

# 种子相位和强度同时调制抑制光纤激光放大器 SBS 的新方法研究

冉 阳 王小林\* 吕海斌 粟荣涛 周 朴 司 磊

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 在高功率光纤放大器系统中,受激布里渊散射(SBS)效应由于其较低的阈值特性成为光纤放大器功率提升的首要限制因素。为了提高SBS阈值,提出了一种基于对入射种子光同时施加相位调制和强度调制抑制SBS的新方法。建立了光纤激光放大器中的SBS效应激励模型对该方法进行理论仿真。仿真结果表明,该方法可以在窄线宽激光输出的条件下显著提高光纤激光放大器中的SBS阈值,在对20 W入射种子光同时施加100 MHz,10 V的相位调制和10 MHz,4 ns的强度调制后,放大器输出功率可达1127.4 W,为单频光SBS阈值的18倍。

**关键词** 非线性光学;受激布里渊散射;相位调制;强度调制;光纤放大器

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805003

## Novel Suppression Method Study for Stimulated Brillouin Scattering by Simultaneous Phase and Intensity Modulation in Fiber Amplifiers

Ran Yang Wang Xiaolin Lü Haibin Su Rongtao Zhou Pu Si Lei

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In high power fiber amplifier system, stimulated Brillouin scattering (SBS) becomes the primary limiting factor to achieve high power because of its relatively lower threshold. In order to improve SBS threshold, a new method to suppress SBS is presented, which needs to modulate the incident seed laser both in phase and intensity. A model of SBS dynamics to numerically simulate the SBS threshold is established after using this method. The simulation results show that this method using phase modulation and intensity modulation simultaneously can greatly enhance SBS threshold under the condition of narrow linewidth output. When 20 W seed laser is put into a fiber amplifier system after phase modulation of 100 MHz, 10 V and intensity modulation of 10 MHz, 4 ns, the output power of fiber amplifier can reach 1127.4 W, which is 18 times of that of the SBS threshold for single frequency laser.

**Key words** nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; phase modulation; intensity modulation; fiber amplifier

**OCIS codes** 060.5060; 060.2320; 190.4370; 290.5900

## 1 引 言

高功率窄线宽光纤放大器在遥感测量、引力波探测、非线性频率转换、相干合成等领域有着重要应用<sup>[1-3]</sup>。在高功率窄线宽掺稀土离子光纤放大器中,受激布里渊散射(SBS)由于其较低的阈值特性成为其功率提升的首要限制因素。

近年来,国内外已采用了各种方法对SBS进行抑制<sup>[4-7]</sup>。其中以通过相位调制展宽有效布里渊增益谱,

收稿日期: 2015-01-20; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ3004)、湖南省教育厅科学研究项目(YB2013B003)

作者简介: 冉 阳(1991—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: ran\_yang@163.com

导师简介: 司 磊(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: w\_zt@163.com

\*通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com, w\_zt@163.com

以及通过强度调制使得激光脉宽小于声子寿命抑制SBS效果较明显,且系统复杂性和成本均较低。2012年,国防科学技术大学的王小林等<sup>[8]</sup>利用相位调制技术在全光纤放大器中实现了窄线宽666 W激光输出;2013年,栗荣涛等<sup>[9]</sup>利用强度调制技术搭建了913 W的窄线宽纳秒脉冲光纤激光放大器。然而目前这两种调制方式的SBS抑制能力都十分有限,相位调制抑制SBS的能力受限于相位调制器的半波电压和信号发生器的调制频率及调制电压;强度调制由于使得激光工作在脉冲状态,激光的峰值功率较高,使得受激拉曼散射(SRS)先于SBS出现<sup>[9]</sup>。

为了进一步突破现有SBS抑制技术的限制,本文提出了一种新的抑制光纤激光放大器中SBS的方法。该方法是通过对人射种子光同时施加相位调制和强度调制来实现的SBS抑制。仿真模拟了该方法的SBS抑制能力,并对其SBS抑制机理进行了分析。

## 2 放大器中的SBS仿真实论

### 2.1 理论模型

仿真结构如图1所示,种子光经信号发生器(FG1)驱动的相位调制器(PM)和信号发生器(FG2)驱动的强度调制器(IM)后注入掺镱光纤(YDF)放大器输出。

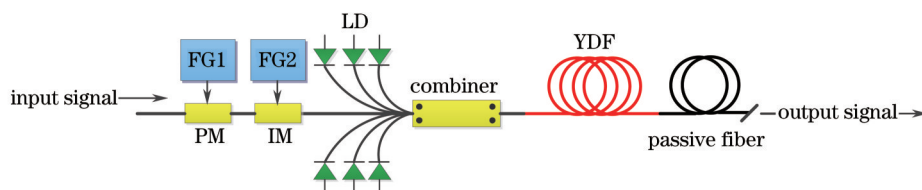


图1 SBS仿真结构

Fig.1 Simulation layout of SBS

根据图1所示的结构,通过含时SBS三波耦合方程<sup>[10-11]</sup>,结合速率方程,可以得到如下的光纤放大器SBS仿真方程

$$\frac{dP_p}{dz} + \frac{1}{v_{gp}} \frac{dP_p}{dt} = -\alpha_p P_p - \Gamma_p [\sigma_a^p N - (\sigma_a^p + \sigma_e^p) N_2] P_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_s}{\partial t} = -\frac{\alpha_s}{2} A_s + \frac{1}{2} [(\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2 - \sigma_a^s N] A_s + i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_B|^2) A_s + i\kappa_{1s} A_B Q, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial A_B}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial A_B}{\partial t} = -\frac{\alpha_s}{2} A_B + \frac{1}{2} [(\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2 - \sigma_a^s N] A_B + i\gamma_s (|A_B|^2 + 2|A_s|^2) A_B + i\kappa_{1B} A_s Q^*, \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nu_A \frac{\partial Q}{\partial z} = -\left[ \frac{1}{2} \Gamma_B + i(\Omega_B - \Omega) \right] Q + \frac{i\kappa_2}{A_{\text{eff},\omega_0}} A_p A_s^* + f, \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\frac{N_2}{\tau} + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA_c} [\sigma_a^s N - (\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2] (P_s + P_B) + \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA_c} [\sigma_a^p N - (\sigma_a^p + \sigma_e^p) N_2] P_p, \quad (5)$$

式中下标p、s、B分别表示抽运光、信号光和斯托克斯光。 $P$ 表示功率, $\alpha$ 表示光纤损耗系数, $\Gamma$ 表示重叠因子, $\sigma_a$ 和 $\sigma_e$ 分别表示吸收和发射截面, $A_s$ 、 $A_B$ 、 $Q$ 分别为信号光、斯托克斯光和声波场的归一化振幅, $N$ 为有效掺杂浓度, $N_2$ 为上能级粒子数, $v_{gp}$ 、 $v_{gs}$ 分别为抽运光和信号光的群速度, $\gamma_s$ 为信号光的非线性系数, $\kappa_{1s}$ 、 $\kappa_{1B}$ 、 $\kappa_2$ 为耦合系数, $\nu_A$ 为声速, $\Gamma_B$ 为声阻尼率, $\Omega_B$ 为声波频率, $\Omega$ 为可取频率值, $A_{\text{eff},\omega_0}$ 为声光有效作用面积, $h$ 为普朗克常数, $A_c$ 为纤芯截面积, $\tau$ 为镱粒子上能级平均寿命, $\lambda$ 为波长, $c$ 为真空中光速, $f$ 为自发引起SBS的热噪声源。 $f$ 满足以下关系<sup>[12-13]</sup>:

$$\langle f(z,t) \rangle = 0, \quad (6)$$

$$\langle f(z,t) f^*(z',t') \rangle = N_Q \delta(z-z') \delta(t-t'), \quad (7)$$

$$N_Q = \frac{2kT_0 \rho_0 \Gamma_B}{\nu_A^2 A_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

式中 $k$ 为玻尔兹曼常数, $T_0$ 为温度, $\rho_0$ 为光纤密度, $A_{\text{eff}}$ 为光纤有效模场面积。

## 2.2 仿真参数设置

仿真将 20 W 的种子光注入由 976 nm 的 LD 抽运的掺镱光纤激光放大器中, 光纤纤芯为 20  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 400  $\mu\text{m}$ 。放大器中增益光纤长度取 9 m, 后接 1 m 的传能光纤输出激光。表 1 给出了仿真中用到的参数值, 其中  $F_{\text{ao}}$  为声光有效重叠因子, 其与声光有效作用面积的关系为  $A_{\text{eff,ao}} = 1/F_{\text{ao}}^2$ 。

表 1 SBS 仿真参数设置

Table 1 SBS simulation parameter settings

	Value	Description		Value	Description
$\lambda_s$ /nm	1064.0	Signal wavelength	$\lambda_B$ /nm	1064.1	Stokes wavelength
$n_{\text{co,s}}$	1.4509	Core refractive index of signal	$n_{\text{cl,s}}$	1.4496	Clad refractive index of signal
$n_{\text{co,B}}$	1.4509	Core refractive index of Stokes	$n_{\text{cl,B}}$	1.4496	Clad refractive index of Stokes
$v_{\text{A,co}}$ /(m/s)	5904.3	Acoustic speed of core	$v_{\text{A,cl}}$ /(m/s)	5944	Acoustic speed of clad
$F_{\text{ao}}/10^4$	6.1197	Acousto-optic effective overlap factor	$A_{\text{eff}}/m^2$	$2.6543 \times 10^{-10}$	Effective mode area
$\Gamma_A \times 10^{-7}$	7	Acoustic impedance coefficient	$K/10^{-23}$	1.38	Boltzmann constant
$T_0$ /K	293K	Temperature	$\gamma_e$	0.902	Electrostrictive constant
$\rho_0$ /(kg/m <sup>3</sup> )	2210	Fiber density	$n_2$ /(m <sup>2</sup> /W)	$2.6 \times 10^{-20}$	Nonlinear-index coefficient
$T_b$ /ns	5	Phonon lifetime	$n_p$	1.415	Refractive index of pump
$\alpha_p$ /(dB/km)	2.1	Attenuation of pump	$\alpha_s$ /(dB/km)	15	Attenuation of signal
$\Gamma_p$	0.0025	Overlap factor of pump	$\Gamma_s$	1	Overlap factor of signal
$\beta$	1.5 dB (976 nm)	Absorption coefficient	$N/m^3$	$7.8189 \times 10^{25}$	Doping concentration of Yb <sup>3+</sup>

针对上述仿真参数, 利用 Matlab 计算软件, 对 2.1 所述光纤放大器 SBS 仿真方程进行仿真分析。仿真中采用了并行双向(PB)的时域有限差分法(FDTD)<sup>[4]</sup>, 通过中心差分法预测以及梯形矫正公式, 最终求得了光纤中不同时刻不同位置的信号光以及斯托克斯光功率。通过对计算所得数据的分析, 即可得到光纤激光放大器中的 SBS 阈值功率。仿真中, 在放大器出射端, 斯托克斯光的入射边界条件均设为  $A_B(L)=0$ 。

## 3 SBS 阈值仿真结果与分析

### 3.1 未施加调制时, 放大器 SBS 阈值分析

光纤激光放大器中光纤入射端斯托克斯光功率与光纤出射端信号光功率比  $R=1\%$  时的光纤出射端信号光功率为 SBS 阈值。在不同调制情况下, 通过调节输入抽运光的大小, 使得  $R$  的值趋近于 1%, 进而得到对应的 SBS 阈值。

在未施加任何调制时, 对放大器输入 20 W 的信号种子光, 在抽运功率为 58 W 时仿真得到了如图 2 所示的放大器输出时域图。从图中可以看出在种子激光注入约 18  $\mu\text{s}$  后放大器达到了稳定输出状态, 求得稳定输出后由光纤入射端输出的斯托克斯光平均功率为 0.765 W, 光纤出射端输出的信号光平均功率为 62.488 W, 两者的比值  $R=0.012$ , 与对放大器中 SBS 阈值的定义相吻合。由此可知, 无调制情况下(单频光输入)放大器的 SBS 阈值功率约为 62.488 W, 将此时的 SBS 阈值功率作为衡量不同调制方式影响 SBS 阈值提升能力的基准。

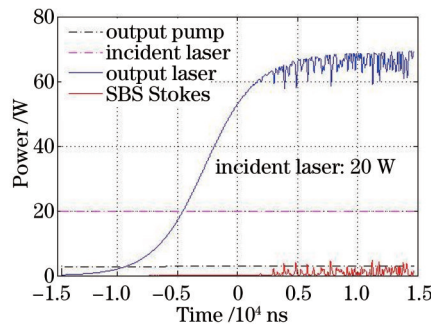


图 2 无调制时放大器输出时域特性

Fig.2 Output time-domain characteristics without modulation

### 3.2 施加调制时,放大器 SBS 阈值分析

对相位调制情况,经相位调制后种子信号光的归一化振幅为

$$A_s = \sqrt{P_s} \exp[i\delta \sin(\Delta\omega t)], \quad (9)$$

式中  $P_s=20$  W 为种子信号光功率,  $\delta = \pi E_M/V_\pi$  为调制幅度,其中  $E_M$  为调制信号电压,  $V_\pi$  为相位调制器的半波电压,仿真中根据实际实验条件取  $V_\pi=2.2$  V。  $\Delta\omega = 2\pi f_M$  为调制角频率,其中  $f_M$  为调制信号频率。

对强度调制情况,考虑将入射种子光调制成 100 个高斯形的脉冲序列进行计算。种子信号光的调制表达式为

$$A_s = \sum_{m=-50}^{50} \sqrt{P_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-mT}{\Delta T}\right)^2\right], \quad (10)$$

式中  $T$  为调制脉冲周期,  $\Delta T$  为调制脉宽。

对相位和强度同时调制情况,结合(9)、(10)式,得到调制后种子信号光的表达式如下

$$A_s = \sum_{m=-50}^{50} \sqrt{P_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-mT}{\Delta T}\right)^2\right] \exp[i\delta \sin(\Delta\omega t)]. \quad (11)$$

仿真得到了如图 3 和图 4 所示的放大器输出功率达到 SBS 阈值时的输出激光时域特性。图 3 为相位调制、强度调制分别作用于种子光后的输出激光时域特性;图 4 为相位、强度调制同时作用于种子光后的输出激光时域特性。

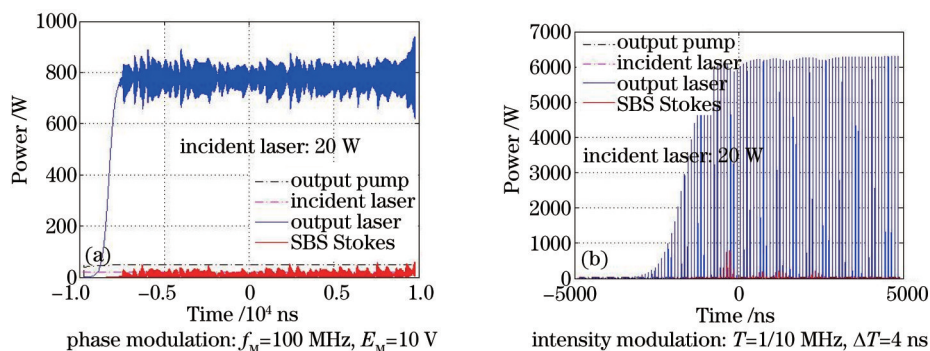


图 3 一种调制方式单独作用后的放大器输出时域特性

Fig.3 Output time-domain characteristics using one type of modulation

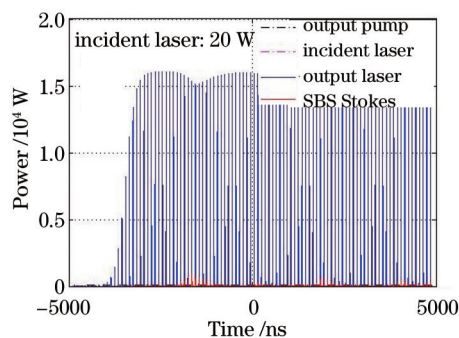


图 4 相位和强度同时调制后放大器输出时域特性 ( $f_M=100$  MHz,  $E_M=10$  V,  $T=1/10$  MHz,  $\Delta T=4$  ns)

Fig.4 Output time-domain characteristics using both phase and intensity modulation ( $f_M=100$  MHz,  $E_M=10$  V,  $T=1/10$  MHz,  $\Delta T=4$  ns)

通过对输出稳定后的各传输光功率求平均值并进行比较,得到了不同调制情况下放大器的 SBS 阈值。表 2 给出了对 20 W 入射种子光单独施加相位调制、强度调制以及两种调制方式同时施加后,放大器中 SBS 阈值的提升情况。

从表 2 中可以看出 3 种不同调制方式在 SBS 抑制能力上的差异。在相同调制参数设置下,对种子光相位和强度同时调制的 SBS 抑制效果最好。在相位调制参数为 100 MHz, 10 V, 强度调制参数为 10 MHz, 4 ns 的情况下, SBS 阈值可达 1127.4 W, 是单频光输入时 SBS 阈值的 18.0 倍。



表2 不同调制方式对光纤放大器SBS阈值的影响

Table 2 Effect of different modulations on SBS threshold for fiber amplifiers

Modulation method	Parameter	SBS threshold/W	Enhance multiple of SBS threshold
Phase	100 MHz, 10 V	770.98	12.3
Intensity	10 MHz, 4 ns	443.06	7.1
Phase+Intensity	100 MHz, 10 V+10 MHz, 4 ns	1127.4	18.0

由于强度调制是通过调制使得输出的脉冲激光宽度小于声子寿命( $T_b$ )来实现的SBS抑制,可以从根本上抑制SBS的产生,然而表2中的数据显示,相比于相位调制,其SBS抑制能力较弱。可能原因有两点:1)由于种子光经强度调制后成为脉冲激光,其输入激光的平均功率有较大幅度的降低,进而限制了放大器的输出功率;2)由于调制后的脉冲光在掺杂光纤传输过程中的峰值功率过高,使得SBS由峰值功率激发。

### 3.3 相位和强度同时调制提高放大器SBS阈值的分析

从光谱的角度对不同调制方式的SBS抑制能力进行简要分析。图5(a)给出了对种子光施加100 MHz, 10 V相位调制后的调制光谱图,图5(b)为对种子光施加10 MHz, 4 ns强度调制的调制光谱图。图6为100 MHz, 10 V的相位调制和10 MHz, 4 ns的强度调制同时作用时的调制光谱。

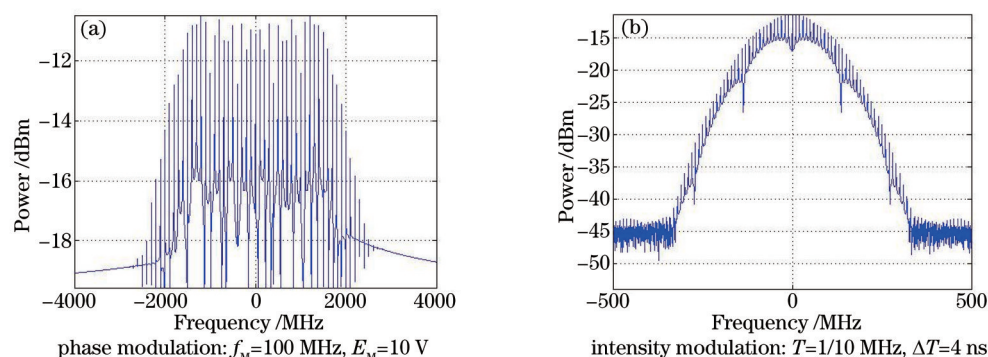


图5 调制光谱图

Fig.5 Modulation spectrum

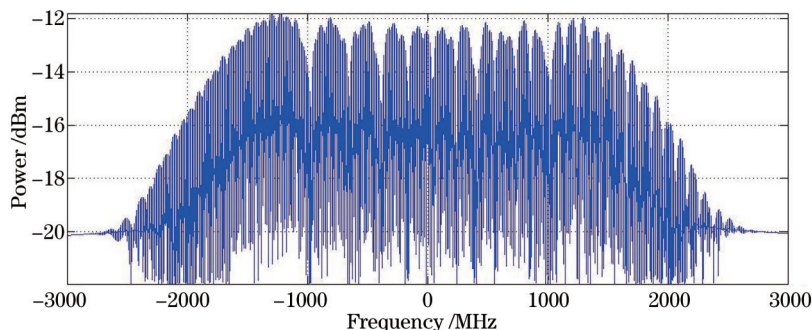


图6 两种调制同时作用时的光谱图( $f_M=100$  MHz,  $E_M=10$  V,  $T=1/10$  MHz,  $\Delta T=4$  ns)

Fig.6 Spectra under both phase and intensity modulation ( $f_M=100$  MHz,  $E_M=10$  V,  $T=1/10$  MHz,  $\Delta T=4$  ns)

对比图5和6可以看出,强度调制光谱的一个单频主峰上存在很多细密的小光谱线分隔,而两种调制同时作用后的调制光谱相当于对相位调制后光谱的每一条谱线进行扩展,其扩展的谱线特性与强度调制光谱线类似,从而实现了更多的光谱线分布,展宽了有效布里渊增益谱,较大幅度提升了SBS阈值。

对比图5(a)和图6,发现对种子光单独施加相位调制后的调制光谱宽度和相位、强度两种调制方式同时作用后的调制光谱宽度相同,谱宽均约为4 GHz。由此可见,相比于相位调制抑制SBS的方法,相位和强度同时调制抑制光纤放大器中SBS效应的方法可以在不进一步展宽种子激光谱线宽度的情况下,提高SBS阈值功率。以图5(a)和图6设置的调制参数为例,两种调制同时作用时的SBS阈值较单独施加相位调制时的SBS阈值提高了46.3%。

## 4 结 论

提出了一种抑制放大器中SBS的新方法,将相位调制和强度调制同时作用于输入种子激光,以此实现了对放大器中SBS的较好抑制。数值仿真结果显示,该方法可以在窄线宽输出情况下较大幅度提高放大器中的SBS阈值。对20 W的输入种子光同时施加100 MHz,10 V的相位调制和10 MHz,4 ns的强度调制,放大器(9 m掺镱光纤+1 m传能光纤)的SBS阈值达到了1127.4 W,可达到单频光SBS阈值的18.0倍。对种子相位和强度同时调制抑制光纤激光放大器SBS的方法可以在窄线宽情况下实现高SBS阈值功率输出,对抑制光纤激光放大器中的SBS具有指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited][J]. JOSA B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 Andrés M V, Cruz J L, Díez A, *et al.*. Actively Q-switched all-fiber lasers[J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(2): 93-99.
- 3 Bufetov I A, Dianov E M. Bi-doped fiber lasers[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(7): 487-504.
- 4 Yang Jianliang, Guo Zhaonan, Cha Kaide, *et al.*. Experimental study of phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV system[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(5): 439-442.  
杨建良,郭照南,查开德.调相法抑制光纤CATV中受激布里渊散射的实验研究[J].中国激光,2001,28(5):439-442.
- 5 Chen Wei, Meng Zhou. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0305002.  
陈伟,孟洲.相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响[J].中国激光,2011,38(3):0305002.
- 6 Hao Liyun, Qi Yunfeng, Su Cen, *et al.*. Influence of transmitting fiber length on SBS threshold of continuous-wave single-frequency all fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 814003.  
郝丽云,漆云凤,苏岑,等.传能光纤长度对连续波单频光纤放大器SBS阈值特性的影响[J].光学学报,2013,33(8):814003.
- 7 Zhang Lei, Cui Shuzhen, Liu Chi, *et al.*. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. Opt Express, 2013, 21(5): 5456-5462.
- 8 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. Narrow linewidth all-fiber laser with 666 W power output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1261-1262.  
王小林,周朴,肖虎,等.窄线宽全光纤激光器实现666 W高功率输出[J].强激光与粒子束,2012,24(6):1261-1262.
- 9 Su Rongtao. Coherent Amplified Array of Narrow-linewidth Nanosecond Fiber Lasers[D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2014: 46-48.  
粟荣涛.窄线宽纳秒脉冲光纤激光相干放大阵列[D].湖南:国防科学技术大学,2014:46-48.
- 10 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2005: 256-257.
- 11 Jenkins R B, Sova R M, Joseph R I. Steady-state noise analysis of spontaneous and stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 763-770.
- 12 Boyd R W, Rzaewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. Phys Rev A, 1990, 42(9): 5514-5521.
- 13 Mungan C E, Rogers S D, Satyan N, *et al.*. Time-dependent modeling of Brillouin scattering in optical fibers excited by a chirped diode laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(12): 1542-1546.
- 14 Hollenbeck D, Cantrell C D. Parallelizable, bidirectional method for simulating optical-signal propagation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(12): 2140-2149.

栏目编辑:宋梅梅