

相位调制法抑制高功率窄线宽光纤放大器中的受激布里渊散射

杜文博 王小林 韩凯 周朴* 许晓军 舒柏宏

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 相位调制单频激光产生多波长激光具有操作简单、成本低的特点,可有效抑制窄线宽光纤放大器中的受激布里渊散射(SBS)效应。理论研究了波长数目、波长成分相对强度与调制信号之间的关系,当调制频率较小时(如约 100 MHz),调制产生的多频激光可以有效提高 SBS 阈值。实验研究了调制频率为 100 MHz 的相位调制对高功率窄线宽光纤放大器中 SBS 的抑制效果。在放大器末端熔接 16 m 和 26.5 m 传能光纤的情况下,SBS 阈值输出功率分别为相应的未调制时的 2.5 倍和 3.7 倍。实验结果表明,利用相位调制可以有效抑制窄线宽光纤放大器中的 SBS 效应,且抑制效果与系统参数有关,未调制时的 SBS 阈值越低,效果越好。

关键词 光纤光学;受激布里渊散射抑制;相位调制;窄线宽;光纤放大器

中图分类号 TN248.1; O437.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1105009

Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in High Power Narrow-Linewidth Fiber Amplifier with Phase-Modulation

Du Wenbo Wang Xiaolin Han Kai Zhou Pu Xu Xiaojun Shu Bohong

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

Abstract Phase modulation of the single frequency laser to attain the multi-tone laser costs less and is easy to carry out. It has been proved to be an effective way to suppress stimulated Brillouin scattering (SBS) in narrow-linewidth fiber amplifiers. Relationships between modulation signals and constitutions of the modulated laser are studied theoretically. When the modulation frequency is small, for example 100 MHz, the multi-frequency laser can be attained and SBS threshold is effectively enhanced. Experimental researches are done to study effects of 100 MHz phase modulation on SBS mitigation of high power narrow linewidth fiber amplifiers. SBS threshold output powers are 2.5 times and 3.7 times of that of the corresponding unmodulated amplifiers with 16 and 26.5 m delivery fiber respectively. Experimental results show that SBS in narrow-linewidth fiber amplifiers can be effectively suppressed with phase modulation and the suppression effect depends on amplifiers' parameters. The lower the SBS threshold without modulation, the better the suppression effect.

Key words fiber optics; stimulated Brillouin scattering suppression; phase modulation; narrow-linewidth; fiber amplifier

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.3510; 190.5890

1 引言

近年来随着高功率半导体激光抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,高功率光纤激光器和放大

器的功率不断得到提升,单根光纤的连续输出功率已远逾千瓦^[1,2]。然而,受限于受激布里渊散射(SBS)效应,目前有报道的窄线宽光纤放大器的最

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-08-17

作者简介: 杜文博(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: duwenbomtn@163.com

导师简介: 舒柏宏(1960—),男,教授,硕士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: shu_bh@tom.com

* 通信联系人。zhoupu203@163.com

高输出功率仅为 511 W^[3]。虽然可以利用光纤激光相干合成进一步提升窄线宽激光的功率,但受目前合成控制技术的限制,相干合成的合成路数有限^[4],实现功率的提升仍要基于单路激光功率的大幅度提高。因此,抑制 SBS 已成为高功率窄线宽光纤激光功率进一步提升的关键^[5~8]。

近年来,利用多波长放大抑制 SBS 的方法被提出并得到了理论模拟和实验验证^[9~18]。该方法通过在光纤放大器中同时放大不同波长的激光来实现对 SBS 的抑制,与当前的全光纤激光放大器结构具有很好的兼容性。产生多波长激光的常见方法主要有:1)通过波分复用器(WDM)将多个单频激光器进行合束^[12~18];2)基于 Sagnac 环多波长激光器^[19];3)基于 SBS 效应的多波长激光器^[20];4)基于单频激光相位调制^[21~23]。其中基于单频激光相位调制产生多波长激光的方法操作简单而且成本也较低,具有较高的应用价值。Korotky 等^[24]就相位调制产生多频激光抑制光纤中 SBS 的方法申请了专利。Zeringue 等^[25]建立了相位调制抑制 SBS 的基于时间的模型,但这一模型中没有考虑激光增益和四波混频(FWM)现象的产生。总的来说,目前相位调制抑制光纤 SBS 的研究主要针对 1550 nm 通信激光波段且功率为数十到数百毫瓦量级^[22,23,26~28]。

本文对基于单频激光相位调制产生多波长激光的方法进行理论研究,并实验研究相位调制产生的多频激光对主振荡功率放大(MOPA)结构高功率光纤放大器中 SBS 效应的抑制。实验中通过改变传能光纤的长度对比研究相位调制在光纤放大器参数不同(SBS 阈值不同)时的 SBS 抑制效果。

2 理论分析

电光相位调制器上一般来说可以加载各种形式的电信号,但这些调制信号都可以看成是无穷多个正弦信号和余弦信号的叠加,因此对单频激光相位调制的研究最基本的就是对正弦(余弦)信号相位调制的研究。本文主要对单频激光基于正弦信号相位调制的情形进行理论研究。

假设单频激光的电场强度为

$$E = E_c \exp[j(\omega_c t + \phi_c)], \quad (1)$$

对其施加正弦相位调制信号

$$a(t) = A_m \sin(\omega_m t + \phi_0), \quad (2)$$

式中 A_m , ω_m 和 ϕ_0 分别为调制信号的幅度、角频率和相位。

调制后的输出光场为

$$E_m = E_c \exp\{j[\omega_c t + \phi_c + kA_m \sin(\omega_m t + \phi_0)]\} = E_c \exp\{j[\omega_c t + \phi_c + m \sin(\omega_m t + \phi_0)]\}, \quad (3)$$

式中 $k = \pi/V_\pi$ 为取决于相位调制器半波电压 V_π 的调制比例系数, m 为调制系数。

对(3)式进行傅里叶级数展开,则有

$$E_m = E_c \exp[j(\omega_c t + \phi_c)] \sum_{n_k=-\infty}^{+\infty} C_{n_k} \exp[jn_k(\omega_m t)] = E_c \sum_{n_k=-\infty}^{+\infty} C_{n_k} \exp\{j[(\omega_c + n_k\omega_m)t + \phi_c]\}, \quad (4)$$

$$C_{n_k} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{j[(m \sin(x + \phi_m) - n_k x)]\} dx, \quad (5)$$

$$n_k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

由(4)式可知,单频激光经过施加了正弦电信号的相位调制器后输出激光为多波长激光,各激光成分角频率为 $\omega_c + n_k\omega_m$, 频率间隔为 $\omega_m/2\pi$ 的整数倍,各波长成分的电场大小由(5)式所表示的函数决定,与调制信号的幅度和相位都有关。对(5)式的求解可以利用有限元积分法实现,进而可以仿真出单频激光经相位调制后的波长构成(各组分波长的大小和相对强度大小)。

对 100 MHz 正弦信号相位调制 1064.4 nm 单频激光的情形进行数值模拟。模拟用相位调制器在施加 100 MHz 正弦调制信号时半波电压为 1.75 V。对单频激光施加不同幅度、不同相位的正弦信号相位调制后得到的典型模拟结果如图 1 所示,单频激光经相位调制后出现了以其为中心的边频成分,边频成分的数目和各组分相对强度与加载的调制信号的幅度和相位有关,一般来说,边频成分的数目随着调制信号幅度的增加也会增加,且随调制信号相位变化呈现周期性变化。

由于调制信号频率为 100 MHz,这时各边频成分的波长间隔很小(为 10^{-4} nm 量级),此时调制得到的多波长激光实际上可以视为一单波长多频激光,可以认为相位调制起到了展宽单频激光谱线宽度的作用。但需要说明的是,随着调制频率的增加,调制后的激光波长成分将出现明显的波长差异,将成为严格意义上的多波长激光,对此类多波长激光中波长间隔大于 2 倍布里渊频移对应波长变化大小(约为 0.06 nm)时 SBS 的抑制,文献[9~17]中有所研究,本文中不予考虑。

关于光纤中 SBS 阈值的简单估算,根据文献[29]中的公式可以表示为

$$P_{th} \approx 21 \frac{A_c K}{g_B L_e} \left(1 + \frac{\Delta V_S}{\Delta V_B}\right), \quad (6)$$

式中 A_e 和 L_e 分别为光纤的有效面积和有效长度； g_B 为布里渊峰值增益； K 为偏振因子，在偏振完全混乱时取值为 2； ΔV_S 和 ΔV_B 分别为激光线宽和布里渊增益带宽。由(6)式分析知，增加激光线宽 ΔV_S

可以有效提高 SBS 阈值，故而通过相位调制展宽单频激光线宽以抑制 SBS 的方法从理论上分析是有效可行的。

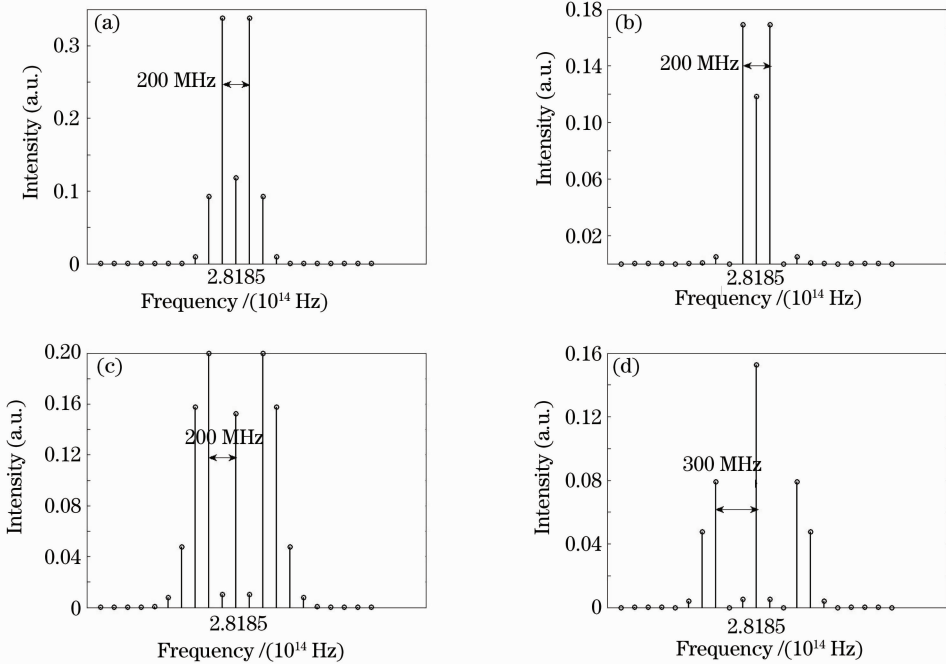


图 1 单频激光经不同幅度、不同相位正弦信号相位调制的模拟结果。(a) $V=1\text{ V}$, $\phi_0=0$ ；
(b) $V=1\text{ V}$, $\phi_0=\pi/4$ ；(c) $V=2\text{ V}$, $\phi_0=0$ ；(d) $V=2\text{ V}$, $\phi_0=\pi/4$

Fig. 1 Simulating results of phase modulation of the single frequency laser with sinusoidal signal of different amplitudes and phases. (a) $V=1\text{ V}$, $\phi_0=0$ ；(b) $V=1\text{ V}$, $\phi_0=\pi/4$ ；(c) $V=2\text{ V}$, $\phi_0=0$ ；(d) $V=2\text{ V}$, $\phi_0=\pi/4$

3 实验结果与分析

在理论分析的基础上，进行基于单频激光相位调制产生的多波长激光抑制高功率光纤放大器中 SBS 效应的实验，实验装置如图 2 所示。单频种子激光经过相位调制器后产生的多波长激光由初级放大器进行预放大，预放大后的激光进入主放大器进行功率放大。单频种子激光器是 NP Photonics 公

司的商用单频激光器，最大输出功率为 40 mW。相位调制器为法国 Photoline 公司的 LiNbO₃ 波导结构电光相位调制器。调制所需的正弦电信号由任意波形信号发生器 (AFG) 产生，经由放大器放大到合适的幅度后施加于相位调制器。主放大器采用长度为 11.5 m 的 5/130 (纤芯直径 5 μm，内包层直径 130 μm) 双包层掺镱光纤 (YDF)。两个抽运激光器

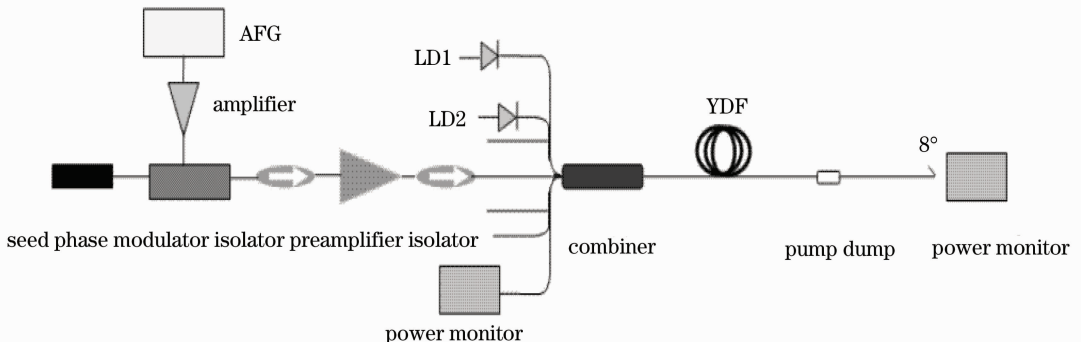


图 2 相位调制抑制光纤放大器 SBS 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of SBS suppression with phase modulation in fiber amplifier

工作波长均为 976 nm, 经由 $(6+1) \times 1$ 光纤合束器对预放种子光进行抽运, 实现功率放大。利用合束器剩余的抽运耦合端进行主放大器回光功率和光谱监测。主放大器后接传能光纤, 且传能光纤的输出端面斜切成 8° 以防止寄生振荡。在掺杂光纤和传能光纤的熔接区域进行抽运倾泄。

实验中用频率 100 MHz、振幅 2 V、相位为 0 的正弦电信号对单频种子光进行相位调制。图 3 所示

为利用法布里-珀罗干涉仪获取调制前后种子光的频谱图, 单频种子光经调制后出现了 7 个较为明显的频率峰值, 也即调制后产生了具有 7 个波长的多波长种子激光, 这与图 1(c) 中的模拟结果是相符合的。加大抽运功率的同时对传能光纤末端的输出功率和主放大器的回光功率进行记录, 当回光功率随着输出功率的增加呈现非线性急剧增长时则认为达到了 SBS 阈值。

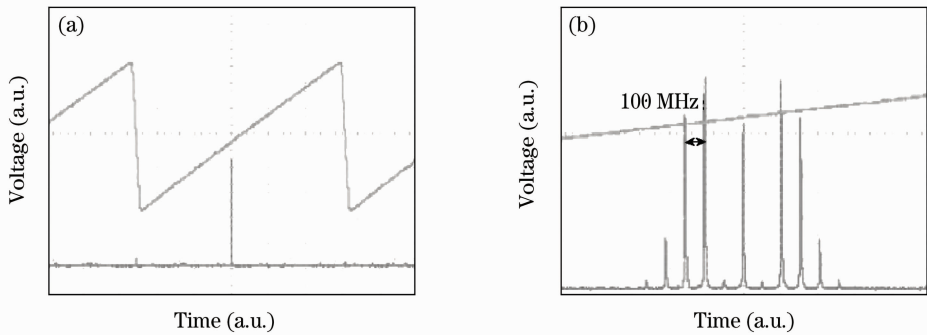


图 3 单频激光调制前后波长组成。(a)调制前;(b)调制后

Fig. 3 Wavelength constitution of single frequency laser before (a) and after (b) modulation

图 4(a) 为未加调制时达到 SBS 阈值时的后向光谱图, 能够观察到明显的 SBS。图 4(b) 为相同的抽运电流下, 施加调制后的后向光谱图, SBS 较未调制时得到了约 15 dB 的有效抑制。对比调制前后的光谱图还可以发现调制后瑞利光谱峰值频率对应的波长增加了约 0.02 nm, 究其原因, 主要是由于实验中所用种子激光器的中心波长不是完全稳定的, 它会在标称的中心波长附近产生随机的微小偏移, 故而使得不同时刻的瑞利峰值频率会有微小的随机频移, 这一结果的产生与相位调制无关。图 5 是传能光纤长度为 16 m 时的实验结果, 未加调制时放大器的 SBS 阈值输出功率约为 2.8 W, 加调制后 SBS 阈值输出功率提高约为 7 W, 为未加调制时的 2.5

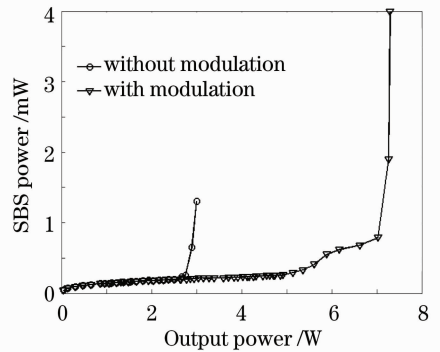


图 5 传能光纤 16 m 时 SBS 功率与放大器输出功率的关系

Fig. 5 SBS power versus output power of the amplifier with 16 m delivery fiber

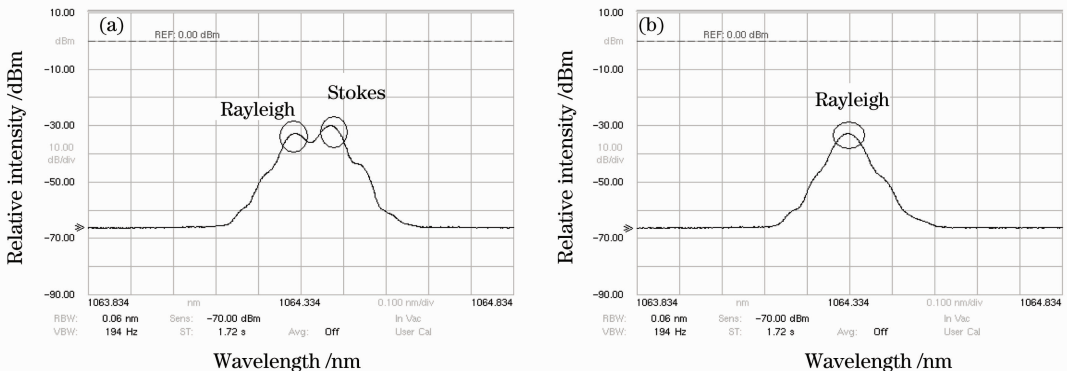


图 4 相位调制前后的后向光谱图。(a)未调制;(b)调制后

Fig. 4 Backward spectrum before (a) and after (b) phase modulation

倍。图 6 为传能光纤长度为 26.5 m 时的实验结果，未加调制时放大器的阈值输出功率约为 1.2 W，加调制后阈值输出功率提高约为 4.4 W，为未加调制时的 3.7 倍。在两种不同长度的传能光纤下，施加调制后阈值输出功率都得到了提高。将图 5 与图 6 中的结果进行对比，无论在调制或者未调制情况下，随着传能光纤长度的增加，放大器阈值输出功率都将变小，这与增加传能光纤长度会降低光纤激光器 SBS 阈值的经典理论是相符合的^[30]。在 26.5 m 传能光纤长度下取得了比 16 m 传能光纤时更好的抑制效果，这说明相位调制法抑制 SBS 的效果与光纤放大器系统的参数有关，未调制时的 SBS 阈值越低，效果越好。

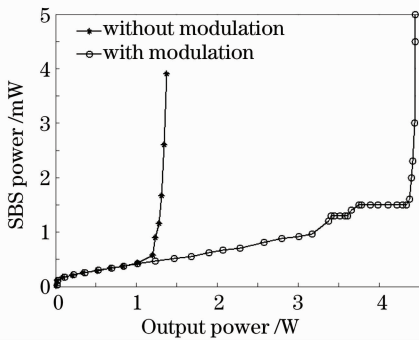


图 6 传能光纤 26.5 m 时 SBS 功率与放大器输出功率的关系

Fig. 6 SBS power versus output power of the amplifier with 26.5 m delivery fiber

4 结 论

理论研究了正弦信号相位调制单频激光产生多波长激光的原理，明确了波长数目、组分波长大小和相对强度与调制信号的关系，研究发现多波长激光的构成与调制信号的频率、幅度和相位都紧密相关，当相位调制信号频率较小(如为 100 MHz)时，调制后得到的多波长激光可以视为一单波长多频激光，相位调制起到了展宽激光线宽的作用，根据光纤中 SBS 阈值的经典理论分析，此时相位调制法可以提高光纤中的 SBS 阈值；进行高功率窄线宽光纤放大器实验，对单频激光施加相位调制后能够有效抑制 SBS，大幅度提高放大器阈值输出功率。实验中发现，SBS 抑制效果与光纤放大器系统参数有关，未调制时的 SBS 阈值越低，效果越好。对相位调制法的研究为更高功率的窄线宽光纤放大器 SBS 的抑制探索了可行的道路。

参 考 文 献

1 V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov *et al.*. 3 kW Yb fiber

- lasers with a single-mode output[C]. St. Petersburg: Symp. High-Power Fiber Lasers Appl., 2006
- 2 D. Gapontsev. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format[C]. Albuquerque: Solid State and Diode Laser Technology Review, 2008, 258
- 3 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 4 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009, 12~14
- 周 朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009. 12~14
- 5 Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinear management in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 27~33
- 廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(6): 27~33
- 6 Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency Raman fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 冷进勇, 吴武明, 陈胜平等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 7 Leng Jinyong, Liu Chi, Guo Shaofeng *et al.*. Influence of temperature distribution on stimulated Brillouin scattering in high power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2491~2496
- 冷进勇, 刘 驰, 郭少锋等. 高功率单频光纤放大器中温度分布对受激布里渊散射的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2491~2496
- 8 Liu Chi, Leng Jinyang, Qi Yunfeng *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency, single-mode, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502001
- 刘 驰, 冷进勇, 漆云凤等. 单频保偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502001
- 9 I. Dajani, C. Zeringue, T. J. Bronder *et al.*. A theoretical treatment of two approaches to SBS mitigation with two-tone amplification[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14233~14247
- 10 I. Dajani, C. Zeringue, T. M. Shay. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 406~414
- 11 P. Weßels, P. Adel, M. Auerbach *et al.*. Novel suppression scheme for Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4443~4448
- 12 I. Dajani, C. Zeringue, C. Lu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering suppression through laser gain competition: scalability to high power[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3114~3116
- 13 C. Lu, I. Dajani, C. Zeringue *et al.*. SBS suppression through seeding with narrow-linewidth and broadband signals: experimental results[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75802L
- 14 L. J. Henry, T. M. Shay, D. Hult *et al.*. Enhancement of output power from narrow linewidth amplifiers via two tone effect-high power experimental results[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 23939~23947
- 15 L. J. Henry, T. M. Shay, D. Hult *et al.*. A novel method of increasing the efficiency of 1064 nm two tone amplifiers through heating of the gain fiber[C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 79140A
- 16 C. Zeringue, C. Vergien, I. Dajani. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 618~620
- 17 Xiaolin Wang, Jingyong Leng, Hu Xiao *et al.*. Simultaneous spectrum and coherent combining by active phasing dual two-tone

- all-fiber MOPA chains [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1338~1340
- 18 Xiaolin Wang, Jingyong Leng, Pu Zhou *et al.*. Phase locking of a 275 W high power all-fiber amplifier seeded by two categories of multi-tone lasers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(8): 7312~7324
- 19 Lü Fuyun, Dong Fajie, Xie Chunxia *et al.*. Room temperature multiwavelength erbium-doped fiber laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(6): 654~656
吕福云, 董法杰, 谢春霞等. 室温下稳定工作的多波长掺铒光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(6): 654~656
- 20 Chen Hongwei. Research of High Power All Fiber Narrow-Linewidth Laser and Supercontinuum Source [D]. Changsha: National University of Defence and Technology, 2010. 21~23
谌鸿伟. 高功率全光纤窄线宽激光器和超连续谱光源研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010. 21~23
- 21 Yongkang Dong, Zhiwei Lu, Qiang Li *et al.*. Broadband Brillouin slow light based on multifrequency phase modulation in optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(12): C109~C115
- 22 Yingfan Liu, Zhiwei Lü, Yongkang Dong *et al.*. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multifrequency phase modulation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 29~31
- 23 Chen Wei, Meng Zhou. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[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
- 24 S. K. Korotky, T. River, N. J. Multifrequency Lightwave Source Using Phase Modulation for Suppressing Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers [P]. U. S. Patent. No. 5, 566,381, Oct. 15,1996
- 25 C. M. Zeringue, I. Dajani, G. T. Moore. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers through phase-modulation; a time dependent model[C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 791409
- 26 F. W. Willems, W. Muys, J. S. Leong. Simultaneous suppression of stimulated Brillouin scattering and interferometric noise in externally modulated lightwave AM-SCM systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1476~1478
- 27 Yang Jianliang, Zha Kaide. Two signal phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8): 724~728
杨建良, 查开德. 光纤 AM-CATV 外调制传输系统中双频调制抑制 SBS 的理论分析[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 724~728
- 28 Yang Jianliang, Guo Zhaonan, Zha Kaide. Experimental study of phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 439~442
杨建良, 郭照男, 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, **A28**(5): 439~442
- 29 T. Shimizu, K. Nakajima, K. Shiraki *et al.*. Evaluation methods and requirements for the stimulated Brillouin scattering threshold in a single-mode fiber[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2008, **14**(1): 10~15
- 30 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2489~2494

栏目编辑:谢婧