

文章编号: 0258-7025(2008)03-0338-05

受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器

邢磊 冯雪 张磊 刘小明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 基于瑞利散射和受激布里渊散射(RS-SBS)的被动调 Q 掺铒光纤(EDF)激光器的输出脉冲序列具有重复频率低、脉宽窄、功率高的特点,适合光时域反射(OTDR)系统对脉冲光源的基本要求,但是输出的脉冲序列不够稳定。提出在被动调 Q 激光腔中插入声光调制器(AOM)构成主被动混合调 Q 激光器。实验结果证明,这种混合调 Q 的方法既保持了声光调制器主动调 Q 激光器输出脉冲序列重复频率低而且稳定的特点,又发挥了瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 机制动态速度快、输出脉冲宽度窄的优势。在 120~200 mW 的抽运功率条件下,得到的脉冲序列重复频率从 30 Hz~90 kHz 连续可调,脉冲宽度最小可达 20 ns,峰值功率最高可达 200 W,脉冲重复频率稳定度优于 5%,脉冲幅度起伏不大于 10%。脉冲峰值功率和脉冲宽度受抽运功率的影响不大,但随着调制频率增加,脉冲峰值功率降低而脉冲宽度加宽。

关键词 激光器;光纤激光器;混合调 Q;受激布里渊散射;声光调 Q

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Stimulated Brillouin Scattering Hybrid Q-Switched Er-Doped Fiber Laser

Xing Lei Feng Xue Zhang Lei Liu Xiaoming

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Rayleigh scattering-stimulated Brillouin scattering (RS-SBS) passive Q switched Er-doped fiber (EDF) laser has the potential to achieve low repetition, short pulse duration and high peak power, which satisfy the requirement for the optical pulse source of optical time domain reflection (OTDR) system, but the repetition frequency is not stable enough for real application. So, a hybrid Q-switched Er-doped fiber laser by inserting an acousto-optic modulator (AOM) into the RS-SBS passive Q cavity was proposed and studied. For the pump level of 120~200 mW, the repetition frequency of the output pulse strain can be continuously adjusted from 30 Hz to 90 kHz. The peak power can be about 200 W and the pulse duration can be about 20 ns. The stability of the repetition frequency is better than 5% and the amplitude fluctuation is less than 10%. The peak power and pulse duration are almost independent on the pump level, but the peak power will reduce and the pulse duration will increase as the modulation frequency increases.

Key words lasers; fiber laser; hybrid Q-switching; stimulated Brillouin scattering; acousto-optic Q-switching

1 引言

光纤激光器由于效率高、阈值低、线宽窄等特点而受到广泛关注,同时由于体积小、重量轻、便于集成等优点,作为光纤信息系统的光源有着广阔的应用前景。自从有源光纤问世以来,人们对光纤激光器,特别是脉冲光纤激光器已经有了深入的研究。目前,采用锁模技术不难达到飞秒量级的超短脉冲,

其重复频率一般在数十兆赫兹以上^[1~3];而采用调 Q 技术,脉冲重复频率可以低至千赫兹的量级,但脉冲宽度一般为数十纳秒以至更宽。在某些应用场合,比如基于光脉冲的光时域反射(OTDR)检测系统,为了兼顾灵敏度、测量精度和最长监测距离,脉冲光源要求具备低重复频率、窄脉冲宽度和高功率的特点,这对一般的调 Q 或锁模技术是困难

收稿日期:2007-06-11;收到修改稿日期:2007-10-31

作者简介:邢磊(1980—),男,山东人,硕士研究生,主要从事掺铒光纤激光器的研究。

E-mail: xingl03@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:刘小明(1948—),女,广东人,教授,博士生导师,主要从事光纤器件及其应用方面的研究。

E-mail: xiaoming@tsinghua. edu. cn

的。1996 年, S. V. Chernikov 等^[4]提出一种利用瑞利散射和受激布里渊散射(RS-SBS)机制实现的被动调 Q 光纤激光器。由于受激布里渊散射效应具有快速的动态特性,可以在纳秒量级的时间里改变腔的 Q 值,因此可以得到窄脉冲。最初瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 光纤激光器研究采用铒镱共掺光纤或者双包层掺铒光纤^[4,5],抽运功率和输出脉冲的峰值功率都很大,这方面的研究现在继续进行^[6]。1999 年, Andrei A. Fotiadi 等^[7]通过实验证实,采用普通掺铒光纤(EDF),在 30~100 mW 的低抽运功率水平下也能实现瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q,得到宽度 10~20 ns,峰值功率 100~200 W,重复周期 300~500 μs 的脉冲序列。不足的是,与其他被动调 Q 激光器一样,瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 激光器的输出不够稳定,表现为脉冲峰值功率和重复周期都有较大的抖动。为了解决这一问题,文献[8]提出在基于掺铒光纤的瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 激光器中采取脉冲方式的抽运源,强迫所有脉冲具有相同的起始条件,确实收到了稳定的效果。实际上这就是一种主、被动混合的调 Q 机制,但是铒离子的上能级寿命长约 10 ms,脉冲抽运的办法不适用。

本文针对中低功率光时域反射系统的应用需求,提出在瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 掺铒光纤腔中插入声光调制器(AOM),构成主被动混合调 Q 机制,实验结果在 120~200 mW 的中低抽运功率条件下,得到了重复频率为 30 Hz~90 kHz 连续可调的稳定调 Q 脉冲输出。

2 瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 光纤激光器的基本原理

瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 掺铒光纤激光器的基本结构如图 1 所示,该激光器包含一只光纤光栅(FBG)、一段由激光二极管(LD)经过波

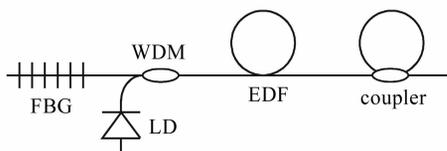


图 1 瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 激光器的基本原理示意图

Fig. 1 Scheme of the RS-SBS passive Q-switched fiber laser

分复用器(WDM)抽运的掺铒光纤和一个由光纤耦合器构成的光纤干涉环(coupler),干涉环右侧是一个斜切的光纤端面。由于腔的右端不存在光反馈元件,因此 Q 值很低,但是一旦抽运启动,来自掺铒光纤的部分放大自发辐射(ASE)光经耦合器进入干涉环,在环中产生瑞利散射光,反向的瑞利散射光便形成微弱的光反馈。我们曾经实验测量过,95:5 耦合器构成的 2 m 光纤干涉环(环中只有一个焊点,损耗约为 0.1 dB)的瑞利散射等效反射率约为 -27 dB;而通常情况下单段掺铒光纤的双程增益很容易达到 30~40 dB,因此微弱的瑞利散射也足以让谐振腔振荡起来。干涉环具有很强的频率选择性,只有同时满足光纤光栅反射波长、激光器谐振频率和干涉环谐振频率的光才能形成振荡。经过理论分析和计算得知,对于满足干涉环谐振频率的光,95:5 耦合器构成的 2 m 干涉环的受激布里渊散射阈值约为 2 mW,阈值功率水平下的受激布里渊散射等效反射率约为 28.1%,与 -27 dB 的瑞利散射反射率相比增大了约 22 dB^[9]。也就是说,腔内的瑞利散射振荡光很容易达到干涉环的受激布里渊散射阈值,一旦达到,反向受激布里渊散射便在极短(纳秒量级)时间内形成强烈的反馈,使得激光腔的 Q 值在极短时间内增长几个数量级。于是得到宽度为纳秒量级的巨脉冲,同时还保留了调 Q 激光器重复频率低的特点。

3 瑞利散射和受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器实验装置

瑞利散射和受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器实验装置如图 2 所示。与图 1 所示的基本原理图不同的是,首先,在掺铒光纤和干涉环之间插入了一个偏振控制器(PC),同时在干涉环里也插入了一个偏振控制器。这是因为受激布里渊散射效应对偏振状态非常敏感,实验证明,通过调节干涉环

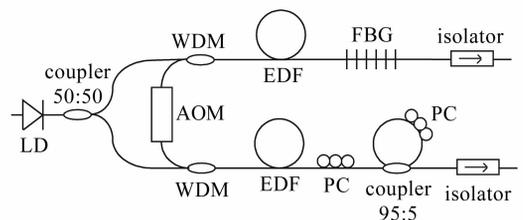


图 2 瑞利散射和受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the RS-SBS hybrid Q-switched fiber laser

和谐腔内光的偏振态,可以增强受激布里渊散射作用的效果,增强产生巨脉冲的稳定性。其次,为了防止光纤端面反射对被动调 Q 动态过程的影响,在光纤光栅和干涉环两侧输出端各增加一个光隔离器。为了引入主动调 Q 机制,把掺铒光纤分成两段,中间插入一个声光调制器(AOM),两段掺铒光纤由一只 980 nm 激光二级管经过一个 50:50 的分光器提供抽运功率。原理上,声光调制器可以插在腔中任意位置,但是,声光调制器本身有约 4 dB 的本底插入损耗,如果插在掺铒光纤和干涉环之间,会降低进入干涉环的功率,影响瑞利散射和受激布里渊散射的产生,即影响巨脉冲的形成过程;如果插在掺铒光纤和光纤光栅之间,那么巨脉冲形成的时候,声光调制器的双程损耗会使得从光纤光栅反射的光功率太弱,不足以耗尽掺铒光纤的上能级粒子,影响脉冲的果断结束,因此插在两段掺铒光纤中间是比较好的选择。实验中使用的各元器件参数如下:构成干涉环的耦合器耦合比为 95:5,环内光纤总长 2 m,只有一个焊点,损耗约 0.1 dB;靠近光纤光栅一端的掺铒光纤长 8 m,另一段掺铒光纤长 6 m;声光调制器的型号为 26027-2-1.55-FO-1ST;光纤光栅反射谱中心波长 1530.3 nm,反射谱谱宽 0.2 nm,超过两个受激布里渊散射频移量的宽度。

测量时采用带宽为 150 MHz 的探测器和带宽为 100 MHz 的示波器(TDS 220)观察波形,示波器上采集的波形数据通过串口输入计算机进行处理。通过 AQ6713 型光谱仪观测光谱。测量功率使用 OPM 230 型光功率计。

4 实验结果及分析

实验时,抽运功率从零开始逐渐增大。当抽运功率在 17~40 mW 范围时,出现稳定的脉冲序列,重复频率与调制频率吻合,脉冲宽度在微秒量级,脉冲峰值功率为百毫瓦量级,符合主动调 Q 激光器的输出特性。图 3 所示是抽运功率为 20 mW,调制频率为 4.77 kHz 时声光调制器的驱动电压波形和在干涉环输出端测量得到的光脉冲序列。其中单个脉冲的驱动电压波形和光脉冲波形如图 4 所示。图 5 所示是用光谱仪测量到的输出光谱,由于测量时光谱仪的输入端前面接插入了较大的损耗,我们将所有光谱图都以峰值为基准作了归一化处理。

增加抽运功率,当抽运功率约 40 mW 时,部分脉冲的幅度开始猛烈增长成为巨脉冲,但有些脉冲的幅度仍然很小,如图 6 所示。我们判断这时在主

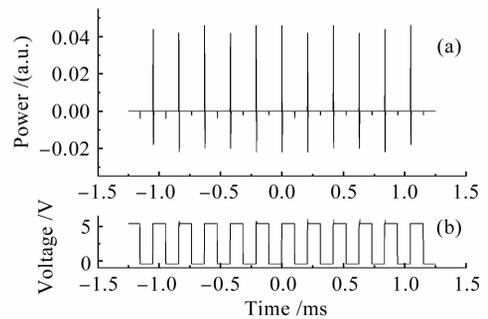


图 3 输出的光脉冲序列(a)和驱动电压波形(b)
Fig. 3 Output optical pulse train (a) and driving pulse (b)

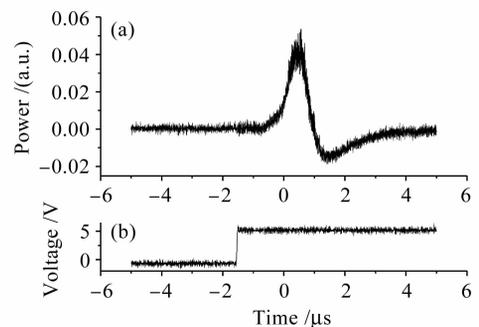


图 4 单个光脉冲波形(a)和驱动电压波形(b)
Fig. 4 Single optical pulse (a) and driving voltage (b)

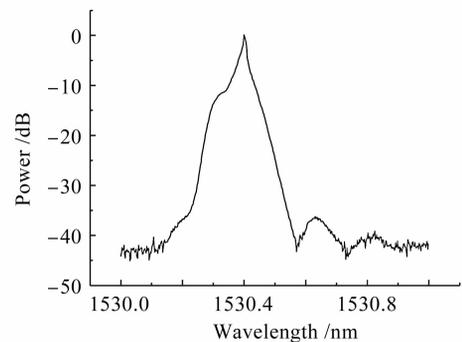


图 5 抽运功率 20 mW 时的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum under 20 mW pumping

动调制周期上受激布里渊散射被动调 Q 机制已经开始发挥作用,但由于腔内的功率水平只是临界达到受激布里渊散射阈值,还没有达到稳定产生受激布里渊散射调 Q 所需要的功率水平,因此不能稳定产生巨脉冲。

继续加大抽运功率,当抽运功率超过 120 mW 以后,脉冲序列又重新变得稳定,而且从光纤光栅一侧输出的脉冲功率明显比从干涉环一侧的输出要高。图 7 所示是抽运功率为 166 mW 时从光纤光栅一侧输出的光脉冲序列和驱动电压波形,经过示波器多次测量结果的统计显示,输出脉冲的幅度起伏约在 10% 以内。图 8 所示为输出光谱,光谱图上可

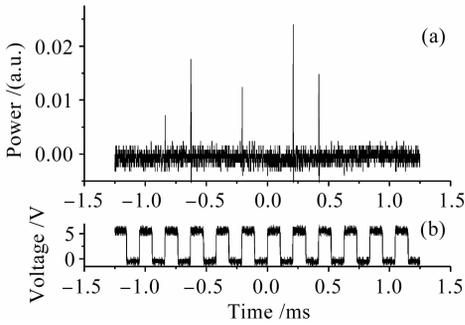


图 6 临界功率水平下的不稳定巨脉冲序列(a)和驱动电压波形(b)

Fig.6 Unstable pulse train (a) and driving voltage (b) under critical pumping level

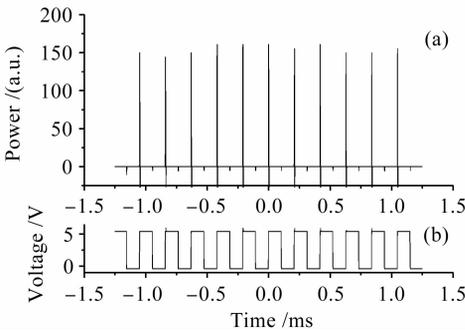


图 7 高抽运水平下的稳定巨脉冲序列(a)和驱动电压波形(b)

Fig.7 Stable huge optical pulse train (a) and driving voltage (b) under high pump level

以明显看到四个峰,峰与峰之间的间隔约0.08 nm,刚好是光纤在1550 nm附近的受激布里渊散射频移量,说明受激布里渊散射被动调 Q 机制的确发生了作用,这是脉冲峰值功率提高、脉冲宽度压缩的原因。对照图 5 所示的低功率脉冲光谱,位于1530.3 nm处的第一个小峰应该是原始振荡光(瑞利散射光或称 0 级受激布里渊散射光),尔后共产生了三次(三阶)受激布里渊散射移频,其中一阶、二阶分量的幅度比较大。当将声光调制器调制频率设定在30 Hz时,输出的巨脉冲波形如图 9 所示,脉冲宽度约为20 ns,峰值功率超过200 W。

将抽运功率固定在 200 mW,改变声光调制器的调制频率,发现在30 Hz~90 kHz的范围内激光器都能输出稳定的脉冲序列。当调制频率大于90 kHz时,脉冲序列开始不稳定,大于100 kHz时,大功率巨脉冲消失。这是因为,当声光调制器的驱动频率太快时,巨脉冲过后腔内还没有达到能量充分积累,声光调制器的下一个周期就已经启动,因此巨脉冲序列不能稳定。

当抽运功率分别为 135 mW, 166 mW 和

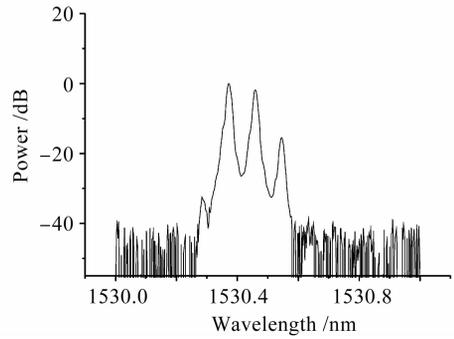


图 8 获得巨脉冲输出时的输出光谱

Fig.8 Optical spectrum of huge pulse train

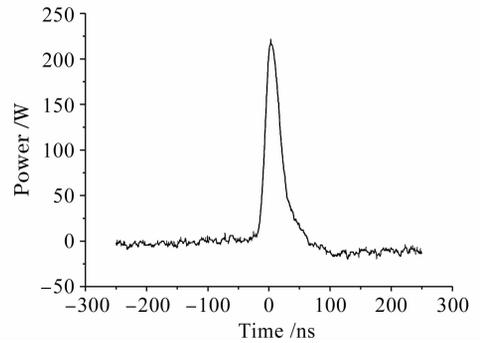


图 9 高抽运功率时的单个巨脉冲波形,脉冲宽度约 20 ns,脉冲峰值功率约 200 W

Fig.9 Single huge pulse with the pulse duration near 20 ns and peak power about 200 W

200 mW时,声光调制器的调制驱动频率在100 Hz~50 kHz的范围内都能得到稳定的巨脉冲序列。图 10,11 所示是三种抽运功率水平下(135 mW, 166 mW,200 mW)测量得到的脉冲峰值功率和脉冲宽度随调制频率的变化。可见,随着抽运功率增加,脉冲宽度有所减小,脉冲峰值功率略有增加,但变化不明显。但是,脉冲宽度随调制频率的增大明显增加,峰值功率随调制频率的增大明显降低。这是因为,虽然脉冲的重复频率完全受声光调制器的控制,前面已经提到,在声光调制器关闭的时段里,腔内仍然在积累能量准备下一个脉冲的到来,因此调制频率的变化即能量积累时间的变化会影响输出脉冲的形成过程,也就影响了输出脉冲的最终状态。

采用声光调制器调制驱动脉冲的上升沿作为示波器的触发信号源,测量发现大功率巨脉冲出现的时间是在一个范围内抖动的:当调制频率为100 Hz时,抖动范围约0.6~0.7 μs,当调制频率高于1 kHz以后,抖动范围约1 μs,但是抖动范围不随抽运功率变化,如图 12 所示。这种脉冲出现时间即重复周期抖动,是被动调 Q 激光器的特点。虽然在实验装置中引入了主动调 Q 的机制,但是,每当声光调制

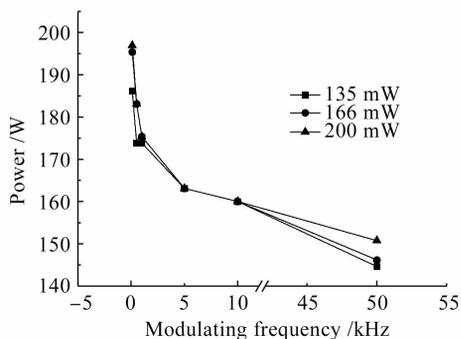


图 10 不同抽运功率水平下脉冲峰值功率随调制频率的变化

Fig. 10 Peak powers versus modulation frequency under different pump powers

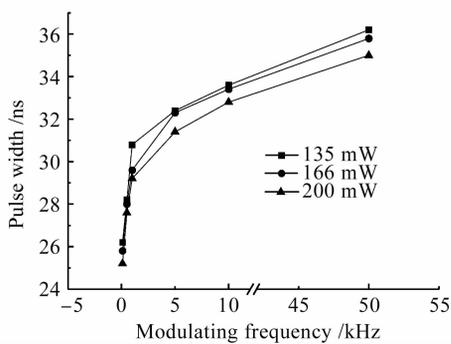


图 11 不同抽运功率水平下脉冲宽度随调制频率的变化

Fig. 11 Pulse width versus modulation frequency under different pump powers

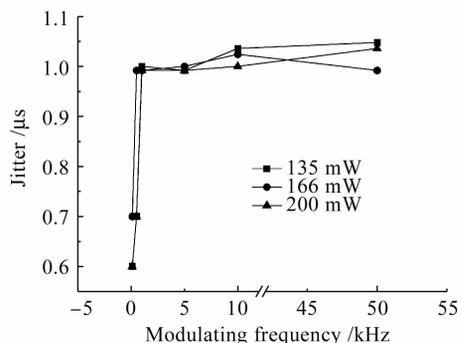


图 12 不同抽运功率水平下脉冲发生时间抖动范围随调制频率的变化

Fig. 12 Jitter versus modulation frequency under different pump powers

器打开之后,还有待腔内能量积累,直到瑞利散射振荡光足够达到受激布里渊散射阈值后巨脉冲才能发生。实际上,我们曾经测量得知,抽运功率水平较低时图 3,4,5 所示的低功率脉冲序列也存在重复周期抖动的问题。而且,偏振态的随机变化和振荡模式竞争等因素都会造成能量积累和振荡光功率上升过程的随机性,因此抖动不可避免。尽管如此,引入了

声光调制器之后,即使在最差的情况(调制频率为 50 kHz)下,脉冲序列的重复频率稳定度也能达到 5%,远远优于单纯瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 激光器的稳定度 40%^[10]。

5 结 论

提出在瑞利散射和受激布里渊散射被动调 Q 掺铒光纤激光器腔中插入声光调制器的办法构成主被动混合调 Q 激光器,既保持了主动调 Q 重复频率稳定的特点,又发挥了受激布里渊散射被动调 Q 动态特性快的优势。实现了重复频率从 30 Hz ~ 90 kHz 连续可调、脉冲宽度最窄 20 ns,脉冲峰值功率最高 200 W 的巨脉冲序列输出。脉冲重复频率稳定度达到 5%,脉冲幅度起伏不大于 10%。抽运功率改变对脉冲峰值功率和脉冲宽度的影响不大,但调制频率升高将使脉冲峰值功率降低、脉冲宽度加宽。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhaoying, Yu Zhenhong, Gao Peiliang *et al.*. Figure-eight shape actively and passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1341~1345 王肇颖,余震虹,高培良等. 8 字形主被动锁模掺 Er³⁺ 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11):1341~1345
- 2 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and modelocking 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 锁模掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1021~1024
- 3 Xue Feng, Lei Zhang, Xiaoming Liu. Demonstration of fiber pulsed light source at 1.6 μm with adjustable pulse duration [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):99~101
- 4 S. V. Chernikov, J. R. Taylor, D. V. Gapontsev *et al.*. Q-switching of Er³⁺/Yb³⁺-doped fiber laser using backscattering from a fiber ring interferometer [C]. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO-Technical Digest*, 1996. 529~530
- 5 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
- 6 Shuling Hu, Jing Yu, Chunqing Gao *et al.*. Dual-wavelength stable nanosecond pulses generation from cladding-pumped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11):655~657
- 7 Andrei A. Fotiadi, Aris Ikiades, Nikos Vainos *et al.*. Q-switching dynamics in SBS/Er fiber laser with low-power pump [C]. *SPIE*, 1999, **3847**:2~9
- 8 Yaxian Fan, Fuyun Lu, Shuling Hu *et al.*. 105-kW peak-power double-clad fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5):652~654
- 9 Li Shouguo, Yu Chongxiu. Fiber's Rayleigh back-reflection and its effects on fiber optic communication systems [J]. *Communications Technology*, 2003, (10):51~52 李守国,余重秀. 光纤的瑞利反射及其对光纤通信系统的影响[J]. *通信技术*, 2003, (10):51~52
- 10 Andrei A. Fotiadi, Olivier Deparis, Roman Kiyann *et al.*. Dynamics of passive Q-switching in SBS/Er fiber laser at low pump power [C]. *SPIE*, 2001, **4354**:125~134