

# 利用单模光纤中 SBS 效应进行被动调 Q 的 掺铒光纤激光器研究

黄琳<sup>1</sup> 刘永智<sup>1</sup> 代志勇<sup>1</sup> 赵羽<sup>1</sup> 张谦述<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; <sup>2</sup> 西华师范大学物理与电子信息学院, 四川 南充 637002)

**摘要** 分析了利用光纤中的受激布里渊散射(SBS)相位共轭效应进行激光腔内调 Q, 产生 ns 量级脉冲激光的原理, 并对利用该效应产生的激光脉冲波形和脉冲形成过程进行了数值模拟, 得到的脉冲波形与 SBS 相位共轭反射率随时间变化曲线基本一致, 表明利用光纤中的 SBS 相位共轭作用调 Q 具有可行性。据此, 对采用单模光纤(SMF)作为 SBS 池的掺 Er<sup>3+</sup> 调 Q 光纤激光器进行实验研究, 当单模光纤长度为 1.5 m 时, 在 45 mW 的抽运光功率下得到脉宽约 2.6 ns, 脉冲周期 58.23 ns, 平均功率 7.35 mW 的激光脉冲。进一步的研究表明: 激光器中相位共轭镜的形成与 SBS 介质长度有关, SBS 介质过长, 斯托克斯线之间无固定的相位关系, 不能形成相干叠加, SBS 相位共轭腔不能形成; SBS 介质过短, 腔内正交偏振模光子寿命的改变使脉冲出现双峰现象。脉冲形成后其属性只与 SBS 动态属性有关。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 调 Q 光纤激光器; 受激布里渊散射; 相位共轭

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0018

## Investigation of a Self-Q-Witched Fiber Laser Based on the Stimulated-Brillouin-Scattering Phase Conjugation in Single-Mode-Fibers

Huang Lin<sup>1</sup> Liu Yongzhi<sup>1</sup> Dai Zhiyong<sup>1</sup> Zhao Yu<sup>1</sup> Zhang Qianshu<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)  
(<sup>2</sup> Department of Physics and Electronic Information, West China Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China)

**Abstract** The generation of nanosecond-scale pulsed laser with stimulated-Brillouin-scattering (SBS) phase conjugation in fiber was investigated theoretically and experimentally. Numerical simulation was performed to study the waveform and the sequence of laser pulse. The obtained waveform is coincident with the curve describing the relationship between reflectivity of SBS phase conjugation mirror and time. The results show that changing Q value in resonant cavity by utilizing SBS phase conjugation is feasible. To investigate the output laser at different lengths of SBS medium, an all-fiber Er<sup>3+</sup>-doped Q-switched laser was designed. When the length of single-mode-fiber (SMF) is 1.5 m, laser pulse are generated with pulse duration of 2.6 ns, pulse period of 58.23 ns, average output power of 7.35 mW at pump power of 45 mW. When the length of SMF is decreased to 1 m, pulsed laser with remarkable dual-peaks is obtained with pulse period of 26.47 ns. While the length of SMF is increased to 2 m, only irregular stochastic pulsations are observed. Experimental data indicate that the length of SBS medium is vital to the formation of phase conjugation mirror. If it is too long, pulsed laser can not be generated for the lack of fixed conjugation relation between Stokes lines, and on the contrary, dual-peaks laser pulses occur for the change of photon lifetime in orthogonally polarized modes. Once the laser pulses are generated, their characteristics are only correlated with the stochastic characteristics of SBS and the pulse profile maintains constant with the increase of pump power.

**Key words** laser technique; fiber laser; Q-switched fiber laser; stimulated Brillouin scattering; phase conjugation

**基金项目:** 总装预研基金(51302060101)和国防重点实验室基金(51472040205DZ0201)资助课题。

**作者简介:** 黄琳(1977-), 女, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: linhuang\_568@uestc.edu.cn

**导师简介:** 刘永智(1942-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与光信息处理等方面的研究。

E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

# 1 引言

调 Q 光纤激光器可以产生高峰值功率、脉宽从几 ns 到几百 ns 的脉冲激光,这种短脉冲激光在测距、OTDR、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。新的主动和被动调 Q 方式不断见于文献报道<sup>[1~7]</sup>。对于普通调 Q 光纤激光器而言,提高脉冲峰值功率的一个有效途径是减小脉冲宽度,而脉冲宽度与腔长成正比,减小腔长就减小了增益光纤中主要依赖于掺杂粒子数和该粒子上能级寿命的可提取能,因此只有采用高掺杂光纤才能在保证可提取能的基础上降低腔长从而减小脉冲宽度,但是光纤掺杂浓度过高会造成浓度猝灭等问题;另一个途径是增加光纤中的可提取能,采用大模场光纤是一种不错的选择<sup>[8,9]</sup>,但是这样的光纤激光器需要用透镜来耦合抽运从而带来较大的插入损耗。利用光纤中的后向受激布里渊散射(BSBS)效应可使光纤激光器自调 Q 运转,这种自调 Q 产生的激光脉冲宽度与腔内光子寿命无关,而是依赖于受激布里渊散射(SBS)的动态特征。与常规的调 Q 光纤激光器相比,基于 SBS 过程新机制的自调 Q 光纤激光器可将峰值功率提高一个量级,脉宽极大降低。本文报道了利用单模光纤中 SBS 相位共轭实现掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器谐振腔内损耗调制,从而改变腔内 Q 值,实现窄脉宽、高峰值功率激光脉冲输出。实验获得脉宽约 2.6 ns,周期 58.23 ns,平均输出功率 7.35 mW 的脉冲激光输出。

# 2 SBS 相位共轭谐振腔产生 Q 突变的原理

SBS 相位共轭谐振腔示意图见图 1。

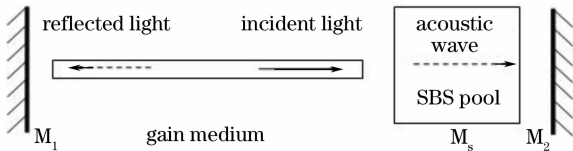


图 1 SBS 相位共轭谐振腔产生 Q 突变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mutation of Q value in a resonant cavity with SBS phase conjugation mirror

对于 SBS 产生的相位共轭镜实现调 Q 的物理过程,可以用以下模型解释:当入射信号光强度超过 SBS 阈值时,在非线性介质构成的 SBS 池中产生受激声波,与信号光同向传播的受激声波可看作一个移动的反射镜,入射光在它的作用下将产生一个有多普勒频移的背向散射光。假设起始谐振腔由反射

率为  $R_1$  的高反平面镜  $M_1$  和与反射率为  $R_2$  的低反平面镜  $M_2$  组成,光程长度  $L$ 。当光纤内光功率达到受激布里渊散射阈值并产生背向散射时,构成反射率为  $R_s$  的相位共轭镜  $M_s$ ,此时  $M_s$  与  $M_1$  一起构成 SBS 相位共轭谐振腔,光程长度为  $L_s$ 。激光在起始腔  $M_1$  与  $M_2$  之间往返一周所经受的损耗为  $\epsilon_2$ ;当 SBS 相位共轭谐振腔形成之后,激光仅在共轭镜  $M_s$  与  $M_1$  之间往返,其往返一周所经受的总损耗为  $\epsilon_s$ ;从起始腔向完全相位共轭腔过渡经历的短暂非完全相位共轭腔损耗为  $\epsilon_{tr}$ 。 $\delta$  为腔内光学元件的吸收、散射、衍射损耗之和。上述参数存在如下关系:

$$\epsilon_2 = -\ln R_1 + \delta - \ln R_2, \tag{1}$$

$$\epsilon_s = -\ln R_1 + \delta - \ln R_s, \tag{2}$$

$$\epsilon_{tr} = -\ln R_1 + \delta - \ln R'_2 - \ln R'_s, \tag{3}$$

式中的  $R'_s$  表示随腔内光强增大的相位共轭镜的反射率; $R'_2$  代表从  $M_2$  反射回来,又通过共轭镜  $M_s$  而进入相位共轭腔的反射光的比率。在 SBS 共轭腔完全形成之前  $R'_s$  逐渐增大而  $R'_2$  逐渐减小。 $M_s$  开始形成之前, $R'_s = 0, R'_2 = R_2, \epsilon_{tr}$  即为  $\epsilon_2$ ;随着  $R'_s$  的增大, $R'_2$  迅速变小;当增大  $R'_s$  到  $R_s$  时, $R'_2$  小到可以忽略。此时  $\epsilon_{tr}$  为  $\epsilon_s, M_s$  完全形成。SBS 共轭腔形成后,虽然光程  $L_s < L$ ,但是  $R_s > R_2$  ( $R_s$  可以达到 60% 以上),即  $\epsilon_s < \epsilon_2$ ,由此谐振腔的 Q 值由起始腔的低 Q 值突变为高 Q 值,从而实现了调 Q。

# 3 数值分析

假设腔内损耗可忽略且掺杂粒子在光纤轴向均匀分布,SBS 相位共轭的调 Q 光纤激光器腔内光子数密度  $\Phi(t)$ 、反转粒子数密度  $\Delta n(t)$  满足如下关系<sup>[10]</sup>:

$$\frac{d\Phi}{dt} = c \left[ \Delta n \sigma_e \frac{l}{L} - \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R'(t)} \right) \right] \Phi, \tag{4}$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{2c \sigma_e \Delta n \Phi}{n}, \tag{5}$$

$$P_{out}(t) = \frac{h\nu \Phi(t) c \sigma_e [1 - R'(t)]}{n}, \tag{6}$$

其中  $n$  是增益介质折射率, $c$  是真空中光速, $\sigma_e$  是掺杂粒子发射截面, $\nu$  是激光频率, $h$  是普朗克常数, $l$  和  $L$  分别是增益介质和腔的光程长度,  $R_1$  表示谐振腔高反镜反射率, $R'(t)$  表示  $t$  时刻输出耦合镜反射率, $0 < t < T$  时, $R'(t) = R_2, t > T$  时, $R'(t) = R_s(t)$ 。在  $T$  时刻达到 SBS 阈值,此时:

$$\Phi(T) = \frac{21A_{eff} n}{g_B l_{eff} h\nu \sigma_e c}. \tag{7}$$

其中  $A_{\text{eff}}$  为 SBS 介质有效截面,  $l_{\text{eff}}$  为 SBS 介质有效作用长度,  $g_{\text{B}}$  为布里渊峰值增益。取步长  $\Delta t = 0.01 \text{ ns}$ , 初值  $\Phi(t=0) = 0, \Delta n(t=0) = 0$ , 用四阶 Runge-Kutta 法对耦合微分方程(4)式、(5)式数值求解, 此时(4)中的  $R'(t) = R_2$ 。所对应的  $\Delta n(T)$  由(4)式、(5)式的数值结果给出。 $\Phi(T)$  达到 SBS 阈值后, 以  $\Phi(t=T), \Delta n(t=T)$  为初值, 在继续对(5)式用四阶 Runge-Kutta 法数值求解  $\Delta n(t)$  的同时对(4)式~(6)式做迭代计算, 直至  $\Phi(t) \approx 0, \Delta n(t) \approx 0$ 。由此可得一个调 Q 过程的数值模拟。

建立如图 2 所示的基于 SBS 相位共轭的掺  $\text{Er}^{3+}$  调 Q 光纤激光器。

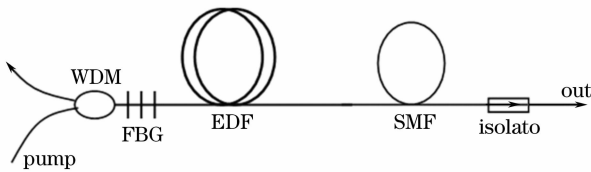


图 2 掺  $\text{Er}^{3+}$  调 Q 光纤激光器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the  $\text{Er}^{3+}$  doped double-clad Q-switched fiber laser

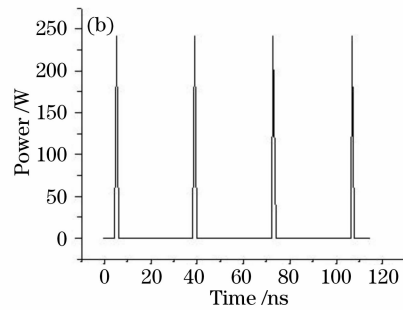
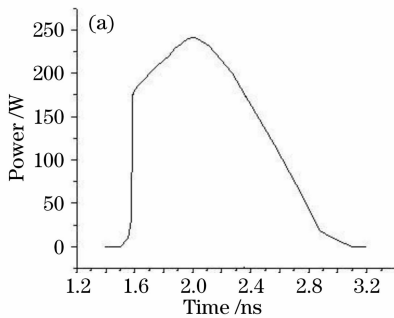


图 4  $L = 1.5 \text{ m}, l_{\text{eff}} = 1.5 \text{ m}, R_1 = 0.99$  时仿真脉冲波形(a), 脉冲序列(b)

Fig. 4 Simulated waveform (a), trains (b) of output pulse laser pulses with  $l = 1.5 \text{ m}, R_1 = 0.99$

从图 4(a)可以看出脉冲波形与图 3 中  $R_s$  随时间变化曲线在一定程度上吻合, 这证明了利用 SBS 相位共轭作用调 Q 是可行的。 $L = 1.5 \text{ m}, l_{\text{eff}} = 1.5 \text{ m}$  时仿真输出脉冲的 3 dB 宽度为 1.06 ns, 脉冲周期 34.57 ns。增加(减小) $l_{\text{eff}}$  的长度, 仿真得到的脉冲波形变化不大, 脉宽增加(减小), 周期增大(减小)。

## 4 实验结果及讨论

按照图 2 所示结构搭建掺  $\text{Er}^{3+}$  调 Q 光纤激光器进行实验。采用中心波长 974 nm、最大输出功率 250 mW 的单模二极管抽运掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 长度 3 m 的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤为加拿大 CorActive 公司生产的

采用上述激光器模型, 其中  $R_1$  为光纤布拉格光栅 (FBG) 反射率,  $R_2$  是光纤端面反射, 由于采用隔离器很好地隔离了端面的后向反射光, 所以  $R_2 \leq 4\%$ 。考虑 SBS 发生在 SMF 前端, 故有  $l \approx L \approx L_s$ 。图 3 给出  $R_s$  随时间的变化规律<sup>[11]</sup>。

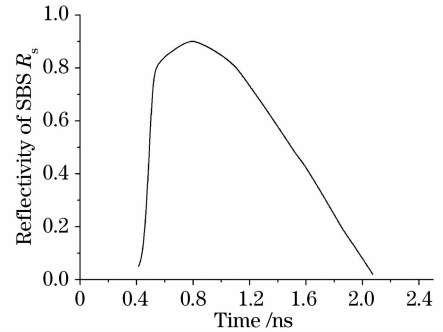


图 3  $R_s$  与时间的关系

Fig. 3  $R_s$  as a function of time

取  $\nu = \nu/\lambda \approx 1.326 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ,  $g_{\text{B}} = 2.5 \times 10^{-11} \text{ mW}^{-1}$ ,  $\sigma_e = 2.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\nu = c/n \approx 2.055 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,  $l = 3 \text{ m}$ ,  $R_1 = 0.99$ ,  $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ ,  $n = 1.46$ ,  $l_{\text{eff}} \approx 1.5 \text{ m}$ , 数值计算得到的脉冲波形和脉冲序列由图 4 给出。

EDF-L 1500, 模场直径  $6 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.25, 对 980 nm 波长的吸收系数为 15 dB/m; FBG 峰值反射波长 1550.24 nm, 峰值反射率 99.23%, 反射带宽 0.2194 nm; 用 ANDO6319 光谱仪观察激光脉冲的时域特性, Tektronix TDS3052 观察脉冲波形, ANDO AQ2140 监视其功率, 自行设计的探测器对脉冲有 20 倍展宽作用以降低峰值功率对仪器带来的损害。

作为 SBS 池的 SMF 长度为 2 m 时, 没有脉冲激光输出, 从示波器上仅看到无规则的随机脉动。图 5 给出了采用 2 m SMF 作为 SBS 介质池时输出脉冲激光的光谱图和波形图, 从图 5(a)中看到光谱中心 1550.2538 nm, 半身全宽 (FWHM) 为 0.2113 nm, 与

FBG的反射带宽基本吻合,说明FBG在腔内起到选频的作用。

缩短SMF长度至1.5 m,并调节抽运功率至15 mW时有微弱连续激光输出;增加抽运功率至45 mW时有激光脉冲输出,脉冲宽度约2.6 ns,周期58.23 ns,平均功率7.35 mW;继续增加抽运功率,脉冲波形基本不变,周期略有减小,平均功率略

有增加。说明抽运功率达到SBS的激发阈值后开始有激光脉冲输出,脉冲一旦形成,其属性只与SBS的动态属性有关,与抽运功率无关。图6给出了采用1.5 m SMF作为SBS介质池时输出脉冲激光的光谱图和波形图,从光谱中看到光谱压窄,符合激发SBS需压窄谱宽的要求。

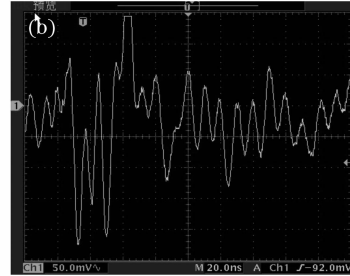
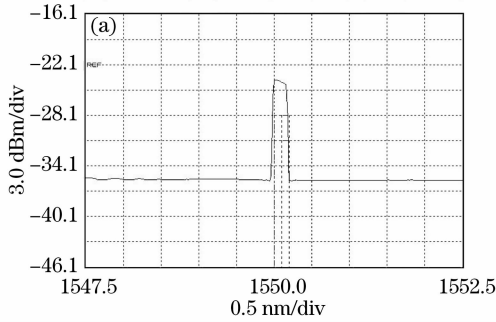


图5 单模光纤长度为2 m时输出激光光谱图(a),无规则随机脉冲波形图(b)

Fig. 5 Spectrum (a), irregular wave form (b) profile of output laser with  $l_{SMF} = 2$  m

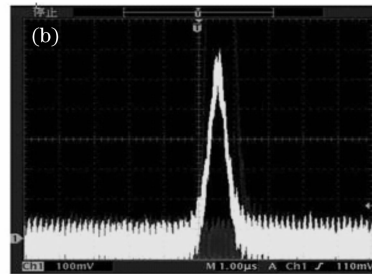
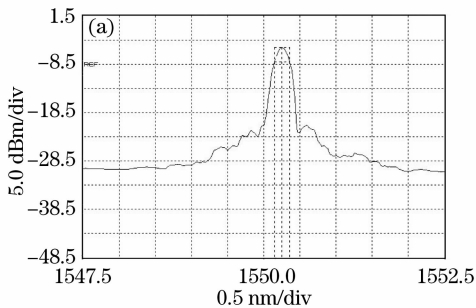


图6 单模光纤长度为1.5 m时输出脉冲激光光谱图(a),脉冲激光波形图(b)

Fig. 6 Spectrum (a), wave profile (b) of output pulse laser with  $l_{SMF} = 1.5$

固定抽运功率在45 mW,继续降低SMF长度至1 m,脉冲出现明显的双峰现象,脉冲周期降低至26.47 ns,波形图见图7。

实验结果在SMF长度2 m、1 m时与仿真结果有出入,原因是仿真模型中没有考虑斯托克斯线之

间的相位关系和腔内的正交偏振模的光子寿命,建立利用基于SBS效应的相位共轭镜对腔内损耗进行调制的光纤激光器的仿真模型的意义仅仅在于讨论这种方法的可行性。分析实验结果得出:SBS介质过长,斯托克斯线之间无固定的相位关系,不能形成相干叠加,使得SBS相位共轭腔不能形成,因此不能获得脉冲激光输出;SBS介质长度的降低,改变了腔内正交偏振模的光子寿命,使得光脉冲的次峰可以和主峰可相比拟,输出双峰脉冲。

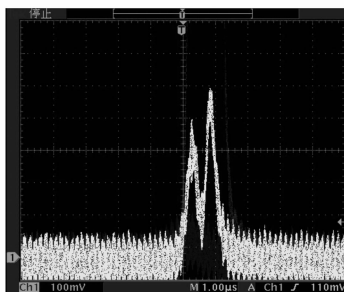


图7 单模光纤长度为1 m时输出脉冲激光波形图

Fig. 7 Pulse wave profile of output pulse laser with  $l_{SMF} = 1$  m

## 5 结 论

通过对SBS相位共轭谐振腔产生Q突变的原理进行分析,从理论上证明了利用该原理可以实现激光腔内调Q,从而产生ns量级脉冲激光。对SBS相位共轭作用下激光脉冲的形成进行数值模拟,得

到的脉冲波形与 SBS 相位共轭反射率随时间变化曲线基本一致,进一步说明利用这种作用调 Q 具有可行性。对掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤作为增益介质、多个长度单模光纤作为 SBS 池调 Q 光纤激光器的实验研究表明:1)相位共轭镜的形成与 SBS 介质长度有关;过长,斯托克斯线之间无固定的相位关系,不能形成相干叠加,使得 SBS 相位共轭腔不能形成,从而没有脉冲激光输出;过短,腔内正交偏振模的光子寿命会发生改变使脉冲出现双峰现象。2)在单模光纤长度一定的情况下,当抽运达到激发 SBS 所需光子数的功率时激光脉冲形成,并且一旦脉冲形成,增加抽运功率脉冲形状基本保持不变,重复频率和输出平均功率略有增加。说明脉冲属性只与 SBS 动态属性有关。

### 参 考 文 献

- 1 Ding-wei Huang, Wen-Fung Liu, C. C. Yang. Q-switched all-fiber laser with an acoustically modulated fiber attenuator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1153~1155
- 2 N. A. Russo, R. Duchowicz, J. Mora *et al.*. High-efficiency Q-switched erbium fiber laser using a Bragg grating-based modulator [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(6): 361~366
- 3 D. Sabourdy, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene *et al.*. Coherent combining of Q-switched fiber lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(20): 1254~1255
- 4 T. V. Andersen, P. Perez-Millan, S. R. Keiding *et al.*. All-fiber actively Q-switched Yb-doped laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 251~256
- 5 A. Piper, B. C. Thomsen, A. Malinowski *et al.*. High pulse energy Q-switched laser in MOPA configuration [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5709**: 329~337
- 6 Rao Haibo, Liao Yun, Cheng Jianbo *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched monolithic microchip laser based on liquid phase epitaxy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 90~93  
饶海波,廖云,成建波等. 外延单片式激光二极管抽运被动调 Q 微激光器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 90~93
- 7 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-switching and modelocking Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1021~1024  
甘雨,向望华,周晓芳等. 被动调 Q 锁模掺镱光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1021~1024
- 8 H. L. Offerhaus, J. A. Alvarez-Chavez, J. Nilsson *et al.*. Multi-mJ, multi-watt Q-switched fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 37~39
- 9 C. C. Renaud, J. A. Alvarez-Chavez, J. K. Sahu *et al.*. 7.7 mJ pulses from a large core Yb-doped cladding pumped Q-switched fiber laser [C]. CLEO 2001, Baltimore, MD, USA
- 10 J. J. Degnan. Theory of optimally coupled Q-switched laser [J]. *IEEE J Quant. Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220
- 11 G. Crofts, M. Damzen, R. Lamb. Experimental and theoretical investigation of two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(11): 2282~2288