出激光则先经历了自调 Q 运行状态, 然后是连续波运行状态; 线形腔在抽运功率 21mW ~ 190mW 的范围内, 可获得脉冲宽度 $8\mu\text{s}$ ~ $100\mu\text{s}$ 范围内可调、重复频率 2.5kHz ~ 54kHz 范围内可调的自调 Q 脉冲; 环形腔在抽运功率为 16.2mW ~ 110mW 时, 可获得的脉冲宽度在 $165\mu\text{s}$ 左右。结果表明, 自调 Q 掺铒光纤激光器因腔结构的不同, 输出激光动态特性也不同; 线形腔和环形腔均有自调 Q 脉冲输出, 但线形腔自调 Q 范围更大。

关键词: 激光器; 动态特性; 自调 Q ; 掺铒光纤激光器; 脉冲宽度; 重复频率

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.05.020

Study on the dynamical behavior of self- Q -switched erbium-doped fiber laser

YANG Yating, DU Yang, WANG Haiyan, HU Guijun

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to study the dynamical behaviors of self- Q -switched erbium-doped fiber lasers, all-fiber self- Q -switched erbium-doped fiber lasers with linear cavity configuration and ring cavity configuration were constructed. Theoretical analysis and experimental verification were also carried out. In the experiment, when pump power reached the threshold, output laser was observed by oscilloscope with the increase of pump power. Linear cavity laser output experienced two operation states of continuous wave (CW) and self- Q -switched in turn and failed to appear CW operation state again because of the constraint of pump power. Ring cavity laser output experienced self- Q -switched operation state at first and then CW operation state. For linear cavity, self- Q -switched pulses can be obtained with pulse width from $8\mu\text{s}$ to $100\mu\text{s}$ and repetition rate from 2.5kHz to 54kHz in pump power range from 21mW to 190mW. For ring cavity, self- Q -switched pulses can be obtained with pulse width about $165\mu\text{s}$ and repetition rate about 3kHz at pump power range from 16.2mW to 110mW. The results show that dynamical behaviors of output laser are different because cavity configurations of self- Q -switched erbium-doped fiber laser are different. Although both linear and ring cavities have self- Q -switched pulse output, the range of self- Q -switched pulse is wider for linear cavity.

Key words: lasers; dynamical behavior; self- Q -switched; erbium-doped fiber laser; pulse width; repetition rate

引言

调 Q 光纤激光器可以产生高峰值功率、脉冲宽度为纳秒量级的脉冲激光, 这种短脉冲激光在测距、通信系统、远程传感、高速全息照相、军事和医疗等方面被广泛应用。自 1986 年 ALCOCK 首次在掺铒光纤激光器中实现调 Q 脉冲输出以来^[1], 调 Q 光纤激光器便在世界范围内得到了广泛的研究, 调 Q 光纤激光器的理

论和实验都有了很大的发展^[2-7]。

调 Q 掺铒光纤激光器由于其运转波长与光通信的第三窗口 ($1.55\mu\text{m}$) 相一致, 在光纤通信系统中获得广泛的应用, 引起了人们的普遍重视^[8-10]。在无外加调制的情况下, 掺铒光纤激光器会出现自调 Q 现象, 产生自调 Q 脉冲。这种激光器中的自调 Q 脉冲已引起众多学者的兴趣^[11-14]。BIELAWSKI 等人^[15]把产生自脉冲的原因归结为: 由于掺铒光纤中双折射的存在, 光纤中两正交偏振态在传输过程中通过偏振交叉饱和和产生强烈耦合或转化。而 SANCHEZ 等人^[16]则认为, 当掺铒光纤中的铒离子对浓度达到一定水平时, 可起到一个可饱和吸收的作用而引起自脉冲运转, 并对此进行了实验和理论的验证, 得到了令人满意的结果。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61177066); 吉林省科技发展计划资助项目 (20120761; 20140203009GX)

作者简介: 杨亚婷 (1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事高功率光纤激光器与放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hugj@jlu.edu.cn

收稿日期: 2014-08-14; 收到修改稿日期: 2014-11-11

本文中采用一段 20m 长的掺铒光纤同时作增益光纤和可饱和吸收体,搭建线形腔和环形腔两种结构的自调 Q 掺铒光纤激光器,分别研究两种腔结构下激光器的动态特性,并分析了自调 Q 现象的原因,实现了结构紧凑的全光纤自调 Q 光纤激光器。线形腔结构中,在抽运功率 21mW ~ 190mW 的范围内,获得了脉冲宽度 8μs ~ 100μs 范围内可调、重复频率 2.5kHz ~ 54kHz 范围内可调的自调 Q 脉冲。环形腔中,在抽运功率 16.2mW ~ 110mW 范围内,获得了脉冲宽度 165μs 左右、重复频率约为 3kHz 的自调 Q 脉冲。线形腔脉冲重复频率稳定度优于 10%,脉冲峰值功率稳定度优于 5%;环形腔脉冲重复频率稳定度优于 5%,峰值功率稳定度优于 11%。

1 线形腔自调 Q 掺铒光纤激光器的动态特性研究

线形腔结构如图 1 所示。一段 20m 掺铒光纤作增益介质,1560nm 光纤光栅进行选波,其反射率为 99%,作为激光谐振腔的高反端。在输出端直接采用经抛光处理的光纤端面作为耦合腔镜,对光纤内的信号光产生约 4% 的非涅耳反射。抽运源是 980nm 单模半导体激光器,通过一个 980/1550 波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)将抽运光耦合进激光腔内。输出端的 1550nm 隔离器(isolator, ISO)是为了保证激光的单方向传输。

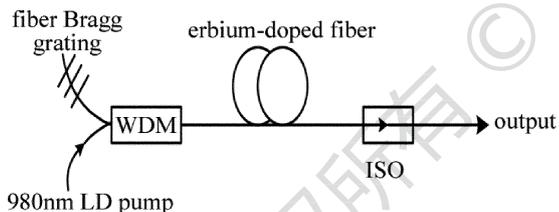


Fig. 1 Structure diagram of self-Q-switched erbium-doped fiber laser with linear cavity

对线形腔结构的掺铒光纤激光器进行了实验。当注入的抽运功率为 17mW 时,达到激光器的起振阈值,由光谱分析仪观察到有波长约为 1560nm 的激光产生,对应的示波器显示为连续波,如图 2 所示。随着抽运功率的提高,输出功率成线性增长趋势。当抽运功率提高到 21mW 时,激光器连续工作状态变得不稳定,且激光器的输出光强呈现自脉冲行为,自脉冲波形如图 3 所示。脉冲宽度为 100μs,重复频率 2.5kHz。继续增加抽运功率,在示波器中观察到激光输出功率出现一种类似正弦信号的波动,这种正弦波动的脉冲,其重复频率随抽运功率的提高而增加,宽度随抽运功率的提高而减小,幅值有先增大后减小的趋势,如图 4 所示。图 5 为重复频率、脉冲宽度和输出功率随抽运

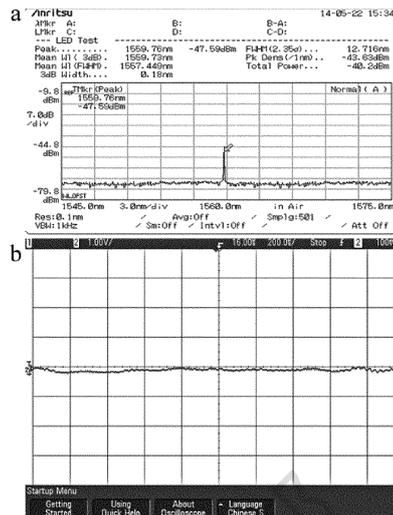


Fig. 2 Spectrogram and oscillogram of oscillating laser
a—spectrogram b—oscillogram

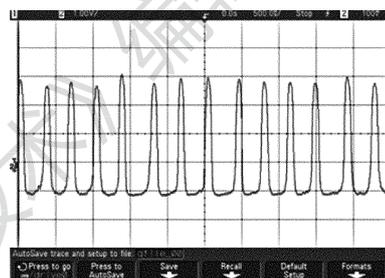


Fig. 3 Oscillogram of the self-Q-switched pulse

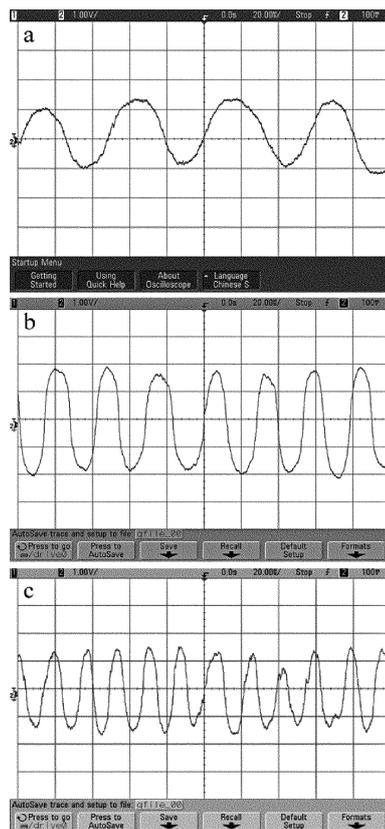


Fig. 4 Sinusoidal graph with pump power (20μs/div)
a—40mW b—90mW c—190mW

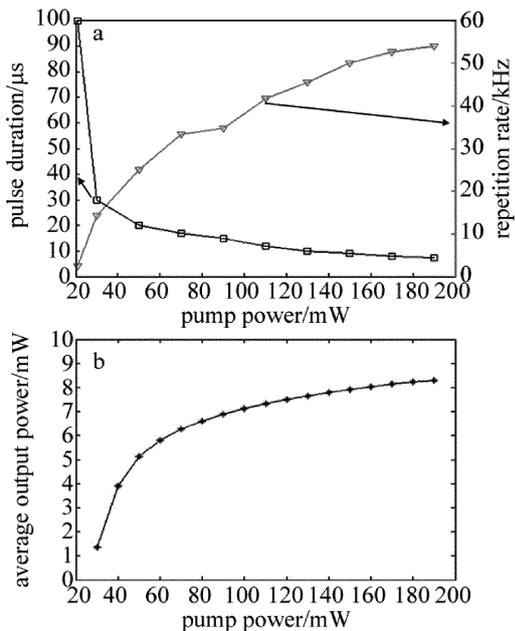


Fig. 5 Graph of repetition frequency, pulse width and output power change with pump power
a—change of repetition frequency and pulse width b—change of output power

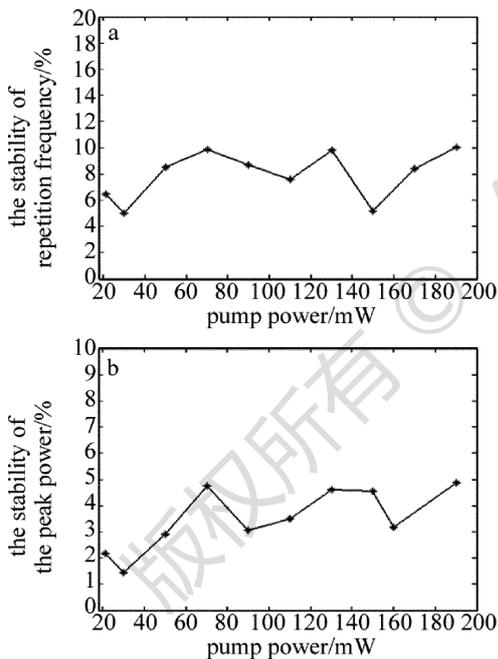


Fig. 6 The stability of repetition frequency and peak power with different pump power
a—repetition frequency b—peak power

功率的变化曲线图。图 6 显示了不同抽运功率下, 输出脉冲重复频率及峰值功率稳定度情况。在抽运功率 21mW ~ 190mW 的范围内, 正弦脉冲的宽度在 8μs ~ 100μs 范围内可调、重复频率在 2.5kHz ~ 54kHz 范围内可调。

综上所述, 随着抽运功率的增加, 线形腔结构掺铒光纤激光器经历了连续波、自调 Q 脉冲两种运行状态。

2 环形腔自调 Q 掺铒光纤激光器的动态特性研究

环形腔结构如图 7 所示。采用同线形腔中相同的 20m 掺铒光纤作增益光纤, 1560nm 光栅进行选波, 3dB 耦合器的一个输出臂作为整个激光器的输出端, 光纤环形器保证激光在腔内逆时针单向运转。光谱分析仪、功率计、光电探测器和示波器分别用于测量激光光谱、输出功率和脉冲序列。

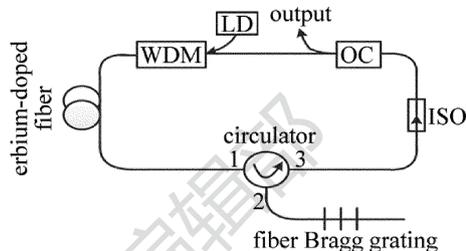


Fig. 7 Structure diagram of self-Q-switched erbium-doped fiber laser with ring cavity

实验中, 抽运功率为 16.2mW 时激光起振, 同时示波器上观察到自脉冲序列, 每两个自脉冲之间存在一个子脉冲, 并在阈值附近随着抽运功率的提高子脉冲幅度逐渐增加, 如图 8 所示。进一步提高抽运功率, 示波器上显示出正弦波动的脉冲。随着抽运功率的提高幅度逐渐变小, 重复频率略微增加, 脉冲宽度略微减小。当抽运功率增加到 110mW 时, 示波器显示连续激光输出, 如图 9 所示。图 10 表示环形腔脉宽、重复频率、输出功率随抽运功率的变化情况, 在抽运功率 16.2mW ~ 110mW 范围内, 获得了脉冲宽度 165μs 左右、重复频率约为 3kHz 的自调 Q 脉冲。图 11 显示了不同抽运功率下, 脉冲重复频率、峰值功率稳定度情况。

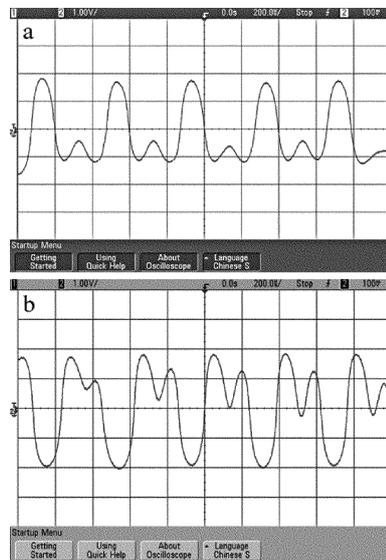


Fig. 8 Graph of self-Q-switched pulse in ring cavity with pump power
a—16.2mW b—18mW

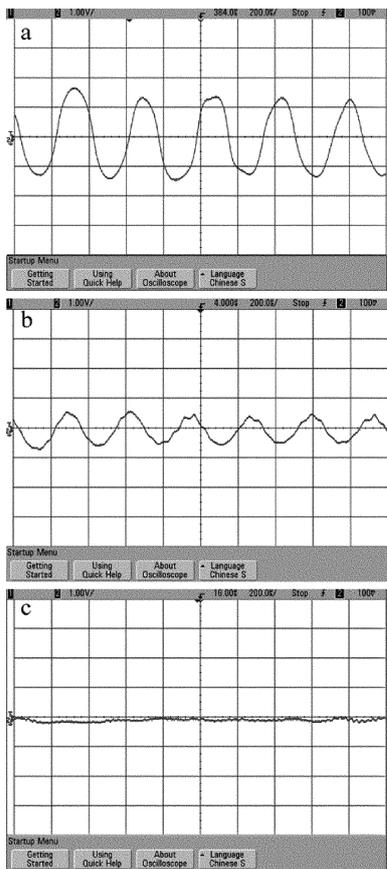


Fig. 9 Sinusoidal graph of ring cavity at different pump power (200μs/div)
a—20mW b—60mW c—110mW

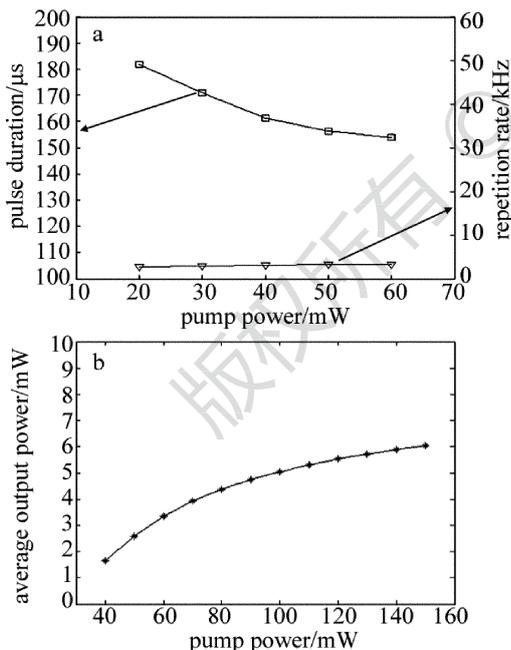


Fig. 10 Graph of repetition frequency, pulse width and output power change with pump power in ring cavity
a—change of repetition frequency and pulse width b—change of output power

综上所述,随着抽运功率的增加,环形腔结构掺铒光纤激光器经历了自调Q脉冲、连续激光输出两种运行状态。

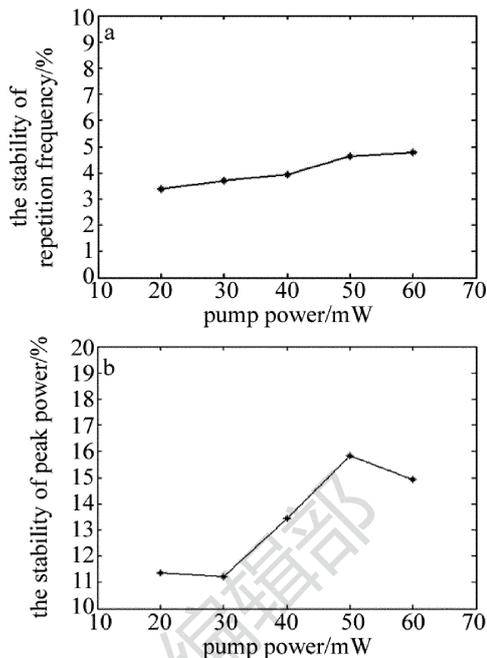


Fig. 11 The stability of repetition frequency and peak power with different pump power in ring cavity
a—repetition frequency b—peak power

3 实验现象分析

调Q技术,即在谐振腔低Q值时,进行能量的存储;高Q值时,将存储的能量在极短的时间内释放出来,形成巨脉冲。要有明显的调Q现象,便要求谐振腔处于低损耗状态时的Q值(Q₁)相对于高损耗状态时的Q值(Q₂)有较大的变化,即Q₁/Q₂较大,并且Q开关的开关时间要快。

对于一根掺杂光纤在抽运不充足的情况下,同时作为增益介质和可饱和吸收体,从而出现自调Q的现象,进行理论分析如下:对掺杂光纤进行端面抽运,抽运光在掺杂光纤中传输时存在传输损耗,同时由于稀土离子的受激吸收存在吸收损耗。传输损耗同吸收损耗相比,可以忽略。因此,抽运光在光纤中的功率分布可以用下面的公式表示:

$$P_p(z) = P_p(0) \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

式中,α为抽运光在光纤中的损耗系数。可见,抽运光在掺杂光纤中呈指数衰减。这样,只有在掺杂光纤的前部分,满足g(z) > δ(g(z)为对激光功率的增益系数,δ为对激光功率的损耗系数)时,可以作为增益介质;而后部分因为抽运不足,导致g(z) < δ,不再作为增益介质,反而对前面增益介质中发射的激光进行吸收,且具有可饱和吸收特性。因此,抽运不充足时,就将一根掺杂光纤分为“增益介质区”和“可饱和吸收区”,出现自调Q现象。“增益介质区”长度L随着抽运功率P_p的增加而增加,而“可饱和吸收区”的长度

L_s 随着抽运功率 P_p 的增加而减小。

可饱和吸收体的初始透过率 T_0 、初始吸收率 γ_0 、吸收率 γ 可以表示为:

$$T_0 = \exp(-\sigma_s n_{s,0} L_s) \quad (2)$$

$$\gamma_0 = 1 - T_0 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \frac{I}{I_0}} \quad (4)$$

式中, σ_s 为“可饱和吸收区”对信号光的受激吸收截面, $n_{s,0}$ 为“可饱和吸收区”的稀土离子掺杂浓度, L_s 为“可饱和吸收区”的长度, I_0 为饱和光强。

结合(1)式~(4)式,当腔内光强可以达到饱和光强时,随着抽运功率 P_p 的增加,“增益介质区”的长度 L 变长,“可饱和吸收区”的长度 L_s 变短。“增益介质区”的长度 L 变长,导致腔内初始光强变大;“可饱和吸收区”的长度 L_s 变短,导致初始透过率 T_0 变大,初始吸收率 γ_0 变小。腔内初始光强的增大和初始吸收率 γ_0 的减小,均能使吸收率 γ 的整个动态变化范围变小, Q_1/Q_2 变小且 $Q_1/Q_2 \rightarrow 1$;同时,“可饱和吸收区”的开关速度加快。

在阈值附近进行抽运时,虽然吸收率 γ 有足够大的动态范围,但由于抽运功率太小,对于损耗大的谐振腔(“坏腔”),便需要累积足够长的时间才能使“可饱和吸收区”饱和,开关速度过慢,由于上能级粒子寿命的制约,在未达到饱和光强之前,便将存储的能量释放出去,而且由于此时腔内的损耗较大,存储的能量释放时的腔内光强与初始光强相比也不会太大,较小的光强变化,导致 Q_1/Q_2 较小,因而调 Q 现象微弱,以致于观察不出,若用示波器观察,观察到的是连续波运行状态;但是在起振阈值附近,对于损耗小的谐振腔(“好腔”),较快的腔内光子数增长速率,可以在较短的时间内漂白“可饱和吸收区”,使得上能级离子寿命不再成为限制因素,吸收率 γ 大的动态范围使得 Q_1/Q_2 较大,便可呈现明显的调 Q 现象。随着抽运功率的增加,“可饱和吸收区”的开关速度加快,无论是“坏腔”还是“好腔”,上能级粒子寿命不再是制约因素,可以有效地进行能量存储,且 Q_1/Q_2 较大,呈现明显的调 Q 现象。而随着抽运功率的进一步增加,尽管依然有“可饱和吸收区”的存在,但是初始光强很大,使得对应于初始光强的吸收率 $\gamma \rightarrow 0$,致使 $Q_1/Q_2 \rightarrow 1$, Q 值变化不大,调 Q 作用微弱,人眼很难辨别,若用示波器观察,观察到的是连续波运行状态,而要达到这种状态,“坏腔”相对于“好腔”需要更高的抽运功率。抽运功率再增加,使得没有“可饱和吸收区”,谐振腔 Q 不变,为连续波运行状态。

综上所述,当抽运功率达到起振阈值后,随着抽运功率的继续增加,用示波器观察输出激光,对于“好腔”,输出激光依次经历了自调 Q、连续波运行状态;对于“坏腔”,输出激光依次经历了连续波、自调 Q、连续波运行状态,只是第 2 次出现连续波运行状态所需的抽运功率比“好腔”大。

实验中,无论是线形腔还是环形腔,在较长的掺杂光纤且抽运功率不足条件下,都能观察到输出脉冲为微秒量级、重复频率为千赫兹量级的调 Q 脉冲,这种现象可以归结为可饱和吸收体的自调 Q 现象。在进行自调 Q 实验的过程中,随着抽运功率的增加,其脉冲重复频率变大,脉宽变小,幅值变小。线形腔腔损耗较大,依次经历了连续波和自调 Q 两个运行状态,由于抽运源的输出功率和耦合条件,实验中未能进一步增加抽运功率,因而线形腔中没有观察到第 2 次连续波运行状态;环形腔腔损耗较小,依次经历了自调 Q、连续波两个运行状态。实验所得结果同理论分析一致。

此外,线形腔和环形腔实验中,在刚出现自调 Q 现象时,自调 Q 脉冲底座明显,而随着抽运功率的提高,自调 Q 脉冲底座不明显,呈现正弦自脉冲形态。这主要是因为刚出现自调 Q 现象时,抽运功率较弱,作为可饱和吸收体的光纤段较长,需要较长的时间使其达到饱和吸收,这段时间为上能级粒子数不断积累的过程,呈现在波形上为较长的脉冲底座。而随着抽运功率的提高,作为可饱和吸收体的光纤段逐渐变短,使其达到饱和吸收的时间也越来越小,即上能力粒子数积累的时间较短,因此脉冲底座较小,逐渐呈现正弦脉冲形态。

线形腔与环形腔相比,有较大的自调 Q 范围。是因为其谐振腔损耗较大,输出端只有 4% 的菲涅耳反射(相对于环形腔 50% 的输出),腔内光子集聚数增长的速率减缓,使腔内饱和吸收体出现“饱和”所需的时间相应延长,因此第 2 次产生连续光输出需要的抽运功率更大,相应的自调 Q 范围也较大。此外,环形腔中自调 Q 脉冲的宽度几乎不变也与腔内光子寿命有关,由于腔内激光光强的迅速增大,自调 Q 光纤的吸收系数较小,储能较小,因此产生的自脉冲的宽度较宽。

4 小 结

实验研究结果证明,无论是线形腔结构还是环形腔结构,在较低的抽运功率下,掺钕光纤激光器都可以出现自调 Q 脉冲,并且可以通过调节抽运功率的大小控制自脉冲;自脉冲不一定在“坏腔”(如线形腔)的激

光器中才能得到,在光子寿命较长的“好腔”中(如环形腔)也能获得自脉冲;“坏腔”的自调 Q 范围比“好腔”大。综上所述,影响掺铒光纤激光器动态特性的主要因素有可饱和吸收效应和腔内光子寿命。可饱和吸收效应影响激光器的输出形态;腔内光子寿命决定该输出形态的动态范围。

参 考 文 献

- [1] ALCOCK I P, TROPPER A C, FERGUSON A I, *et al.* Q -switched operation of a neodymium-doped monomode fiber laser[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(2): 84-85.
- [2] SHANG L J, YANG X Q, MA R D. Review of actively Q -switched all-fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 170-173 (in Chinese).
- [3] ZHANG L, WANG Z 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).
- [4] YAO B L, GONG H R. Experimental study of Q modulation of Nd^{3+} -doped single mode fiber laser[J]. *Laser Technology*, 1995, 19(1): 46-48 (in Chinese).
- [5] WU Q, FAN Z W, YU J, *et al.* Research progress of nanosecond regime pulsed fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060004 (in Chinese).
- [6] ZHANG L C, DU G G, ZHAO J Q, *et al.* Adjustable pulse width thulium-doped Q -switched double-clad fiber laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 363-367 (in Chinese).
- [7] CHEN S Q, CHEN Y, WU M, *et al.* Stable Q -switched erbium-doped fiber laser based on topological insulator covered microfiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 987-990.
- [8] STANISLAV A K, YURI O B, ANA D G C, *et al.* Distributed model for actively Q -switched erbium-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 47(7): 928-934.
- [9] PHILIPPE R, DOMINIQUE P. Analysis and optimization of a Q -switched erbium doped fiber laser working with a short rise time modulator[J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(3): 235-240.
- [10] STANISLAV A K, YURI O B, ALEXANDER K Y, *et al.* Smooth pulse generation by a Q -switched erbium-doped fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(5): 480-483.
- [11] CRUZ VICENTE S G, MARTINEZ GAMEZ M A, KIRYANOV A V, *et al.* Diode-pumped self- Q -switched erbium-doped all-fiber laser [J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(4): 310-314.
- [12] PEI X, XIANG W H, TAN L, *et al.* Effect of Yb:Er codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 94-98 (in Chinese).
- [13] TSAI T Y, FANG Y C. A saturable absorber Q -switched all-fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1429-1434.
- [14] WU D D, LUO Z Q, GAI Z Q, *et al.* An all fiber self- Q -switched Er-Yb co-doped double-cladding fiber ring laser[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(3): 460-464 (in Chinese).
- [15] BIELAWSKI S, DEROZIER D, GLORIEUX P. Antiphase dynamics and polarization effects in the Nd-doped fiber laser[J]. *Physical Review*, 1992, A48(5): 2811-2822.
- [16] SANHEZ F, BOUDEC P I, FRANCOIS P L, *et al.* Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers[J]. *Physical Review*, 1993, A48(3): 2220-2229.