

文章编号: 0258-7025(2010)10-2477-05

基于受激布里渊散射效应的 4.5 W 全光纤 窄线宽双波长激光器

湛鸿伟 王小林 杨春波 周 朴 冷进勇 陈胜平 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 制作了一个基于受激布里渊散射效应的全光纤结构窄线宽双波长激光器,其波长间隔为 0.06 nm,输出功率为 4.5 W,光-电转换效率为 50%。对它的光谱特性、功率输出特性和相干性与单波长窄线宽光纤激光器进行对比研究表明,该双波长光纤激光器具有和单波长光纤激光器类似的功率输出特性,窄线宽双波长光纤激光器同样具有较好的相干性。在最大功率输出时,远场干涉条纹对比度达到 80%。该窄线宽双波长光纤激光器可用于光束相干合成。

关键词 激光器;相干合成;窄线宽;双波长;受激布里渊散射;光纤激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2477

4.5 W All-Fiber Narrow-Linewidth Two-Tone Fiber Laser Based on Stimulated Brillouin Scattering

Chen Hongwei Wang Xiaolin Yang Chunbo Zhou Pu Leng Jinyong
Chen Shengping Hou Jing

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

Abstract A 4.5 W all-fiber narrow-linewidth two-tone laser based on stimulated Brillouin scattering is established. The wavelength separation of two-tone laser is 0.06 nm. The output power is 4.5 W and the optical conversion efficiency is 50%. Spectral properties, output power properties and coherence of the laser are compared with single-tone fiber laser experimentally. Experiment results indicate that the narrow-linewidth two-tone fiber laser has the similar output power properties with the single-tone fiber laser. The visibility of the far-field interference pattern reaches 80%, when the two-tone fiber laser is at the max output power. The narrow-linewidth two-tone fiber laser can be used for coherent beam combination.

Key words lasers; coherent beam combination; narrow-linewidth; two-tone; stimulated Brillouin scattering; fiber laser

1 引 言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、体积小、结构简单、散热特性和操作方便等优点,非常

适合用于构建相干合成阵列,基于光纤激光器的相干合成已成为激光技术领域的一个研究热点^[1~3]。目前,已实现的最高功率和最多光束数目相干合成

收稿日期: 2010-04-16; **收到修改稿日期**: 2010-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(10904173)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)和中国博士后科学基金资助课题。

作者简介: 湛鸿伟(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: gfkchen@126.com

导师简介: 侯 静(1975—),女,副教授,硕士生导师,主要从事光纤激光器、光子晶体光纤和光纤激光相干合成等方面的研究。E-mail: houjing25@sina.com

都是采用基于主振荡-功率放大(MOPA)结构的主动相位控制方案^[4,5]。但是,基于 MOPA 结构的主动相干合成技术通常要求使用单频激光进行合成^[6]。光纤激光器,尤其是单频光纤激光器的功率提升受到受激布里渊散射(SBS)等非线性效应的严重制约。研究人员采取各种抑制 SBS 的措施来提升单频光纤激光器的输出功率,但目前报道的单频光纤激光器单纤最高输出功率只有 600 W^[7]。Dawson 等^[8]从理论上预测,单频光纤激光的极限输出功率约为 1.86 kW。

2009 年, P. Zhou 等^[9]报道了三路窄线宽双波长激光高效率相干合成的实验结果。窄线宽双波长激光可实现相干合成,这为相干合成技术提供了一种全新的认识。有研究表明,多波长成分可以抑制高功率窄线宽光纤激光器中的 SBS,提高其极限输出功率^[10~13]。按照这个理论,如果采用窄线宽多波长光纤激光进行相干合成,则可在不外加 SBS 抑制技术的情况下进一步提升光纤激光相干合成阵列的输出功率。这对于高功率光纤激光相干合成技术的实际应用具有重要意义。基于此,有必要对多波长光纤激光器的特性进行研究,寻求适合于相干合成的多波长激光器。

根据文献报道,有许多方法可以实现多波长光纤激光输出^[14],但大部分都不是窄线宽激光。基于受激布里渊散射效应的多波长光纤激光器具有结构简单、波长间隔稳定、线宽极窄、功率稳定的特点,因而备受关注^[15]。目前,对基于受激布里渊散射效应的多波长光纤激光器的研究主要集中在光纤通信和传感领域,所涉及功率较低,对其在高功率条件下的输出特性尚还没有人进行专门研究。本文实验搭建了一个基于受激布里渊散射效应的窄线宽双波长光纤激光器,输出功率达到 4.5 W,并对它的光谱特性、功率输出特性和相干性与单波长窄线宽光纤激光器进行了对比研究,验证其用于相干合成的可行性。

2 基本原理

SBS 过程可以经典地描述为抽运光和散射光(斯托克斯光)通过声波进行的非线性相互作用^[16],抽运光通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率的周期性调制,形成折射率光栅,通过布拉格衍射散射抽运光。散射光因抽运光与声场间的散射而获得增益,散射过程也使得声场增强,从而形成正反馈过程,散射光可获得指数型增益。一般情况下,SBS 散射光传播方向与入射光相反,其频率低于抽运光,所

以 SBS 是一种后向的斯托克斯散射。

2.1 SBS 频移

从量子力学观点来看,SBS 过程是湮灭一个入射光子,同时产生一个散射光子和一个感应声子^[17]。其能量和动量满足关系

$$\omega_p = \omega_s + \omega_A, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_A, \quad (2)$$

式中 $\omega_p, \omega_s, \omega_A$ 分别表示抽运光子、散射光子和感应产生的声子的频率; $\mathbf{k}_p, \mathbf{k}_s, \mathbf{k}_A$ 分别为 3 种波量子的波矢。在布里渊散射中,由于声子频率远小于光子频率,即 $\omega_p(\omega_s) \gg \omega_A$,故可认为 $\omega_p \approx \omega_s, \mathbf{k}_p \approx \mathbf{k}_s$, 此时有

$$\omega_A = 2\omega_p \frac{nv_A}{c} \sin(\theta/2), \quad (3)$$

式中 n 为介质折射率, v_A 为介质中的声速, c 为真空中的光速, θ 为抽运光和斯托克斯光之间的夹角。(3) 式表明斯托克斯光的频移与散射角有关,在后向($\theta = \pi$) 时有最大值,在前向($\theta = 0$) 时为零。因此,在单模光纤中,SBS 仅发生在后向,且后向布里渊频移为

$$\nu_A = \nu_p - \nu_s = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\nu_A}{\lambda_p}. \quad (4)$$

以石英光纤在 1064 nm 波段为例,取 $v_A = 5.96$ km/s, $n=1.46$,代入(4)式,可得最大布里渊频移 $\nu_A \approx 16.36$ GHz。

2.2 SBS 阈值

SBS 阈值功率满足关系^[18]

$$P_{th} \approx 21 \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_g} \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (5)$$

式中 g_B 为 SBS 增益系数, A_{eff} 为有效纤芯面积, L_{eff} 为有效作用长度, $\Delta\nu_g$ 为有效信号带宽, $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽。为了有效激发 SBS,布里渊激光器用窄线宽激光作为布里渊抽运源,用较长光纤或者构成环形腔结构来增加有效长度。当布里渊抽运功率超过 SBS 阈值后,产生一阶 SBS 斯托克斯光,当一阶 SBS 斯托克斯光功率足够强时,会激发高阶的斯托克斯光。但各阶斯托克斯光之间的光频差为布里渊频移的整数倍。另外,由于布里渊增益带宽低于 100 MHz,所以基于布里渊散射效应的多波长激光为窄线宽激光^[16]。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,窄线宽双波长激光器采用改进的三级级联 MOPA 结构。一个自行搭建的线宽

小于 30 kHz 的环形腔单频光纤激光器输出激光经过 3 dB 耦合器 C1 分成两束, 分别从 b 端和 d 端输出。b 端输出单频激光作为布里渊抽运源抽运 10 km 单模 (SM) 光纤, 产生的 SBS 斯托克斯光从 C1 耦合器的 c 端输出, 残余的前向抽运光从 10 km 单模光纤的 e 端输出。c 端和 d 端输出的激光再经过 3 dB 耦合器 C2, 从 f 端输出, 作为种子激光。两个可调衰减器 K1 和 K2 可对不同波长激光的功率比例进行调节, 从而得到单波长或双波长种子激光。之后, 种子光进入到由

单模掺镱光纤 (YDF) 构成的放大器进行预放大。最后, 信号光进入主放大级进行功率放大。主放大级的增益光纤采用纤芯/内包层分别为 $15\ \mu\text{m}/130\ \mu\text{m}$ 的大模场双包层掺镱光纤, 长度为 5 m。通过一个 $(2+1)\times 1$ 光纤合束器 (TFB) 进行信号光和抽运光耦合, 抽运耦合效率大于 90%。抽运源是一带多模尾纤耦合输出, 最大输出功率 9 W 的 975 nm 激光二极管 (LD)。放大激光进行抽运倾泄处理 (pump dump), 经一个光纤隔离器输出。

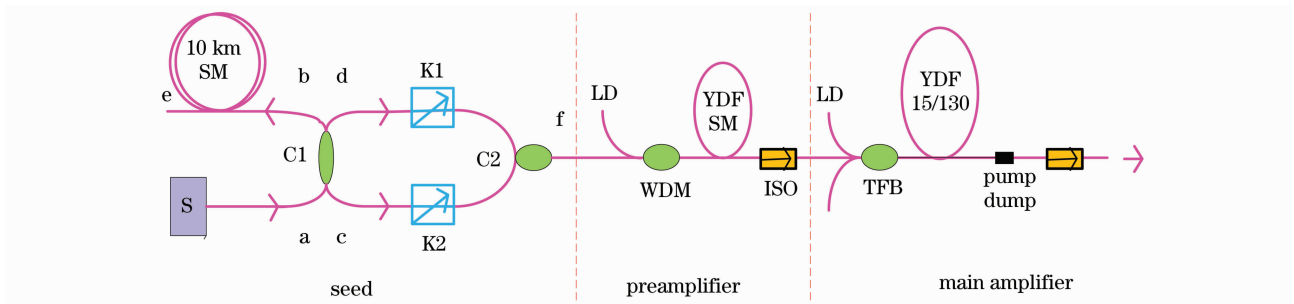


图 1 全光纤窄线宽双波长激光器实验结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of the all-fiber narrow-linewidth two-tone fiber laser

4 实验结果和分析

实验中所用单频光纤激光器输出功率大约 200 mW, 在 e 端测得的前向功率和 c 端测得的后向功率随 b 端抽运功率的变化曲线如图 2 所示。随着抽运功率的增加, 前向功率逐渐增大, 增大到 1.2 mW 后, 前向功率在此值附近波动, 不再随抽运功率变化。后向光功率在抽运初期几乎没有什么变化, 当抽运功率超过 6.4 mW 时, 后向功率开始激增。实验现象与理论上 SBS 产生过程一致, 前向功率稳定在 1.2 mW 附近, 是由于抽运功率超过 SBS 阈值之后, 抽运光开始转换成后向斯托克斯光, 并最终形成限幅效应。后向功率一开始没有显著变化是因为抽运功率还没有达到 SBS 阈值 (大约为 6.4 mW),

当抽运功率超过阈值之后, SBS 开始发生, 后向功率激增。

当布里渊抽运功率最大时, 在 c 端获得了 34.9 mW 的 SBS 斯托克斯光, d 端输出单频种子光为 90 mW。按照图 1 所示, 搭建完成双波长激光器种子源。调节可调衰减器 K1 和 K2, 把每个波长的激光按照 1:1 的比例, 各取 8 mW, 得到 16 mW 的双波长种子激光。种子光进入两级级联放大器进行功率放大, 得到 4.5 W 双波长激光输出。

为了更好地研究该窄线宽双波长光纤激光器的输出特性, 通过衰减调节进行了布里渊抽运光波长, SBS 斯托克斯光波长和光功率比例为 1:1 的双波长三种情形的窄线宽光纤激光器光谱特性、功率输出特性和相干性的对比实验。

4.1 光谱特性

图 3(a) 和 (b) 为当布里渊抽运功率最大时, 测量 d 端单频抽运光和 c 端 SBS 斯托克斯光所得光谱, 中心波长分别为 1064.03 nm 和 1064.09 nm。当布里渊抽运光或一阶斯托克斯光进行单波长放大后光谱没有发生变化, 可以看出 SBS 斯托克斯光中心波长较抽运光偏移了 0.06 nm, 频移量大约为 16 GHz, 与理论计算的布里渊频移值相符, 这也说明单频激光抽运 10 km 单模光纤确实产生了 SBS 效应。由于光谱仪分辨率的限制, 所测光谱并不能

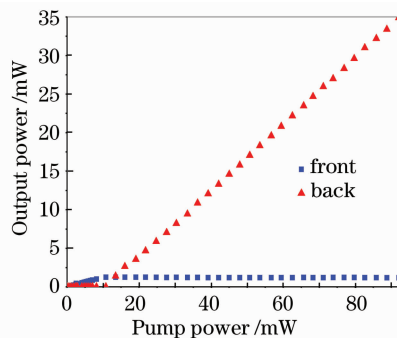


图 2 后向功率和前向功率随抽运光功率的变化

Fig. 2 Front power and back power versus pump power

反映真实窄线宽激光谱宽,但测量所得的中心波长数值是可信的。c 端光谱显示只有一个斯托克斯峰,说明只产生了一阶 SBS 效应,因此经过 C2 耦合器的激光只有布里渊抽运光和抽运产生的一阶斯托克斯光两个波长成分。图 3(c)和(d)为两个波长功

率比例为 1:1 的双波长种子光放大前后的光谱。受光谱仪分辨率的限制,光谱图中双波长激光的两个波长基底混在一起,但两个光谱峰还是可以明显地分辨出来。所以该激光器确实为窄线宽双波长激光器。

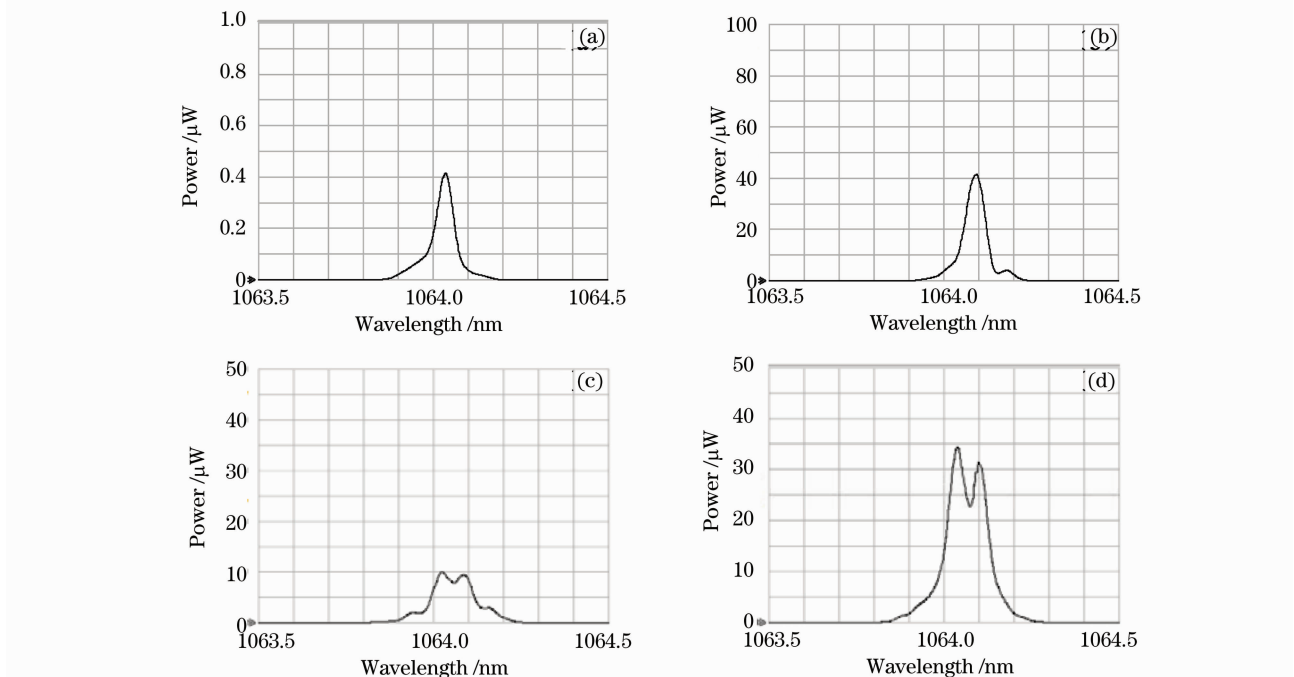


图 3 光谱对比图。(a)抽运波长光谱,(b)斯托克斯波长光谱,(c)和(d)分别为双波长激光放大前后的光谱
Fig. 3 Comparison of spectrums. (a) pump source, (b) Stocks light, (c) two-tone laser before amplifying, (d) amplified two-tone laser

4.2 功率输出特性

由于结构限制,单波长种子光功率值达不到双波长种子光的功率值,因此调节预放大级使三种情形下预放大级输出功率相同(均为 76 mW),从而保证主放大级的功率输出具有可对比性。抽运波长、斯托克斯光波长和双波长三种情形下主放大级分别得到 4.5, 4.5 和 4.49 W 的功率输出,光-光转换效

率分别为 51%, 50% 和 50%。图 4 为三种情形下主放大级输出功率特性曲线。从图 4 可以看出,双波长光纤激光器功率特性曲线与单一波长光纤激光器的功率特性曲线基本平行。说明该窄线宽双波长光纤激光器具有和单波长光纤激光器类似的功率输出特性。双波长激光器进行功率放大时,不会因为波长成分的增加而影响功率输出。

4.3 相干性

光纤激光器的相干性可通过查看激光远场干涉图样的条纹对比度进行判断。激光远场干涉图样是利用一个 3 dB 光纤耦合器把被测激光分成两束,经过准直、平行后,用一会聚透镜聚焦,用光斑仪观察焦点处光场分布获得的。图 5(a)和(b)分别为布里渊抽运波长和斯托克斯光波长两种情形下主放大器输出激光的远场干涉图样,图 5(c)和(d)分别是双波长光纤激光在功率为 16 mW 和 4.5 W 时的远场干涉图样。从图 5 可以看出,单一波长激光器的条纹对比度在 86% 以上,而双波长激光的条纹对比度达到 80% 左右,并且功率放大对条纹对比度影响不

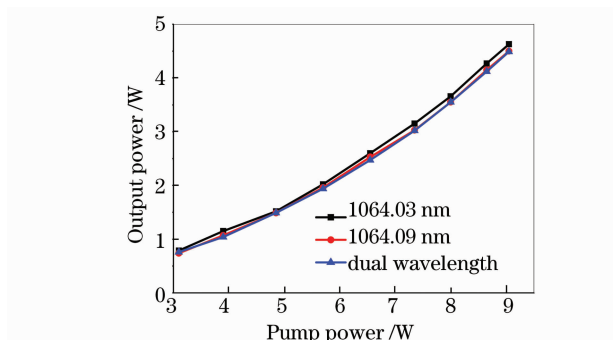


图 4 不同情形下主放大级输出功率随抽运功率的变化
Fig. 4 Output power of main amplifier versus pump power in different conditions

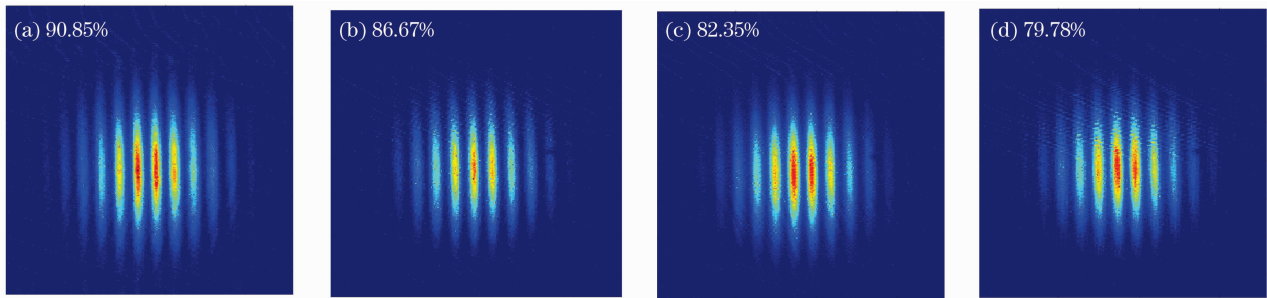


图 5 远场干涉图样对比图。(a)抽运波长激光图样,(b)斯托克斯光波长激光图样,(c)和(d)分别是双波长激光功率为 16 mW 和 4.5 W 时的图样

Fig. 5 Far field interference pattern. (a) pump source, (b) Stocks light, (c) two-tone laser at 16 mW, (d) two-tone laser at 4.5 W

大。说明该窄线宽双波长光纤激光器同样具有较好的相干性。

通过以上对比实验,可认为基于受激布里渊散射效应的窄线宽双波长光纤激光器完全可用于光束相干合成。对不同功率比例、不同频移量的双波长和多波长布里渊光纤激光器的输出特性进行研究是下一步准备进行的工作。

5 结 论

搭建了一个基于受激布里渊散射效应的全光纤结构窄线宽双波长激光器,其波长间隔为 0.06 nm,输出功率达到 4.5 W,光-光转换效率为 50%。对它的光谱特性、功率输出特性和相干性与单波长窄线宽光纤激光器进行对比研究表明,该窄线宽双波长光纤激光器具有和单波长光纤激光器类似的功率输出特性;窄线宽双波长光纤激光器同样具有较好的相干性,可用于光束相干合成。对光纤激光相干合成光源的有益探索,具有一定的实际意义。

参 考 文 献

- Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81
程 勇, 刘 洋, 许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment on coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926
李剑峰, 段开棕, 王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers [J]. *Laser & 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
- G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- Jan E. Kinsky, Charles X. Yu, Daniel V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count[C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 63060G
- Towards 100 kW fiber laser systems, 2006. <http://www.crystallfiber.com>
- Gregory D. Goodno, Lewis D. Book, Joshua E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13241~13266
- P. Zhou, Y. Ma, X. Wang *et al.*. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2939~2941
- P. Wessels, P. Adel, M. Auerbach *et al.*. Novel suppression scheme for Brillouin scattering [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4443~4448
- 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
- I. Dajani, C. Zeringue, T. 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
- C. Zeringue, I. Dajani, C. Lu *et al.*. Multi-tone approach to SBS mitigation in narrow linewidth high power amplifiers [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71952I
- Liu Yang, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894
刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- Hu Song, Wei Shikang, Zhan li *et al.*. 15-Wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 212~215
胡 松, 尉仕康, 詹 黎等. 15 波长输出的布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 212~215
- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 223~229
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方译. 北京:电子工业出版社, 2002. 223~229
- R. W. Boyd. *Nonlinear Optics*[M]. New York: Academic, 1992
- M. Jager, S. Caplette, P. Verville *et al.*. Fiber lasers and amplifiers with reduced optical nonlinearities employing large mode area fibers[C]. *SPIE*, 2005, **5971**: 59710N