

文章编号: 0253-2239(2010)04-1112-05

单频脉冲光纤放大器中受激布里渊散射实验研究

常丽萍¹ 郭淑琴¹ 范薇² 徐红¹ 任宏亮¹ 汪小超² 陈柏²

(¹ 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023
² 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 从实验上研究了掺镱(Yb)双包层光纤放大器中单频脉冲信号放大时,受激布里渊散射(SBS)引起的脉冲畸变现象。实验中采用的单频双包层光纤放大器光纤长度 14 m,内包层直径 130 μm ,纤芯模场直径 6.5 μm ,在单频脉宽 200 ns 脉冲放大,且峰值功率 3.3 W 时观察到后向 SBS 脉冲,脉宽明显小于输入信号脉宽,分析了受激布里渊散射引起放大脉冲波形畸变的随机特性和功率特性,并采用自由光谱范围 30 GHz 的法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪验证了 SBS 频移。

关键词 非线性光学; 单频脉冲放大; 受激布里渊散射; 波形畸变

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103004.1112

Experimental Study of Stimulated Brillouin Scattering in Single-frequency Pulsed Fiber Amplifiers

Chang Liping¹ Guo Shuqin¹ Fan Wei² Xu Hong¹ Ren Hongliang¹
Wang Xiaochao² Chen Bai²

¹ College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China
² Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Experimental measurements on the phenomenon of pulse distortion which is induced by the stimulated Brillouin scattering (SBS) in the ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers with the single-frequency pulse amplification are presented. In the experiment, the 14 m double-clad single-frequency amplifier with the inner-clad mode diameter 130 μm and the fiber core mode diameter 6.5 μm is adopted. The backward stimulated Brillouin scattering (SBS) pulse is observed when the peak power is up to 3.3 W in the single-frequency pulse amplification with the pulse duration of 200 ns. The pulse width of SBS pulse is apparently narrower than that of the input signal pulse. The stochastic aspect of pulse distortion and power property induced by SBS are analyzed. Meantime the frequency shift of SBS is verified using the F-P interferometer with free spectral range of 30 GHz.

Key words nonlinear optics; single-frequency pulse amplification; stimulated Brillouin scattering; pulse distortion

1 引言

双包层光纤激光器和放大器可获得具有衍射极限的高功率输出,集高效、高可靠性和散热性好等优点,使其在工业、医疗、科研和军事等领域有着极其诱人的应用前景。输出功率水平得到快速提高,连续光输出已由原来的 1 W 提高到现在的千瓦量级^[1~3]。超稳定大功率单频光纤激光源具有衍射极

限的光束质量,可以用于相干光束合束^[4,5]、光参量振荡的抽运源和高精度的干涉测量,如引力波探测^[6]。受激布里渊散射(SBS)增益带宽(一般为几十兆赫兹),而高功率单频光纤激光源线宽一般在千赫兹到兆赫兹数量级,另外纤芯中较高的光功率密度和较长的相互作用长度,使光纤中后向 SBS 成为影响单频光纤激光器和放大器输出功率提高的主要因素;同

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(60977020)和浙江省自然科学基金(Y1090338)资助课题。

作者简介: 常丽萍(1980—),女,博士,讲师,主要从事光纤放大器和传感器方面的研究。E-mail: clping@zjut.edu.cn

时,放大器中的信号增益也使 SBS 阈值进一步降低。因此研究单频信号放大中的 SBS 现象对单频放大器和激光器的研究具有重要的指导意义。

光纤放大器和激光器中的 SBS 现象的理论和实验研究已有不少报道^[7,8],但主要是针对无源光纤中瓦量级信号功率时引起的 SBS 现象分析,和单包层掺铒光纤放大器中 SBS 实验研究^[9,10],国内很少从实验上研究 SBS 对长脉冲波形和功率的影响。本文从实验上研究了掺镱双包层光纤放大器(YDDCFA)中单频百纳秒脉冲放大时 SBS 现象,分析了 SBS 引起的脉冲波形畸变随机特性,采用法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪计算了 SBS 频移 16.5 GHz,即波长移动 0.06 nm,理论和实验结果一致。

2 实验装置

图 1 所示为单频、脉宽 200 ns 脉冲放大的总体实验装置,采用两级放大结构,第一级采用单包层光纤放大器预放大,第二级采用双包层光纤放大器功率放大。光纤分布反馈(DFB)激光器提供基横模、单纵模连续光输出,经声光斩波器(AO chopper)后斩成重复频率 1 Hz,脉宽 200 ns 脉冲。在双包层功率放大器之前,先用预放大器提高输入脉冲平均功率,预放大器为普通单包层放大器,增益光纤为 Nufern 1064 光纤,纤芯模场直径 6.5 μm,数值孔径 0.13,预放大器输出端接有带宽 1 nm 的光纤滤波器,滤除预放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)噪声,提高了后续 YDDCFA 输入信号的信噪比,使信号光尽可能多的提取双包层光纤放大器的存储能量。

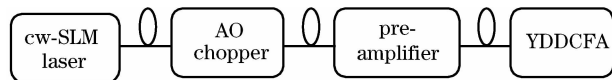


图 1 总体实验结构

Fig. 1 Schematic setup of the experiment

图 2 为 YDDCFA 实验结构。采用中心波长 970 nm 的半导体激光器抽运,增益光纤采用 Nufern 公司的 5/130 掺 Yb³⁺ 双包层光纤,内包层直径 130 μm,数值孔径为 0.46,纤芯模场直径为 6.5 μm,数值孔径为 0.12,光纤长度为 14 m。放大后的脉冲信号经透镜和 970 nm 滤波片滤波后,准直透镜耦合光纤输出,用光纤 PIN 管测量放大后的脉冲波形;能量计 ETM1000 用来测量放大后的脉冲能量。由于信号种子源为单频信号,线宽在千赫兹左右,远小于 SBS 增益带宽(一般为几十兆赫兹),所以 SBS 阈值较低,实验中模场直径只有 6.5 μm 的纤芯中

极易达到较高的功率密度,光纤中 SBS 会限制单频激光源最大输出功率,使放大后脉冲发生畸变。因此 SBS 是单频信号放大过程中的主要非线性现象,实验中应实时监测 SBS 的发生。图 2 中 85:15 耦合器的后向 15% 端为后向 SBS 的实时监控端。

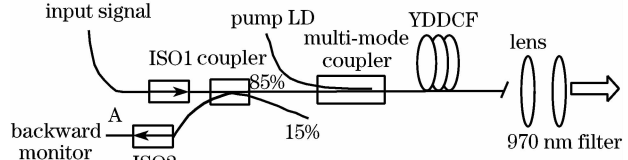


图 2 掺镱双包层光纤放大器结构(ISO:隔离器)

Fig. 2 Configuration of the ytterbium doped-clad fiber amplifier (ISO: isolator)

3 实验结果和分析

3.1 输出脉冲波形随抽运功率的变化

实验中采用光纤 PIN 管测量信号脉冲波形。图 3(a)所示为预放大后进入 YDDCFA 的输入脉冲信号,脉冲宽度为 200 ns。随着抽运功率的升高,前向抽运功率 0.39 W 时,输出放大脉冲开始出现饱和,脉冲前沿高,后沿低,如图 3(b)所示。继续升高抽

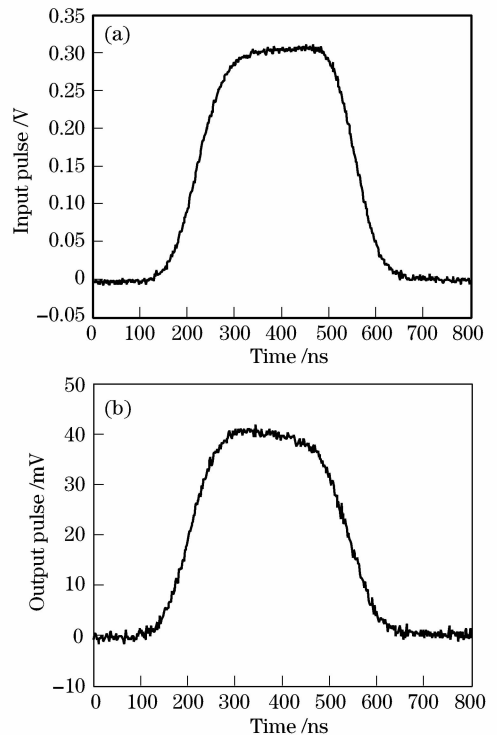


图 3 (a) 输入脉冲波形; (b) 抽运功率 0.39 W 时,饱和脉冲波形(幅值缩小 25 倍)

Fig. 3 (a) The input pulse waveform; (b) the saturated pulse waveform with the pump power 0.39 W (amplitude contracted by 25 times)

运功率,当抽运功率到 0.41 W 时,前向放大脉冲波形开始出现畸变,如图 4(a)和 4(b)所示,并可发现脉冲畸变形状并不是固定的,脉冲形状的不稳定,反映了其随机特性,且其功率下降谷位置都出现在脉冲前沿后相同的时间位置。同时,在耦合器反向监

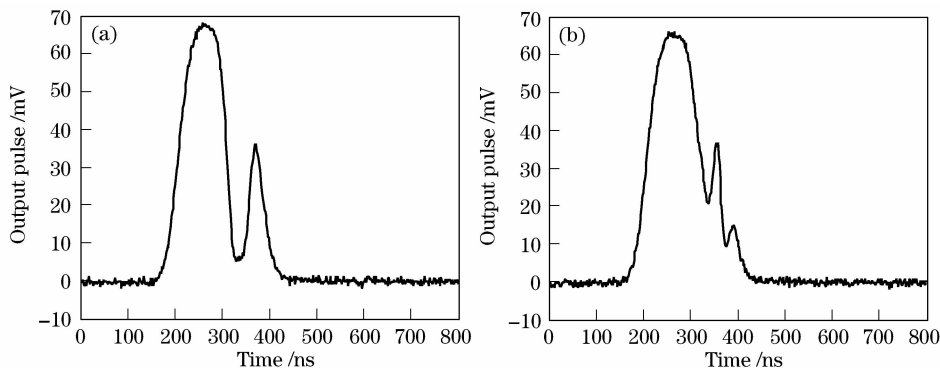


图 4 抽运功率 0.41 W 时,放大后脉冲畸变图(a)和(b)(幅值缩小 25 倍)

Fig. 4 The amplified distorted pulse waveform (a) and (b) with the pump power 0.41 W (amplitude contracted by 25 times)

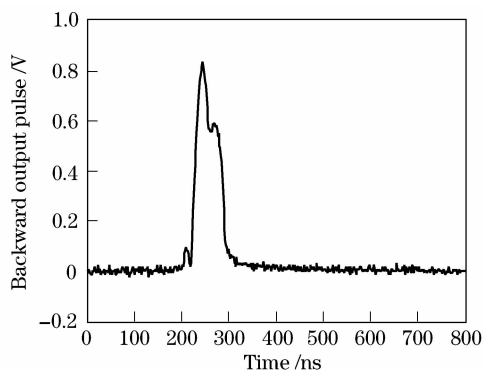


图 5 抽运功率 0.41 W 时,后向输出 SBS 脉冲波形
Fig. 5 The backward output SBS pulse waveform with pump power 0.41 W

若继续升高抽运功率,放大器中将出现自激,如图 6 所示。放大器抽运期间的激光作用,主要由光纤熔点、端面光反馈或隔离器隔离度不够引起的,特别是抽运功率较高时,残余光反馈形成回路振荡,直到耗尽放大器中的有效储能。同时尖峰脉冲的高峰值功率使放大器中的光学元件容易遭到永久损坏,

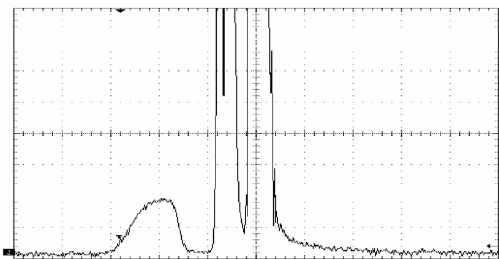


图 6 YDDCFA 中的自激尖峰脉冲

Fig. 6 Self-excited spike pulse in YDDCFA

控 A 端观察反向输出脉冲,可发现抽运功率小于 0.41 W 时,无后向传输脉冲,而当抽运功率升高至 0.41 W 时,反向输出脉冲突然出现,如图 5 所示,其脉冲宽度小于输入脉宽。

实验中应尽量避免。

3.2 输出脉冲能量随抽运功率和信号功率变化

输入脉冲能量 26.4 nJ,采用能量计 ETM1000 测量放大后的脉冲能量随抽运功率的变化,如图 7 所示。抽运电流 0.92 A(功率约 0.4 W)脉冲形状刚出现畸变,测得能量 660 nJ,由于重复频率只有 1 Hz,所以不能忽略其中的 ASE 噪声。可估算一下 ASE 在总能量中占的比例有多少。不接信号光,直接测得抽运功率 0.92 A 时的 ASE 平均功率为 3.8 mW,能量计积分时间为 5 μ s,计算得能量为 19 nJ,所以 ASE 能量在输出总能量中占得比例很小,可忽略不计。信号脉宽为 200 ns,对应于最高输出能量时的脉冲峰值功率为 3.3 W。

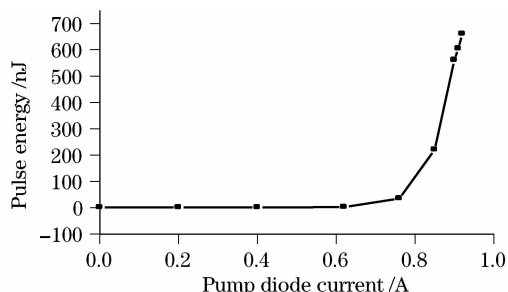


图 7 输出脉冲能量对抽运电流的变化

Fig. 7 Output pulse energy versus the pump diode current

采用准直透镜光纤耦合输出,用 PIN 管测量放大后脉冲峰值。由于准直透镜耦合损耗比较大,故测量的脉冲峰值并不是实际峰值,只是相对值。图 8 所示为脉冲出现畸变之前,不同输入信号峰值时,

输出脉冲峰值随抽运功率的变化,图 8 所示为五种不同的输入信号峰值。可以看出,对于不同的输入信号峰值,输出脉冲峰值都被限制在 1400 mV 左右,继续增大,脉冲即出现畸变,即此时达到了放大器中脉冲出现畸变的临界阈值,输入信号峰值越小,达到脉冲畸变阈值所需要的抽运功率越高。

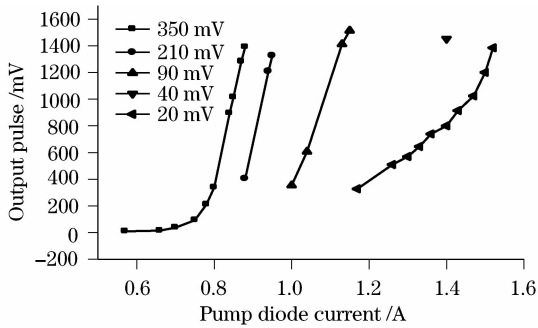


图 8 不同输入信号峰值时,输出脉冲 PV 值随抽运电流的变化

Fig. 8 Peak-value of output pulse versus the pump diode current under different Peak-value of the input pulse

3.3 受激布里渊散射(SBS)的判定

单频放大器中发生的主要非线性现象为 SBS。SBS 将引起脉冲波形畸变。通过实验验证 SBS 的发生,并计算其频移。

对于波长 $1 \mu\text{m}$ 的单频信号光,布里渊(Brillouin)增益带宽 $\Delta\nu_B$ 约为 38 MHz,在斯托克斯(Stokes)位移约 16.5 GHz 处产生峰值 Brillouin 增益^[11], Brillouin 频移为 16.5 GHz,即波长移动约 0.06 nm。受实验室现有条件的限制,用光谱仪测量信号光和 Brillouin 波长存在两个难点:1) 光谱仪对连续或准连续光光谱的测量较容易,而实验中信号光为重复频率只有 1 Hz 的单脉冲,光谱仪很难捕捉到信号光谱;2) 信号光和 Brillouin 光波长之差为 0.06 nm,而实验室现有光谱仪的最小分辨率只有 0.05 nm,即使光谱仪采用外触发同步捕捉到信号光,也很难把波长如此接近的两个光谱区分出来。

实验中采用了法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪,对信号光和 Brillouin 光波长实现了成功区分。F-P 干涉仪腔长 0.3 cm,自由光谱范围 30 GHz,对应波长 0.1 nm,前向信号光和反向 Brillouin 光经过 F-P 扫描干涉仪,经 CCD 成像后的干涉环如图 9(a)和(b)所示。对比两个干涉环的位置,由干涉条纹移动计算波长差。图 9(a)中前向信号光干涉环 A 点的坐标为(350,280),B 点坐标为(173,280);图 9(b)中后向 Brillouin 光干涉环 C 点坐标为(242,280),D 点坐标为(112,280),计算其波长差为 $(350 -$

$242) \times 0.1 / (350 - 173) = 0.0610 \text{ nm}$,与理论计算的 SBS 波长移动完全一致。由此可判断单频长脉冲放大过程中的脉冲畸变是由 SBS 引起的,且脉冲峰值功率 3.3 W 为 SBS 发生的临界功率,即该放大器的 SBS 阈值。

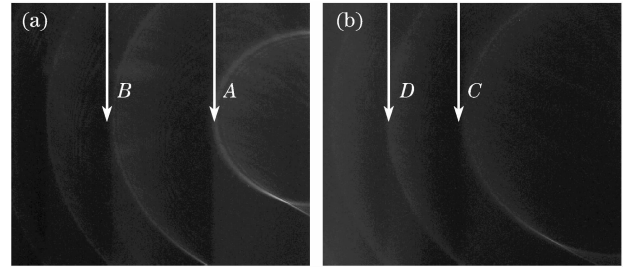


图 9 前向信号光(a)和后向 Brillouin 光(b)扫描干涉环
Fig. 9 Scanning interference ring of the forward signal (a) and the backward Brillouin light (b)

引起脉冲波形畸变的 SBS 是由自发 Brillouin 散射噪声发展起来的,所以 SBS 具有随机特性,也导致输出脉冲波形的随机波动^[12,13]。被放大的脉冲信号作为 SBS 的抽运,产生后向的 Stokes 光,Stokes 光在后向传输中沿光纤逐渐被放大,在 DCF 的信号输入端达到最大,Stokes 光消耗了上能级粒子数,降低了前向传输放大的信号脉冲功率,导致增益耗尽,在脉冲前沿后 140 ns 处出现功率下降谷,对应于光在 14 m 的 DCF 中一次往返时间,如图 4 所示,之后增益逐渐恢复,脉冲功率逐渐升高。若增大信号脉冲宽度,到 0.5 μs 或更长,则随着增益的逐渐恢复,会在脉冲前沿后的 280 ns 处出现第二次的功率下降谷。

在脉冲放大器中,由于 SBS 只把功率超过 Brillouin 阈值的脉冲中心的能量转换成 Stokes 波,因而 Stokes 脉冲较信号脉冲较窄,并且 Stokes 脉冲的峰值功率将超过信号脉冲的输出功率,实际应用中,过高的 Stokes 峰值功率会使光纤或光学隔离器等光无源器件得到永久性破坏。

4 结 论

实验研究了单频 200 ns 脉冲双包层光纤放大中的非线性效应-受激布里渊散射。在峰值功率 3.3 W 时观察到由 SBS 引起的后向脉冲,分析了放大过程中脉冲波形畸变的随机特性,采用 F-P 扫描干涉仪实验上验证了 SBS 的频移。SBS 限制了放大器单频信号的放大性能,由于其峰值功率可能比信号功率更高,将使光纤系统中的光无源器件遭到破坏。目前增大纤芯截面,即降低纤芯功率密度(如

采用 LMA 光纤)、缩短光纤长度和通过相位调制展宽信号光谱等方法已在一定程度上使单频、单模信号放大为几十瓦的功率输出,此外改变纤芯掺杂物成份、纳米直接掺杂技术^[14]、控制温度分布^[15]、人为引入应力场分布或改善抽运方式^[16]也是抑制非线性效应的有效途径。尽管这几种方法都可有效地抑制非线性效应的发生,但同时也存在一定的缺点,比如大模场面积光纤在有效抑制非线性的同时引伸出的多模输出,模场弯曲畸变严重,光束质量下降,稳定性差等问题,目前还没有找到有效的控制方法,仍需在理论和实验方面进一步探索。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1kW of continuous-wave output power [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8):470~471
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- 3 Dong Xue, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*, A 110-W fiber laser with homemade double-clad fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 345~347
- 4 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers [J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9):47~54
何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 光纤激光器相干组束技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9):47~54
- 5 Thomas H. Loftus, Anping Liu, Paul R. Hoffman, *et al.*. 522W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 349~351
- 6 A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1537~1539
- 7 Wang Chun-can, Zhang Fan, Lu Yu-chun *et al.*. Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1630~1635
王春灿, 张 帆, 陆玉春等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1630~1635
- 8 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10
胡姝玲, 张春熹, 高春清等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 6~10
- 9 K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada. Coherent lightwave amplification and stimulated Brillouin scattering in an erbium-doped fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 564~567
- 10 Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min *et al.*. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1740~1744
陈 伟, 张 艳, 任 民等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic, 1995
- 12 W. Robert, Boyd, K. Rzażewski. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. *Phy. Rev. A*, 1990, **42**(9): 5514~5521
- 13 Yves Jaouën, G. Canat, S. Grot *et al.*. Power limitation induced by nonlinear effects in pulsed high-power fiber amplifiers [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, **7**(2): 163~169
- 14 S. Tammela, M. Soderlund, J. Koponen *et al.*. The potential of direct nanoparticle deposition for the next generation of optical fibers[C]. *SPIE*, 2006, **6116**: 61160G
- 15 V. I. Kovalev and R. G. Harrison. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 161~163
- 16 J. M. C. Boggio, J. D. Marconi, H. L. Fragnito. Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distribution[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3808~3814