

全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究

刘 伟¹ 陈 滔¹ 戴建宁² 姜培培^{1,3} 吴 波¹ 沈永行¹

¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027
² 北京特种机电技术研究所, 北京 100012
³ 温州医学院信息与工程学院, 浙江 温州 325035

摘要 报道了一种可以被动式产生高重复率亚纳秒脉冲的全光纤化的新型 Yb 光纤激光器。通过在 15 m 长度的 Yb 增益光纤和一对光纤光栅对组成的线性谐振腔内直接熔接一段特殊掺杂的 Bi/Cr 共掺石英光纤, 在 975 nm 的半导体激光器连续抽运下, 实现了高重复频率的高峰值功率亚纳秒短脉冲激光输出。实验结果表明, 输出激光的重复频率与吸收的抽运光功率呈线性关系, 脉冲激光峰值功率超过 30 kW, 在吸收抽运功率为 8.2 W 时, 光纤激光器获得了重复频率最高为 50.2 kHz、平均功率为 2 W 的亚纳秒脉冲激光输出。分析实验现象可以发现, 在亚纳秒脉冲激光的产生过程中受布里渊散射起着关键的作用。此外, 观测光谱发现在 Bi/Cr 共掺石英光纤端有非常平坦的红外超连续谱输出, 光谱覆盖范围超过 1000 nm, 光谱平坦度小于 5 dB。

关键词 激光器; 亚纳秒; 受布里渊散射; 全光纤化; 超连续谱

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1214003

All-Fiberized Yb Fiber Laser with Passively Generated Sub-Nanosecond Pulse Output

Liu Wei¹ Chen Tao¹ Dai Jianning² Jiang Peipei^{1,3} Wu Bo¹ Shen Yonghang¹

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² Beijing Research Institute of Special Mechanical and Electrical Technology, Beijing 100012, China

³ Department of Information and Engineering, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

Abstract A novel all-fiberized Yb-doped fiber laser configuration for passively sub-nanosecond pulse generation is reported. By splicing a piece of Bi/Cr codoped silica fiber to a section of Yb-doped double clad fiber of 15 m in a fiber Bragg grating constructed fiber laser cavity, stable sub-nanosecond pulse train is obtained with a maximal repetition rate of 50.2 kHz and an average output power of 2 W. The calculated peak power exceeds 30 kW. The linear dependence of the pulse repetition rate on the absorbed pump power is confirmed. It is also found that stimulated Brillouin scattering plays a crucial role in the pulse generation. Broadband infrared supercontinuum emission is detected via the Bi/Cr fiber end, which spans over 1000 nm with spectral intensity variation lower than 5 dB.

Key words lasers; sub-nanosecond; stimulated Brillouin scattering; all-fiberized; supercontinuum

OCIS codes 140.3538; 290.5900; 140.3510; 320.6629

1 引 言

近年来, 输出高重复率(大于 10 kW)、光束质量接近衍射极限的光纤激光源由于能够广泛应用于微加工、测距和遥感等领域, 引起了人们越来越多的

关注。获得脉冲激光输出的传统方法主要有电光、声光调 Q 等手段, 但是在光纤激光器中引入这些技术存在各种问题, 例如: 引入电光、声光调制器破坏了全光纤结构, 导致额外插入损耗; 光纤激光器谐振

收稿日期: 2011-06-08; 收到修改稿日期: 2011-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61078015)和温州市科技计划项目(H20100024)资助课题。

作者简介: 刘 伟(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: lw001@zju.edu.cn

导师简介: 沈永行(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤激光器和中红外激光器等方面的研究。

E-mail: physyh@zju.edu.cn(通信联系人)

腔一般很长,获得的脉冲宽度一般是几百纳秒甚至几微秒,所以峰值功率很难满足要求。相比较而言,主振荡功率放大(MOPA)结构的光纤激光器有很大的优势,采用锁模激光器或是直接电调制的半导体激光器作为激光种子源,能够实现皮秒级脉冲输出,而且脉冲形状、重复频率等能够灵活地调节^[1~3]。但是,由于这些激光种子源功率一般太小,要获得千瓦级的峰值功率一般需要 40 dB 以上的增益,所以需要多级放大,这样导致系统过于复杂,成本过高。而且,在最后一级需要用大模场直径的光纤来缓解放大自发辐射和非线性效应,导致最终很难实现单模激光输出。

由于以上原因,基于受激布里渊散射(SBS)的快速调 Q 机制在近年来成为一个研究热点。所谓调 Q 就是使谐振腔内的损耗发生突变,SBS 被动快速调 Q,与传统的主动调 Q、被动调 Q 有所不同,其损耗的调节是通过 SBS 来实现,当激光谐振腔内振荡光一旦达到 SBS 阈值,后向 SBS 光便在极短时间内形成强烈的反馈,使得激光谐振腔的 Q 值在极短时间内(纳秒甚至亚纳秒)增长几个数量级^[4]。相对于传统的调 Q,这是一个快的 Q 开关过程,产生的脉冲宽度主要依赖于 SBS 的动态特征,因此能够获得更窄的脉冲,脉冲峰值功率提高一个数量级以上。1997 年,Chernikov 等^[5]在 Yb 双包层光纤后熔接一段长度为 2~5 m 的普通单模光纤,实验得到了 2 ns 脉宽的脉冲序列输出,并用瑞利散射和受激布里渊被动调 Q 机制解释了实验现象。随后,这种快速被动调 Q 机制在光纤激光器中得到更为深入的研究。然而,由于 SBS 本身固有的随机性,这种激光器一般有输出脉冲不稳定、脉冲序列时间抖动大、随机的巨脉冲的峰值功率超过光纤损伤阈值等缺点。为了克服这些缺点,已有文献报道了多种解决方案,采用脉冲抽运是一种常见的解决方案,通过使所有脉冲具有相同的起始条件,可以有效地减小时间抖动。文献^[6,7]分别报道了通过外部注入一定重复频率和占空比调制的方波种子,可以将时间抖动从 20% 降至 1%。另一种常见方法为 SBS 被动调 Q 与普通的调 Q 方式相结合,这种方法应用于多种调 Q 激光器系统中,包括主动调 Q、被动调 Q 系统,有效地改善了激光器的性能,在保证激光脉冲输出较为稳定的同时,可以获得更窄的脉宽。例如,邢磊等^[8]提出在 SBS 被动调 Q 激光腔中插入声光调制器构成主被动混合调 Q 激光器,实验表明,这种方法既保持了主动调 Q 激光器输出脉冲序列重复

频率稳定的特点,又发挥了 SBS 被动调 Q 机制动态速度快、输出脉宽窄的优势。最近有文献报道,通过结合 SBS 压缩机制和饱和吸收体被动调 Q 机制(半导体饱和吸收体^[9],Cr⁴⁺:YAG 晶体^[10,11])能够产生几百皮秒的脉冲。尽管这些方式都能够获得较为稳定的输出,同时得到较窄的脉冲,但都有明显的局限性:因为引入了额外的非光纤化器件,使得系统更为复杂,不易维护,同时成本也大幅提高,大大降低了其实用性和经济性。

针对上述问题,本文提出一种可以被动式产生亚纳秒脉冲激光的新型全光纤 Yb 激光器的制作方法。通过在 Yb 光纤和光纤光栅组成的谐振腔中直接熔接一小段 Bi/Cr 共掺的石英光纤,实现了高功率的亚纳秒脉冲输出。实验表明,特殊掺杂的 Bi/Cr 共掺的石英光纤能起到类似于饱和吸收体的作用,同时又能提供瑞利散射-SBS 反馈作用,在实验上展示出一种混合调 Q 机制。实验测得输出激光的峰值功率超过 30 kW,激光脉冲的重复频率和吸收的抽运功率呈线性的关系,表明通过加大抽运功率可以进一步提高激光输出功率。此外,通过优化 Bi/Cr 共掺的石英光纤的长度,可以实现光谱覆盖范围超过 1000 nm 的超连续谱输出。

2 实验装置

光纤激光器实验装置如图 1 所示。抽运源为带尾纤(105/125 μm)输出的激光二极管(LD),其输出波长为 975 nm,单管最大输出功率为 10 W。两个 LD 的抽运光分别通过两个(2+1) \times 1 的合束器耦合进入激光谐振腔中,进行双向抽运。实验表明,与单向抽运方式相比,采用双向抽运的方式可以使得沿着整个 Yb 光纤长度的反转粒子数分布更为均匀,能够有效地降低输出脉冲之间的振幅波动和时间抖动。此外,由于 SBS 阈值与光谱带宽、光纤长度和光纤模场直径等相关,为了降低 SBS 阈值,应尽可能选用窄带宽的光栅,同时适当增加光纤长度。实验系统中,光纤光栅的反射率为 50%,其光谱半峰全宽(FWHM)为 0.1 nm。在谐振腔内有两段光纤。一段是长度为 15 m 的 Yb 双包层增益光纤,芯径为 7 μm ,包层直径为 130 μm ,光纤芯层与内包层的数值孔径(NA)分别为 0.15 和 0.46,该光纤在 975 nm 的包层吸收系数为 0.8 dB/m。另一段是长度为 1 m 的自制 Bi/Cr 共掺的单包层光纤^[12],纤芯直径为 5 μm ,包层直径为 125 μm ,其中 Bi 的掺杂原子数分数约 0.1%,Cr 的掺杂原子数分数约 0.05%,由

于这种特殊的掺杂,使得光纤不仅能饱和吸收的作用,同时也易于产生较高的非线性效应。在图 1 所示的 combiner 1 的信号端,也就是 output 1 端,为了防止光纤端面的菲涅耳反射产生寄生振荡,光纤端面切成 8° 斜角。

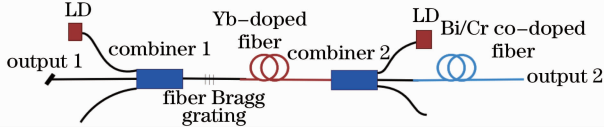


图 1 产生亚纳秒脉冲激光的实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber laser generating sub-nanosecond pulses

3 实验结果及讨论

本实验获得的脉冲宽度短于 1 ns , 激光峰值功率超过 30 kW , 在吸收的抽运功率为 8.2 W 时, 光纤激光器获得了重复频率最高为 50.2 kHz 、脉冲序列时间抖动低于 5% 、平均功率为 2 W 的亚纳秒脉冲激光输出。

与 SBS 相位共轭固体激光器类似, 在快速被动调 Q 光纤激光器中, 通常使用较长的普通单模光纤 (SMF) 来起 SBS 池的作用。对于本实验中使用的 Bi/Cr 特殊掺杂的光纤, 阈值抽运功率估算为

$$P_{\text{cr}} \approx \frac{21A_{\text{eff}}}{g_B(\Omega_B)L_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中 Ω_B 为斯托克斯波形成峰值时的声波频率; $g_B(\Omega_B)$ 为布里渊峰值增益; A_{eff} 为光纤有效模场面积; L_{eff} 为光纤有效长度。对于长度为 1 m 的普通单模光纤, 其受激布里渊抽运阈值估值为 20 W 左右。实验中, 从 50% 反射率光栅端输出约 100 mW 激光就能观察到亚纳秒脉冲输出, 虽然由于光纤掺杂, 其受激布里渊阈值有所降低, 但不可能降至百毫瓦量级, 所以在 SBS 启动之前应当有一个脉冲形成过程, 使激光峰值功率达到 SBS 阈值。实验中, 通过将特殊掺杂的 Bi/Cr 光纤截断至 15 cm 左右, 大大提高受激布里渊的阈值(排除 SBS 作用), 调节抽运功率, 观察到典型的饱和吸收体被动调 Q 产生的脉冲宽度 500 ns 左右的脉冲, 说明特殊掺杂的光纤有饱和吸收的作用。因此, 由于引入特殊掺杂的光纤, 本实验中激光器的工作机理为普通被动调 Q 和 SBS 快速被动调 Q 混合作用。

通过以上分析, 实验中窄脉冲的形成过程可以描述如下: 首先, 激光器工作在常规的被动调 Q 的状态, 特殊掺杂的 Bi/Cr 共掺石英光纤起到饱和吸

收体的作用, 光纤光栅和光纤 4% 菲涅耳反射端面构成起始腔, 一旦产生被动调 Q 脉冲, 脉冲峰值功率超过 SBS 阈值, 激光器运转随即进入第二个阶段, 称为受激布里渊快速调 Q 状态, 此时光纤光栅和反向传播的斯托克斯光形成反馈, 由于 SBS 能够进行快速调 Q, 使得输出激光的脉冲宽度远远小于激光在腔内往返一周的时间。本实验中激光器继承了两种调 Q 机制各自的优点。下面分别从输出激光的脉冲序列、脉冲形状以及激光光谱三方面来具体讨论激光器的工作特性。

3.1 输出脉冲序列特性

实验时, 逐渐增大抽运功率, 当吸收的抽运功率在 2.5 W 左右时, 可以观察到巨脉冲的输出, 但是脉冲序列的时间抖动非常大, 有很多缺级现象。脉冲强度起伏也很大, 在 output 1 端的输出功率非常不稳定。这是因为当抽运功率较低时, 作为增益介质的 Yb 光纤中反转粒子数较低, 由此导致由于饱和吸收产生的自调 Q 脉冲非常不稳定。此时, 部分脉冲的峰值功率超过 SBS 的阈值, 因此可以触发亚纳秒脉冲的形成, 另外部分脉冲峰值低于 SBS 阈值, 不能产生巨脉冲。而这些巨脉冲的出现与否呈现随机性, 这会使得光纤内的反转粒子数分布出现很大的随机性, 并进而导致输出激光功率的无序变化和 不稳定。随着抽运功率的不断 增加, 自饱和吸收效应导致的调 Q 脉冲趋于稳定, 所产生的脉冲峰值功率一般均超过 SBS 的阈值, 使得每一个脉冲均能形成 SBS 压缩后的亚纳秒级巨脉冲。这时, 输出的激光趋于稳定, 脉冲序列的重复频率也随着抽运功率的提高而增加。由于受激布里渊快速调 Q 产生的巨脉冲都是在普通调 Q 脉冲的基础上形成的, 普通被动调 Q 起到一个“钳位”的作用, 因此, 脉冲序列的时间抖动得到非常大的改善。当最大吸收为 8.2 W 抽运光时, 有 2 W 的 1064 nm 处的激光功率输出, 此时重复频率为 50.2 kHz , 时间抖动小于 5% [均方根值(RMS)]。图 2 为重复频率与吸收的抽运功率之间的线性关系, 从图中可以推断, 继续加大抽运功率将能获得更高的重复频率。

图 3 为激光的脉冲序列(测量仪器为 Thorlabs 公司 1.6 GHz 光电探测器和 Tektronix 公司 12.5 G 示波器), 脉冲的重复频率为 50.2 kHz 。从脉冲序列图可以看出, 脉冲间间隔较稳定, 偶尔会有少数脉冲的振幅出现较大波动。由于 SBS 有一定的随机性, 对温度、偏振态等较为敏感, 因此脉冲序列不可避免地有一定的时间抖动。

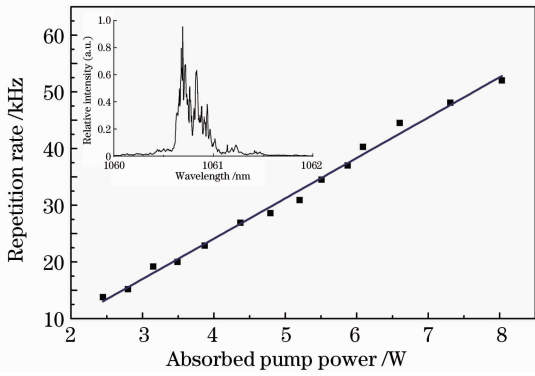


图 2 输出激光的脉冲重复频率与吸收的抽运功率的关系图, 插图在所输出激光的光谱图

Fig. 2 Relation between output pulse laser repetition rate and absorbed pump power. Inset is the optical spectrum of output laser

3.2 脉冲形状特性

实验中逐渐增大抽运功率, 脉冲宽度没有明显的变化, 只是各个脉冲形状略有不同。图 4 为两种典型的脉冲细节图。从图 4(a) 可以看出, 测得的脉

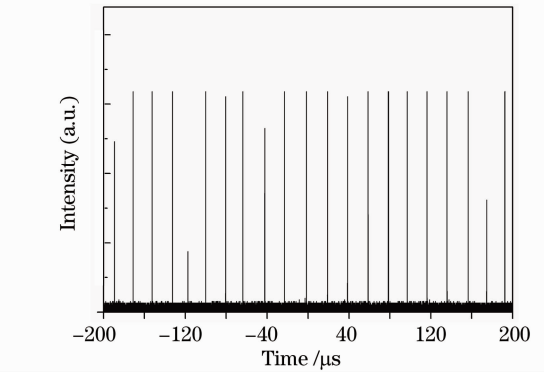
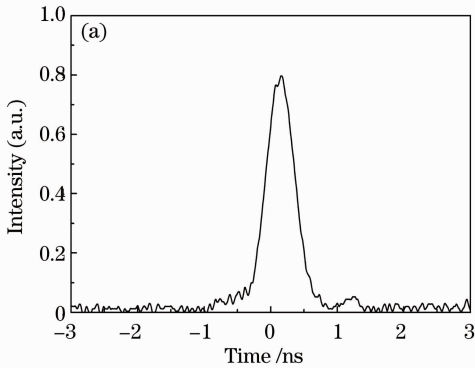


图 3 output 1 端输出激光的脉冲序列图
Fig. 3 Pulse train of the laser from port output 1

冲宽度为 1 ns。如果考虑探测器的测量脉宽极限 (1 ns), 实际的脉冲宽度应当小于 1 ns。实验中可以看到, 很多大的尖峰旁常伴随有一些小脉冲, 如图 4(b) 所示。这时, 有部分能量从尖峰转移到旁边的小脉冲中, 通过估算, 单个脉冲至少有 75% 的能量在主峰内, 因此保守估计激光的峰值功率应当超过 30 kW。

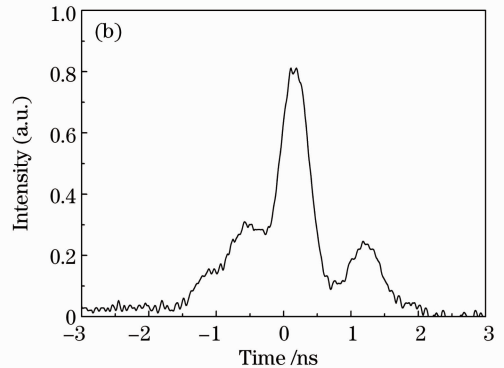


图 4 典型的输出脉冲细节图。(a) 脉冲只有一个主峰; (b) 脉冲有多个伴随的小脉冲

Fig. 4 Typical pulse shapes from port output 1. (a) Without satellite pulse; (b) with satellite pulses

3.3 激光光谱特性

首先分别测量两个输出端的光谱, 使用的光谱仪为 AQ6317C (测量范围为 600 ~ 1750 nm) 和 AQ6375 (测量范围为 1200 ~ 2400 nm)。从光纤布拉格光栅 (FBG) (50% 反射率) 端输出的激光光谱如图 2 中的插图所示。光谱图中可以看到多级的尖峰, 尖峰间隔为 0.06 nm, 正好与石英光纤中的布里渊频移相对应。实验过程中, 虽然各级 SBS 峰间隔分明, 但是其相对强度一直在变化, 这也是导致输出脉冲时间抖动的原因之一。在 output 2 输出端, 有较弱的光输出。由于 Bi/Cr 共掺光纤有很大的吸收系数, 将其长度缩短至 60 cm, 有 30 mW 左右激光输出, 通过测量其光谱发现: 在 1061 nm 激光的长

波方向, 光谱展宽了 1000 nm 以上, 一直延伸至波长大于 2 μm 处。图 5 给出了 output 2 端输出的超连续谱的光谱图。由于单个光谱仪的测量范围有限, 使用了上述两台不同光谱范围的光谱仪来进行测量。从图中可以看到, 除了在 1061 nm 处有一个尖峰外, 整个光谱非常平坦。Bi/Cr 特殊掺杂光纤的零色散波长在 1300 nm 左右, 与通常的光子晶体光纤产生超连续谱有所不同 (一般通过特殊设计将光子晶体光纤零色散波长移至抽运波长附近)。对于正常色散区抽运产生超连续谱的解释, 一般认为, 通过多级的受激拉曼作用将激光频谱扩展至 Bi/Cr 光纤的零色散点附近, 然后通过自相位调制 (SPM)、调制不稳定 (MI) 和四波混频 (FWM) 等非

线性效应综合作用,从而形成超连续谱。最近有报道指出,将快速被动调 Q 产生的巨脉冲通过普通单模光纤能观察到类似的超连续谱产生^[7]。本文报道的受激布里渊快速调 Q 产生的巨脉冲通过小芯径

光纤能产生足够的频谱展宽,为低成本超连续谱光源的开发提供了一个可行的方案。但超连续谱形成的具体机制以及如何提高超连续谱功率还有待进一步研究。

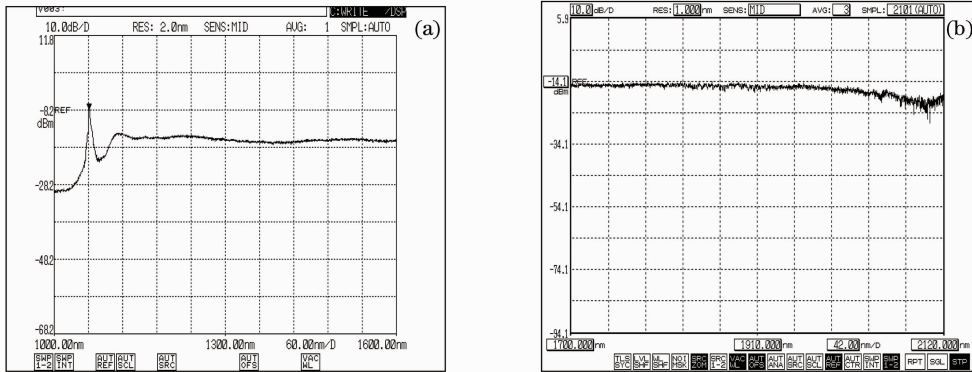


图 5 output 2 端输出的超连续谱光谱图

Fig. 5 Supercontinuum spectrum output from port output 2

4 结 论

报道了一种结构新颖、简单实用的产生亚纳秒脉冲光纤激光输出的方法。实验中得到了平均功率超过 2 W 的高重复频率亚纳秒脉冲输出,脉冲峰值功率达到 30 kW 以上。重复频率与吸收抽运光的线性关系表明,这种结构有实现更大输出功率和更高重复频率的潜能。脉冲光纤激光器有几个非常显著的优点,如结构简单、全光纤化和成本低等,因此有着非常广阔的应用前景。此外,实验中还实现了光谱范围超过 1000 nm、光谱平坦度优于 5 dB 的超连续谱激光输出,在超连续谱应用领域也展示了很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 P. P. Jiang, D. Z. Yang, Y. H. Shen *et al.*. All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(5): 384~387
- 2 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Shen Yonghang *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1861~1865
汪圆香, 姜培培, 沈永行等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1861~1865
- 3 K. K. Chen, J. H. V. Price, D. J. Richardson *et al.*. Polarisation maintaining 100 W Yb-fiber MOPA producing μ s pulses tunable in duration from 1 to 21 ps [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14385~14394
- 4 Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Gao Xiaoming. Self-Q-switching

mechanism of SBS phase-conjugation laser resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 788~790

葛传文, 张为俊, 高晓明. 受激布里渊散射相位共轭激光器自调 Q 机理的探讨[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 788~790

- 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 Zhengqing Pan, Li Meng, Ronghui Qu *et al.*. Repetition rate stabilization of the SBS Q-switched fiber laser by external injection[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3124~3129
- 7 M. Laroche, H. Gilles, S. Girard. High-peak-power nanosecond pulse generation by stimulated Brillouin scattering pulse compression in a seeded Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 241~243
- 8 Xing Lei, Feng Xue, Liu Xiaoming *et al.*. Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 338~342
邢磊, 冯雪, 刘小明等. 受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 338~342
- 9 L. Pan, I. Utkin, R. Lan *et al.*. High-peak-power subnanosecond passively Q-switched ytterbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 895~897
- 10 M. Laroche, H. Gilles, S. Girard *et al.*. Nanosecond pulse generation in a passively Q-switched Yb-doped fiber laser by Cr³⁺:YAG saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(6): 764~766
- 11 J. Y. Huang, W. C. Huang, W. Z. Zhuang *et al.*. High-pulse-energy, passively Q-switched Yb-doped fiber laser with AlGaInAs quantum wells as a saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2360~2362
- 12 Y. H. Shen, J. L. He, Y. Q. Qiu *et al.*. Thermal decay characteristics of strong fiber Bragg gratings showing high-temperature sustainability [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(3): 430~438

栏目编辑:宋梅梅