

高功率光纤拉曼激光器研究进展

殷科 许将明 冷进勇 吴武明 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 随着大功率半导体抽运技术和新型光纤结构的发展,高功率光纤拉曼激光器逐渐成为研究的热点。从锗硅单包层光纤、双包层光纤以及光子晶体光纤拉曼激光器的物理模型入手,介绍了高功率光纤拉曼激光器的基本理论,指出了它们各自的优缺点和最新的研究进展。论述了当前窄线宽光纤拉曼放大器的最新进展、存在的技术难点以及解决方法。展望了光纤拉曼激光技术在高功率激光器方面的发展前景。

关键词 激光器;受激拉曼散射;光纤拉曼激光器;窄线宽;高功率;光纤拉曼放大器

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.010004

Research Progress of High Power Fiber Raman Lasers

Yin Ke Xu Jiangming Leng Jinyong Wu Wuming Hou Jing

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

Abstract With the development of high power semiconductor pump technology and new fiber structures, high power fiber Raman lasers become a research focus nowadays. Starting with models of silicon germanium single-clad fiber Raman laser, double-clad fiber Raman laser and photonic crystal fiber Raman laser, the basic theories of high power fiber Raman lasers are introduced, the merits and defects of them are reviewed, and the latest developments are reported. The developments in the narrow linewidth fiber Raman amplifiers are advanced, and the technological difficulties and solution methods are discussed. Finally, the prospects of high power Raman technology in high power fiber Raman lasers are predicted.

Key words lasers; stimulated Raman scattering; fiber Raman laser; narrow linewidth; high power; fiber Raman amplifier

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3550

1 引言

与传统固体激光和化学激光相比,光纤激光具有光束质量更好、体积小、转换效率高、热管理方便等优点。目前高功率稀土离子掺杂光纤的输出激光功率突飞猛进。2009年6月,IPG公司利用1018 nm激光器同带抽运单根掺镱光纤,获得了约10 kW单模激光输出;2010年,IPG公司申请了不同波长的20 kW级的光纤激光器系统专利^[1]。由于稀土离子的吸收发射谱影响,光纤中受激放大方式输出的激光波长受到限制,在一些有特殊用途的波段如1018 nm波长附近的激光,采用这种掺杂离子受激放大方式就很难获得。然而光纤拉曼放大方式作为获取光纤激光的另一种重要途径,与掺杂离子的受激放大方式相比,具有更宽的增益带宽和更低的放大噪声特性,并能够获取各种特殊波长的激光,因此得到了人们的广泛研究。

光纤拉曼放大方式基于光纤中激光产生的受激拉曼散射(SRS)效应,将抽运光的能量转移到斯托克斯光上。光纤中的拉曼增益谱往往较宽,所以其最大的优势是输出激光波长的易变性,可获得稀土离子掺杂光纤难以获得的波长,比如1018,1480 nm激光等。实际上采用这项技术可以获得光纤中透明的任意波长的激光,同时也适于许多其他对激光波长有特殊要求的天文、医学和工业应用。

收稿日期: 2011-07-25; **收到修改稿日期**: 2011-09-15; **网络出版日期**: 2011-11-11

基金项目: 殷科(1988—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: cqncink@126.com

作者简介: 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

不同的光纤基质产生的拉曼频移大小也不一样,根据基质材料的不同,可将拉曼光纤大致分为锗硅光纤和磷硅光纤两种。同锗硅光纤(拉曼频移约为 440 cm^{-1})相比,磷硅光纤的主要优点是具有更大的拉曼频移(约 1330 cm^{-1}),在相同波长的抽运激光抽运下仅需更少级次的级联就可获得所需波长的激光输出,但存在光学损耗相对较高和拉曼增益较低的缺点。关于级联光纤拉曼激光器,周晓军等^[2]详细介绍了其发展状况,Nicholson 等^[3]利用级联锗硅光纤拉曼激光器获得了 81 W 的 1480 nm 激光的最高功率输出。

另外拉曼放大方式还是获取高功率窄线宽激光输出的重要途径,高功率窄线宽激光在光电传感、激光雷达、光谱学等领域有非常广泛的应用,同时,在相干合成、谱合成以及频率转换等研究领域需要特殊波长、高功率、高光束质量的窄线宽激光。因此,对于窄线宽光纤拉曼放大器(NL-FRA)进行研究意义重大。

针对光纤拉曼技术在高功率光纤激光技术中的重要性,本文主要介绍光纤拉曼技术在连续高功率硅基无源光纤方面取得的进展和发展趋势。首先从 3 种不同类型的光纤拉曼激光器的基本理论、优缺点等几个方面论述了高功率光纤拉曼激光器的研究进展,然后详细阐述了 NL-FRA 的技术难点、解决方法和最新进展,最后展望了高功率光纤拉曼技术的发展前景。

2 光纤拉曼激光器

通过选用不同的增益光纤,可以获得不同的拉曼增益谱宽、拉曼增益系数、拉曼阈值和激光输出特性等。目前光纤拉曼激光器中的拉曼增益光纤主要有 3 种类型:单包层光纤(SCF),双包层光纤(DCF)和光子晶体光纤(PCF)。

2.1 单包层光纤

SRS 是高功率光纤激光中一种重要的非线性效应,利用该效应可以给激光器中的信号光提供增益,例如如果将一弱信号光和强抽运光同时耦合进光纤中,并且弱信号光位于强抽运光的拉曼增益谱带宽内,则此弱信号光就可以被放大^[4]。在这种放大过程中,抽运光和斯托克斯光(信号光)之间的非线性相互作用可以用耦合方程表示:

$$\frac{dI_S}{dz} = g_R I_p I_S - \alpha_S I_S, \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_S} g_R I_p I_S - \alpha_p I_p, \quad (2)$$

式中 I_S 为斯托克斯光强, I_p 为抽运光强, g_R 为拉曼增益系数, ω_S 和 ω_p 分别为斯托克斯光和抽运光频率, α_S 和 α_p 分别为斯托克斯光和抽运光在光纤中的吸收损耗系数。提高光纤内的小信号增益系数,可以提高拉曼饱和增益,有利于实现高功率激光输出。

2009 年,Feng 等^[5]利用图 1 所示结构实现了 153 W 的 1120 nm 激光输出,该激光器的拉曼增益光纤为 30 m 标准硅基单模光纤(SMF),抽运光为 200 W 的 1070 nm 连续光,有效抑制了二阶斯托克斯光,这是目前报道的功率最高的连续单包层拉曼激光器。

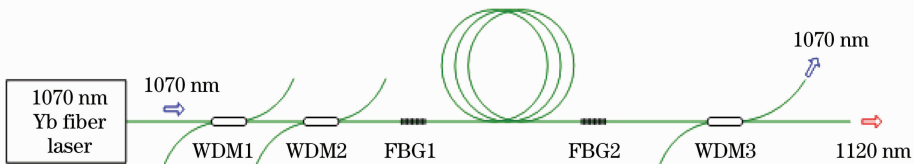


图 1 1070 nm 掺镱光纤激光抽运的 1120 nm 光纤拉曼激光器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the 1120 nm fiber Raman laser pumped by a 1070 nm Yb-doped fiber laser

单包层光纤拉曼激光器的优点有两个方面:1)抽运光在低功率时也可以得到较高的抽运光功率密度,因此拉曼增益系数较高,同时也具有较低的拉曼增益阈值;2)单包层光纤来源广泛,直接采用纤芯抽运方便可靠。缺点主要也有两个方面:1)单包层拉曼技术要求抽运光为单模激光,所以很难进一步提高抽运光功率,同时需要较高的激光入纤耦合效率;2)由于 SRS 的产生需要很高的光强度,而小芯径光纤通常采用纤芯抽运技术,限制了其功率进一步提升。单包层光纤中拉曼增益系数很低,抽运阈值高,降低阈值往往需要很长

的光纤,而这时光纤中的激光损耗和高阶斯托克斯光的产生又成为了制约其向高功率发展的主要因素。因此目前关于高功率单包层光纤拉曼激光器的报道和研究都很少。

2.2 双包层光纤

2002年,Nilsson等^[6]提出了双包层抽运的光纤拉曼激光器和放大器理论,并证明了其可行性。他们指出实现一阶斯托克斯光的双包层拉曼技术,DCF应满足两个基本条件^[7]:

$$\frac{A_{cl}}{A_{co}} \left(\frac{\lambda_{pump}}{\lambda_{2S}} \right)^2 = \frac{G_2^{SRS}}{\zeta_0} < 8, \quad (3)$$

$$I_p \leq \frac{I_s^{max}}{\eta} \frac{A_{co}}{A_{cl}}, \quad (4)$$

式中 A_{cl} 是光纤内包层面积, A_{co} 是纤芯面积, G_2^{SRS} 是二阶斯托克斯光的增益系数, ζ_0 是对一阶斯托克斯光的非线性吸收系数, I_s^{max} 是光纤材质的受损阈值光强, η 表示光-光转换效率。(3)式是对 DCF 的结构要求,为了有效抑制光纤中产生的二阶及高阶斯托克斯光,并且假设在抽运光耗尽的条件下能够获得最大的光-光转换效率,那么 G_2^{SRS} 与 ζ_0 之比应该小于 8,并且(3)式左边值越小,剩余抽运光也就越少,拉曼技术实现的光-光转换效率也就越高。(4)式是对最大抽运光功率的要求,为防止光纤被损坏,抽运光强度应满足该不等式。

Heebner等^[8]提出了设计和优化包层抽运光纤拉曼激光器和放大器的方法,并利用该方法制作了特殊的光纤波导结构,使得双包层光纤中一阶斯托克斯光和高阶斯托克斯光具有不同的损耗系数,成功将(3)式中包层纤芯面积比限制从 8 提高到 40,而且仿真得到的光-光转换效率可以提高到 60% 以上。Codemard等^[9]利用 85 m 长的掺锗双包层拉曼光纤(DCRF)搭建了如图 2 所示的双包层光纤拉曼激光器,实现了在 1120 nm 处 100 W 的连续拉曼光输出,这是目前报道的最高输出激光功率的双包层光纤拉曼激光器。

双包层光纤拉曼激光器的特点在于可以通过特殊设计的 DCF 结构和改变掺杂离子的浓度,获得比单包层光纤更高的拉曼增益系数,同时降低了对于抽运光质量的要求,可以使用多模抽运光源,普通掺杂光纤中较成熟的包层抽运技术可以用到 DCF 拉曼技术中来。缺点是随着功率的提高,很难控制光纤中的光波模式,高阶噪声增大,导致光-光转换效率降低。双包层光纤拉曼激光器正朝着采用不同掺杂离子、高浓度、光纤结构进一步优化等方面发展。

双包层光纤拉曼激光器的特点在于可以通过特殊设计的 DCF 结构和改变掺杂离子的浓度,获得比单包层光纤更高的拉曼增益系数,同时降低了对于抽运光质量的要求,可以使用多模抽运光源,普通掺杂光纤中较成熟的包层抽运技术可以用到 DCF 拉曼技术中来。缺点是随着功率的提高,很难控制光纤中的光波模式,高阶噪声增大,导致光-光转换效率降低。双包层光纤拉曼激光器正朝着采用不同掺杂离子、高浓度、光纤结构进一步优化等方面发展。

2.3 光子晶体光纤

PCF 与 SCF 和 DCF 相比在光纤结构、单模特性、色散特性和非线性特性等方面有着显著的差别。由于 PCF 的横截面具有特殊的几何结构,Fuochi等^[10]指出在 PCF 拉曼激光器中应考虑拉曼增益在光纤横截面上的积分形式,如(1),(2)式所示。有效拉曼增益系数 g_R 和拉曼有效增益面积 A_{eff}^R 的关系为

$$g_R = \frac{\bar{g}_R}{A_{eff}^R}, \quad (5)$$

式中 \bar{g}_R 为 PCF 横截面上的拉曼增益系数。通过对 PCF 中空气孔的排列和大小的控制,可以减小有效拉曼增益面积,大大增强其非线性效应,有效拉曼增益系数可以达到 $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ^[11]。如果在 PCF 的空气孔中填充合适的非线性材料(如氢气),还可以大大提高 PCF 的非线性^[12~14]。PCF 的高非线性对于拉曼激光器和拉曼放大器都具有很大的吸引力。

2006年,北京交通大学 Fang等^[15]从理论上分析了当抽运光和信号光具有相同偏振态时,PCF 可以获得更高的拉曼增益,通过他们设计的 PCF 可以在 1550 nm 处获得 $50 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的拉曼增益。2010年,Couny等^[16]使用充氢气的空心 PCF(HCPCF)搭建了如图 3 所示的 PCF 拉曼激光器,在 1061 nm 处 85 W 的抽运光作用下,获得了 1131 nm 处 55 W 的斯托克斯光输出,是迄今报道的最高输出功率的 PCF 拉曼激

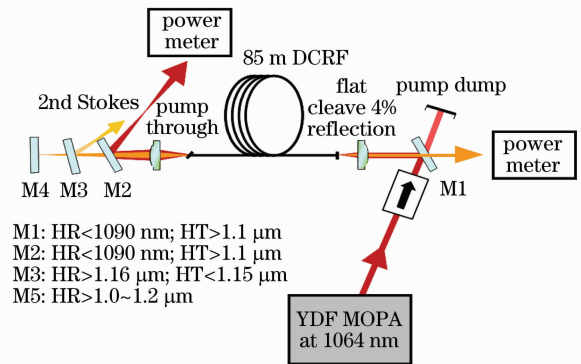


图 2 包层抽运光纤拉曼激光器的结构

Fig. 2 Configuration of the cladding-pumped fiber Raman laser

光器。

虽然 PCF 拉曼激光器可以获得比 DCF 更高的拉曼增益和更优异的光束特性,但是受目前工艺制作水平和价格的限制,短时间内还是以采用仿真软件对特殊结构的 PCF 拉曼激光器的理论研究为主。

3 窄线宽光纤拉曼放大器

高功率窄线宽光纤激光在光电传感等领域有非常广泛的应用,同时,在相干合成、谱合成以及频率转换等研究领域需要特殊波长、高功率、高光束质量的窄线宽激光。拉曼放大方式是获取高功率窄线宽激光输出的重要途径^[17]。

2009 年, Feng 等^[18,19]通过采取有效的受激布里渊散射(SBS)抑制措施,使得 SBS 阈值提高了 10 倍,并获得了线宽为 3.5 MHz、功率为 20.7 W 的 1178 nm 激光输出,拉曼放大器结构如图 4 所示^[19]。实验中使用的种子源为分布反馈式(DFB)半导体激光器,输出功率为 10 mW,1120 nm 抽运光的功率为 67 W,光-光转换效率达到了 30.9%。

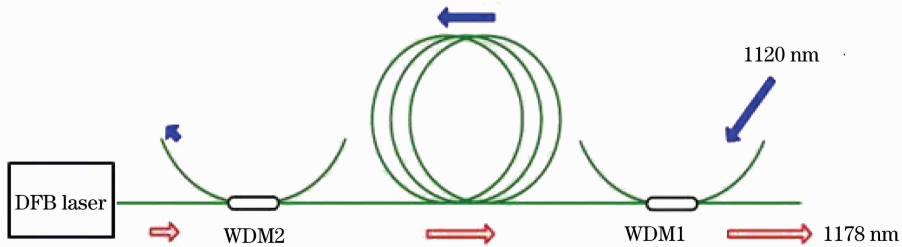


图 4 DFB 后向抽运下的光纤拉曼放大器结构图

Fig. 4 Schematic diagram of a back pumped DFB diode laser seeded fiber Raman amplifier

后来,他们通过进一步改进 SBS 抑制措施,并采用输出功率为 150 W 的 1120 nm 光纤拉曼激光器提供抽运光^[5],单路 NL-FRA 输出 1178 nm 光功率达到了 39 W,输出线宽小于 1.5 MHz,光-光转换效率约为 28%,如图 5 所示^[20]。

由于拉曼散射增益系数较小,在光纤拉曼放大器中,为了给信号光提供足够的增益,往往需要使用几十米甚至数百米的光纤。因此,如果运行在窄线宽状态下,信号光在被放大的同时,其自身的 SBS 效应很容易发生,从而限制了放大器输出功率的提升,使得输出功率长期以来一直处于较低的水平。

目前关于光纤放大器中 SBS 抑制的研究主要集中在窄线宽掺镱光纤(YDF)放大器中,适用于 NL-FRA 的抑制方法通常有对光纤施加纵向的应力或温度场分布、采用特殊设计的声光分离光纤、展宽 SBS 增益谱、降低信号光谱功率密度等几种^[21]。这些方法虽然原理不同,也各自都有比较明显的优缺点,但都能在一定程度上提升窄线宽放大器的输出功率。其中通过在增益光纤上施加纵向的应力或温度场分布,以展宽 SBS 的增益线宽的方式较为实用;而通过双波长放大来降低信号光谱功率密度的方式,特别能符合纳导星光源要求间隔为 1.7 GHz 双窄线宽的应用要求。然而,在施加

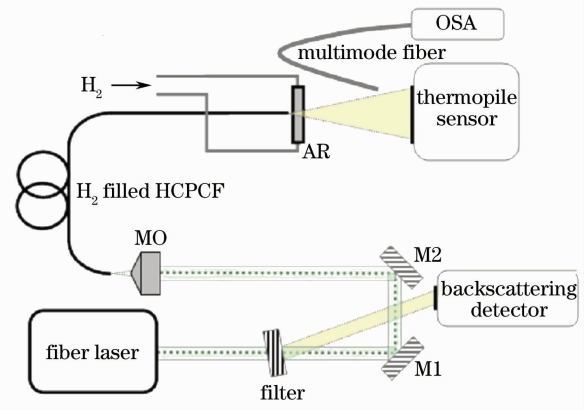


图 3 充氢 HCPCF 拉曼激光器结构图

Fig. 3 Configuration of H₂-filled HCPCF fiber Raman laser

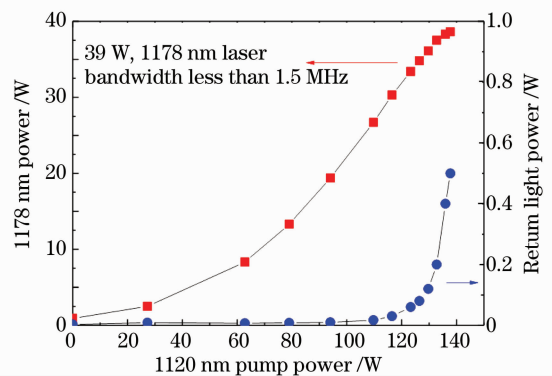


图 5 1178 nm 输出激光和未吸收抽运光功率与 1120 nm 抽运光功率的关系

Fig. 5 1178 nm laser power and return light power versus 1120 nm pump power

应力或温度场分布时,存在强度不能太大的缺点,而双窄线宽放大时又易受到四波混频(FWM)的影响。

针对 NL-FRA 存在 SBS 影响的问题,可以考虑多级放大的方式,通过合理选择各级放大器的抽运功率、光纤类型及长度等,并配合使用简单施加应力梯度的 SBS 抑制措施来获得较高功率的激光输出,同时可以考虑采用一定的技术手段来消除双窄线宽放大时的 FWM 噪声,通过综合抑制 SBS 的手段来提高 NL-FRA 的输出功率。

4 结束语

详细论述了当前光纤拉曼技术在高功率拉曼光纤激光器和 NL-FRA 中的发展情况。通过光纤拉曼技术可以获得比掺杂离子受激放大方式更宽的增益带宽、更低的噪声特性以及特殊波长的激光。虽然目前由于器件性能和光纤材料的原因,单根光纤采用拉曼放大方式输出的最高激光功率被限制在 200 W 左右,但有理由相信,随着大功率半导体抽运技术的成熟以及对新型光纤结构的不断研究,光纤拉曼技术的输出激光功率必将不断提高。可以预见光纤拉曼激光在各种特殊领域的应用也势必得到不断发展。

参 考 文 献

- 1 Valentin P. Gapontsev, Valentin Fomin, Nicholai Platonov. Fiber Laser System[P]. US Patent 7,848,368,2010-12-7
- 2 Zhou Xiaojun, Qin Zujun, Wu Haocheng *et al.*. Advances in cascaded Raman fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(9): 32~37
- 3 周晓军, 秦祖军, 伍浩成 等. 级联光纤拉曼激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(9): 32~37
- 4 J. W. Nicholson, M. F. Yan, P. Wisk *et al.*. Raman fiber laser with 81 W output power at 1480 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3069~3071
- 5 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics (4th ed.)[M]. New York: Academic Press,2007
- 6 Y. Feng, L. R. Taylor, D. Bonaccini Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 7 J. Nilsson, J. K. Sahu, J. N. Jang *et al.*. Cladding-pumped Raman amplifier [C]. in: Proceedings of Optical Amplifiers and Their Applications, 2002, PD2-1/2/3
- 8 Junhua Ji, Christophe A. Codemard, Morten Ibsen *et al.*. Analysis of the conversion to the first Stokes in cladding-pumped fiber Raman amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 129~139
- 9 John E. Heebner, Arun K. Sridharan, Jay W. Dawson *et al.*. High brightness, quantum defect limited conversion efficiency in cladding pumped Raman fiber amplifiers and oscillators [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14705~14716
- 10 C. A. Codemard, J. Ji, J. K. Sahu *et al.*. 100 W CW cladding-pumped Raman fiber laser at 1120 nm[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75801N
- 11 M. Fuochi, F. Poli, S. Selleri. Study of Raman amplification properties in triangular photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2247~2254
- 12 Stéphane Randoux, Guillaume Beck, François Anquez *et al.*. Grating free and Bragg grating based Raman lasers made with highly nonlinear photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1580~1589
- 13 Y. Y. Wang, F. Couny, P. S. Light *et al.*. Compact and portable multiline UV and visible Raman lasers in hydrogen-filled HC-PCF[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1127~1129
- 14 F. Couny, F. Benabid, P. S. Light. Sub-watt threshold CW Raman fiber-gas-laser based on H₂-filled hollow-core photonic crystal fiber[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/ International Quantum Electronics Conference, 2008, CTuL4
- 15 K. Ihara, S. Zaitso, T. Imasaka. Raman amplification of continuous-wave laser emission in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/ Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2008, JFE4
- 16 Hong Fang, Shuqin Lou, Tieying Guo *et al.*. Analysis on Raman gain coefficients in polarization maintaining photonic crystal fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9): 508~511
- 17 F. Couny, B. J. Mangan, A. V. Sokolov *et al.*. High power 55 watts CW Raman fiber-gas-laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference, 2010, CTuM3
- 18 Sun Wenfeng, Zhao Changming, Wei Guanghui. LD pump fiber amplifier with high power and single frequency[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 827~829

- 孙文峰, 赵长明, 魏光辉. 半导体激光泵浦单频高功率光纤放大器的研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(6): 827~829
- 18 Y. Feng, L. Taylor, D. Bonaccini Calia. 20W CW, 4MHz linewidth Raman fiber amplifier with SHG to 589 nm[C]. Photonics West 2009, 2009, 7195-101
- 19 Y. Feng, L. Taylor, D. Bonaccini Calia. Multiwatts narrow linewidth fiber Raman amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 10927~10932
- 20 Y. Feng, L. Taylor, D. Bonaccini Calia *et al.*. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm[C]. Frontiers in Optics, 2009, PDPA4
- 21 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