

## 780W全光纤窄线宽光纤激光器

张利明<sup>†</sup> 周寿桓 赵鸿 张昆 郝金坪 张大勇 朱辰  
李尧 王雄飞 张浩彬

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

(2013年12月28日收到; 2014年2月17日收到修改稿)

高功率窄线宽光纤激光器在相干探测、功率光谱合成等方面具有广泛的应用前景. 分析了高功率窄线宽光纤激光器中受激布里渊散射效应的抑制方法, 以及正弦相位调制光谱展宽理论. 采用正弦相位调制技术将单频激光器的线宽展宽至 2.9 GHz, 通过三级放大结构对输出功率为 50 mW 的窄线宽种子源进行放大, 实现了中心波长 1064.34 nm、线宽 2.9 GHz、最大功率 780 W 的激光输出, 光—光转换效率 79%, 光束质量  $M_x^2 = 1.44$ ,  $M_y^2 = 1.43$ . 分析了相位调制前后输出功率提高的原因, 认为正弦相位调制增加的纵模降低了光纤中的功率谱密度, 提高了输出激光的受激布里渊散射阈值, 促使相位调制后的输出功率大幅提高. 该激光器的输出功率仅受限于抽运功率, 进一步提高抽运功率, 有望实现更高功率的窄线宽光纤激光输出.

**关键词:** 光纤激光器, 窄线宽, 相位调制, 近单模**PACS:** 42.55.Wd, 42.62.Fi, 42.60.Fc, 42.60.Jf**DOI:** 10.7498/aps.63.134205

## 1 引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑等特点, 在工业、医疗、科研和军事等领域得到了广泛应用. 近几年, 窄线宽光纤激光器在相干探测<sup>[1]</sup>、引力波探测<sup>[2]</sup>、相干合成<sup>[3]</sup>、功率光谱合成<sup>[4-6]</sup>等方面的应用日益广泛.

目前, 国外在高功率窄线宽光纤激光器方面做出贡献的主要有美国 Nufern 公司和美国空军实验室 (Air Force Research Laboratory). 其中, 2010 年, Nufern 公司采用单频光纤激光器作为种子源, 采用随机噪声相位调制对单频种子源光谱进行展宽, 芯径为 25  $\mu\text{m}$  的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤作为主放大级的增益介质, 经三级放大后实现了功率为 1 kW、线宽 3.5 GHz 的激光输出, 光—光转换效率 88%, 光束质量  $M_x^2 = 1.13$ ,  $M_y^2 = 1.1$ <sup>[7]</sup>. 2013 年, 美国空军实验室采用伪随机二进制序列 (PRBS) 相位调制对单频种子源光谱进行展宽, 芯径为 20  $\mu\text{m}$  的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤作为主放大级的增益介质, 经四级放大后实现了功率为 1 kW 的窄线宽激

光输出<sup>[8]</sup>. 国内, 2010 年, 上海光机所采用线宽为 20 kHz 的单频光纤激光器作为种子源, 大模场掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层保偏光纤作为主放大级的增益介质, 经两级放大后实现了输出功率为 128 W 的单频激光输出<sup>[9]</sup>. 2011 年, 国防科技大学采用线宽窄于 100 MHz 的单频光纤激光器作为种子源, 芯径为 30  $\mu\text{m}$  的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤作为主放大级的增益介质, 经三级放大后实现了功率为 334 W 的窄线宽激光输出<sup>[10,11]</sup>.

窄线宽光纤激光器中受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应是限制其功率提升的主要因素, 多篇文献已对光纤激光器中的 SBS 效应及其抑制方法进行了研究, 提出了诸如相位调制展宽单频激光器线宽<sup>[12,13]</sup>、改变光纤的掺杂成分<sup>[14,15]</sup>、增大光纤的温度梯度<sup>[16,17]</sup>、增加光纤的应力梯度<sup>[18]</sup>、缩短光纤长度和增大光纤的芯径等方法来提高 SBS 的阈值. 但改变光纤的掺杂成分、增大光纤的温度梯度、增加光纤的应力梯度、缩短光纤长度等方法仅能局部对 SBS 起到抑制作用, 当光纤芯径大于 25  $\mu\text{m}$  时, 过多的高阶模式将会使窄线宽光纤激光器的光束质量下降. 而相位调制技

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zlm200811@sina.com

术虽然将输出激光的线宽进行了一定程度的展宽, 但该技术可以在较窄的线宽范围内有效抑制SBS, 大幅提高窄线宽光纤激光器的输出功率.

本论文采用正弦相位调制展宽单频种子源线宽、三级放大的主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构, 实现了工作波长1064.34 nm、线宽2.9 GHz、最大功率780 W的窄线宽激光输出, 光—光转换效率79%, 光束质量  $M_x^2 = 1.44$ ,  $M_y^2 = 1.43$ .

## 2 正弦相位调制理论

在窄线宽光纤激光器中, 通过相位调制增加边频(纵模)数展宽种子光(信号光)谱宽进行功率放大, 可提高SBS的阈值和激光输出功率, 因此, 对相位调制光谱展宽理论进行了研究.

正弦相位调制的基本原理为, 铌酸锂晶体构成相位调制器, 在外电场的作用下其折射率发生改变, 从而对输入光波进行调制. 注入相位调制器的光波称为载频, 设其场方程为

$$E_{op} = A \cos(2\pi\nu_0 t), \quad (1)$$

注入相位调制器的电信号场方程为

$$E_i = E_m \cos(2\pi\nu_m t), \quad (2)$$

相位调制器通过改变  $\psi$  (调相) 来得到  $E$  的不同值, 而

$$\psi = \beta \sin(2\pi\nu_m t), \quad (3)$$

则经过正弦相位调制后光场分布为

$$E = A \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \times \exp[j2\pi(\nu_0 + n\nu_m)t] \right\}. \quad (4)$$

在(1), (2), (4)式中,  $A$ 为注入光波(载频)的振幅,  $\nu_0$ 为光波频率,  $E_m$ 为注入的调制电信号振幅(电平),  $\nu_m$ 为外加电信号频率,  $t$ 为时间,  $\beta$ 为调制系数. 通过改变调制系数  $\beta$ 和电信号频率  $\nu_m$ 来改变相位  $\psi$ , 从而得到不同谱宽的输出光波  $E$ . 从(4)式可知电光相位调制的结果产生若干边频带, 而光谱展宽就是这些边带频谱组成的波形包络的半宽.

对单频源经正弦相位调制后的频谱分布进行了模拟计算, 电信号频率  $\nu_m = 150$  MHz, 相位调制系数分别为  $\beta = 1.45$ 和  $\beta = 14.4$ , 理论模拟结果如图1(a)和(b)所示. 图1(a)为  $\nu_m = 150$  MHz,  $\beta = 1.45$ 时的频谱, 单根竖线表示1个纵模, 经正弦

相位调制后, 在半高宽范围内单频源的频谱由1个纵模变为了3个纵模, 中间纵模的强度略低于两边的纵模; 图1(b)为  $\nu_m = 150$  MHz,  $\beta = 14.4$ 时的频谱, 在半高宽范围内单频源的频谱由1个纵模变为了20个纵模, 这些纵模的包络在整个频谱范围内形成10个峰.

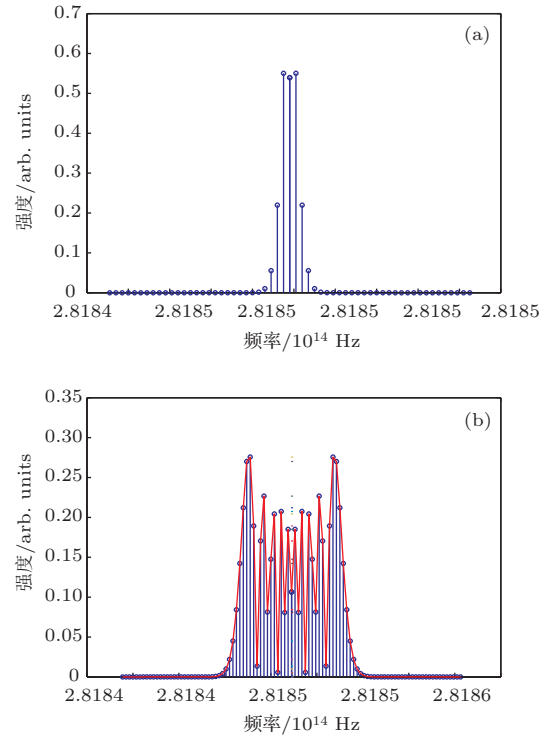


图1  $\nu_m = 150$  MHz时正弦相位调制频谱分布模拟图 (a)  $\beta = 1.45$ ; (b)  $\beta = 14.4$

## 3 实验布置

正弦相位调制窄线宽光纤激光器实验原理如图2所示. 激光器采用种子源加三级放大的MOPA结构实现. 其中, 种子源采用带有输出尾纤的单频LD, 尾纤直径为6/125  $\mu\text{m}$ , 其最大输出功率为50 mW, 中心波长1064.4 nm, 光谱线宽  $< 1$  MHz (谱宽  $3.78 \times 10^{-6}$  nm).

光谱展宽采用相位调制器(Phase modulator), 其尾纤直径为6/125  $\mu\text{m}$ , 电光带宽150 MHz, 半波电压2.5 V, 最大调制电压峰峰值为40 V, 最大承受光功率20 dBm. 正弦电信号触发源为高频信号发生器(Signal generator), 输出频率范围65 kHz—8 GHz, 最大输出功率16 dBm. 电信号放大采用射频放大器(RF driver), 最大带宽10 GHz, 饱和注入电功率26 dBm, 最大增益30 dB. 实验中信号发生器输出频率为150 MHz, 相位调制系数分别为  $\beta = 1.45$ 和  $\beta = 14.4$ .

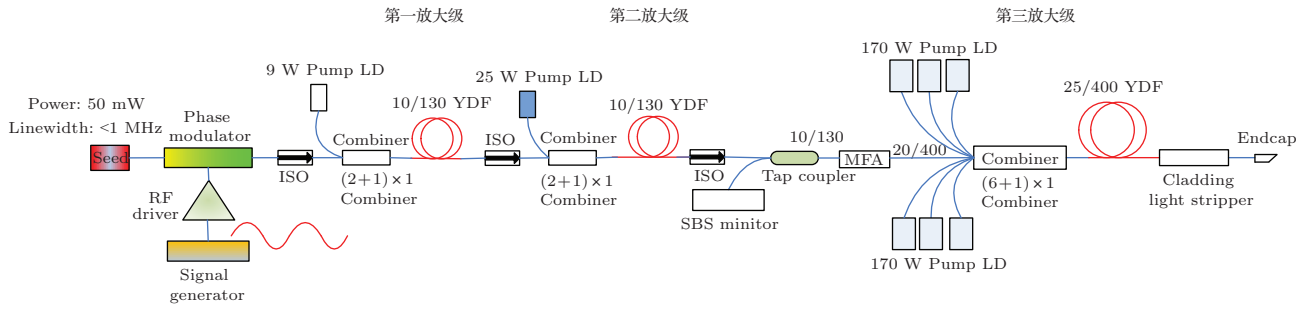


图2 (网刊彩色) 实验原理图

第一放大级的抽运源采用1支最大输出功率为9 W、中心波长975 nm的半导体二极管(9 W Pump LD), 其输出尾纤直径为105/125  $\mu\text{m}$ 。抽运耦合采用(2+1)  $\times$  1合束器((2+1)  $\times$  1 Combiner), 其抽运臂直径为105/125  $\mu\text{m}$ , 主纤直径为10/125  $\mu\text{m}$ 。增益介质采用直径为10/130  $\mu\text{m}$ 、长3 m的掺Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤(10/130 YDF), 其对975 nm抽运光的吸收系数为3.9 dB/m。

第二放大级的抽运源采用1支最大输出功率为25 W、中心波长975 nm的半导体二极管(25 W Pump LD), 其输出尾纤直径为105/125  $\mu\text{m}$ 。其他器件均与第一放大级相同。

第三放大级的抽运源(PLD 170 W)采用6支最大输出功率为170 W、中心波长976 nm的半导体二极管(170 W Pump LD), 其输出尾纤直径为200/220  $\mu\text{m}$ 。抽运耦合采用(6+1)  $\times$  1合束器((6+1)  $\times$  1 Combiner), 其抽运臂直径为200/220  $\mu\text{m}$ , 主纤直径为20/400  $\mu\text{m}$ 。增益介质采用直径为25/400  $\mu\text{m}$ 、长12 m的掺Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤(25/400YDF), 其对976 nm抽运光的吸收系数为1.6 dB/m。

为了防止反馈, 分别在各级之间连接光隔离器(ISO); 采用模场适配器(MFA)连接第二和第三放大级; 为了消除包层光, 在第三放大级和输出端之间连接包层光剥离器(cladding light stripper); 为了防止受激布里渊散射效应中的后向散射光打坏前级器件, 在第二与第三放大级之间连接抽头耦合器(tap coupler), 主纤和分束纤直径均为10/125  $\mu\text{m}$ , 分光比为5/95, 其功能为监测反向SBS功率(SBS monitor), 当反向功率出现非线性增长时说明已达到了SBS效应的阈值, 应迅速关掉放大级电源, 以防止前级器件被反向光打坏; 第三放大级增益光纤输出端0.5 m裸露在空气中, 其后连接0.5 m无源光纤, 为防止反馈, 采用切有斜8°角的端帽

(Endcap)作为输出端。整个系统采用水冷方式进行散热, 水温25 °C。

### 4 结果分析

分别对相位调制前后的种子源进行了功率放大。相位调制前, 单频种子源直接放大, 其中, 第一放大级输出功率1.36 W, 第二放大级输出功率4.6 W, 当第三放大级输出功率为77 W时, 反向功率出现非线性增长(如图3(a)所示), 表明此时已发生SBS。相位调制后, 其中, 第一和第二放大级的输出功率同相位调制前, 当 $v_m = 150\text{ MHz}$ ,  $\beta = 1.45$ ,

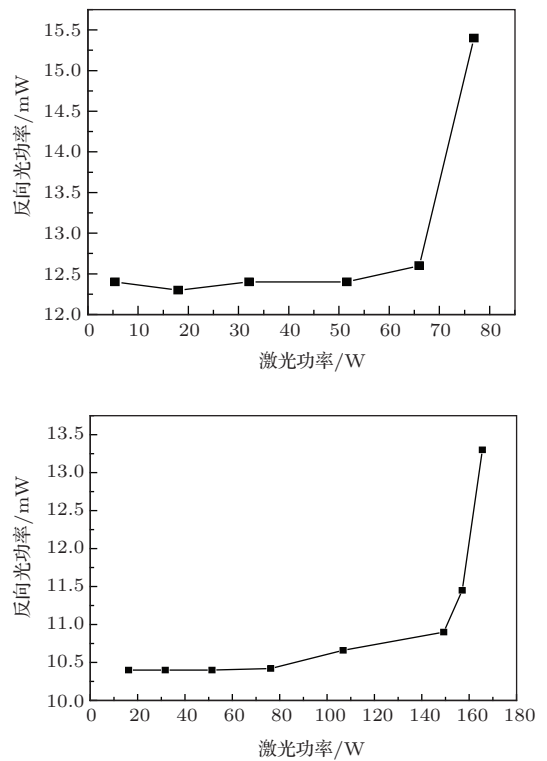


图3 反向光功率随激光功率的变化 (a)单频种子源直接放大; (b)相位调制后 $v_m = 150\text{ MHz}$ ,  $\beta = 1.45$ 时种子源放大

第三放大级输出功率为 166 W 时, 反向功率出现非线性增长(如图 3(b) 所示), 表明此时已发生 SBS; 当  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 14.4$ , 第三放大级注入抽运功率 984.7 W 时, 第三放大级输出激光功率 780 W, 光光效率 79%, 斜效率 82%(如图 4). 实验过程中未发生 SBS 效应, 抽运功率与激光功率具有较好的线性关系, 说明进一步增大抽运功率能够实现更高功率的激光输出.

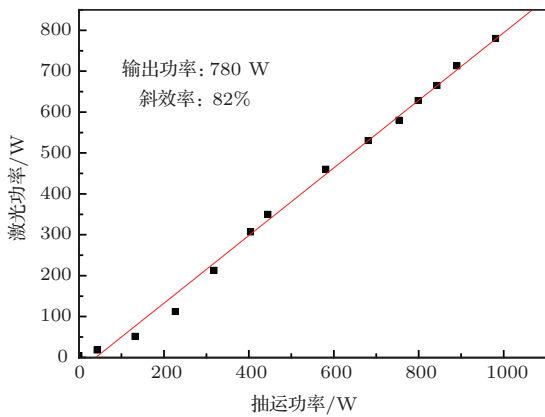


图 4 相位调制后第三放大级激光功率随抽运功率的变化

分别采用自由光谱范围为 1.5 GHz、分辨率 7.5 MHz 和自由光谱范围为 10 GHz、分辨率 67 MHz 的扫描法布里波罗干涉仪对经正弦相位调制前后种子源的频谱进行了测量, 测量结果分别如图 5(a), (b), (c) 所示. 相位调制前, 种子源的频谱分布为 1 个峰(图 5(a)); 经相位调制后, 当  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 1.45$  时, 频谱分布为 3 个峰, 中间峰的强度略低于两边的峰(图 5(b)), 与理论模拟结果基本符合; 相位调制后, 当  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 14.4$  时, 频谱分布为 10 个峰(图 5(c)), 与理论模拟结果基本符合, 调制后的线宽测量值为 2.9 GHz; 当输出功率为 780 W 时, 激光线宽测量值仍为 2.9 GHz.

采用测量光谱范围为 400—1700 nm、分辨率为 0.05 nm 的光谱仪对输出激光光谱进行了测量, 输出功率为 780 W 时的激光光谱如图 6 所示, 激光的中心波长 ( $\lambda_c$ ) 为 1064.34 nm.

采用光束质量分析仪对输出激光的光束质量进行了测量, 输出功率为 780 W 时的激光光束质量测量结果如图 7 所示, 测得光束质量  $M_x^2 = 1.44$ ,  $M_y^2 = 1.43$ .

比较相位调制前后的输出功率, 相位调制前的

最高输出功率为 77 W, 相位调制后, 当  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 1.45$  时, 输出功率为 166 W, 输出功率为调制前的 2.2 倍, 当  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 14.4$  时, 输出功率为 780 W, 输出功率为调制前的 10.1 倍, 并且未发生 SBS 效应, 进一步提高抽运功率, 输出功率应大于调制前的 10.1 倍. 初步分析认为, 正弦相位调制增加的纵模降低了光纤中的功率谱密度, 减小了单个纵模的 SBS 有效增益系数, 提高了输出激光的 SBS 阈值, 促使相位调制后的输出功率大幅提高.

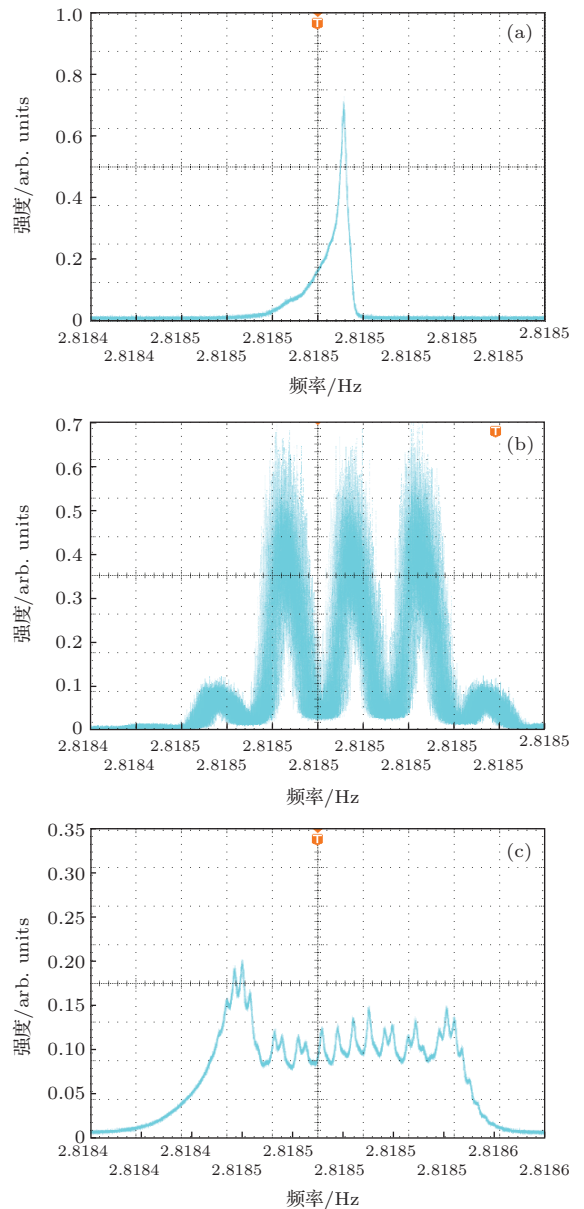


图 5 单频源在相位调制前后的频谱分布图 (a) 相位调制前; (b) 相位调制后  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 1.45$ ; (c) 相位调制后  $v_m = 150$  MHz,  $\beta = 14.4$

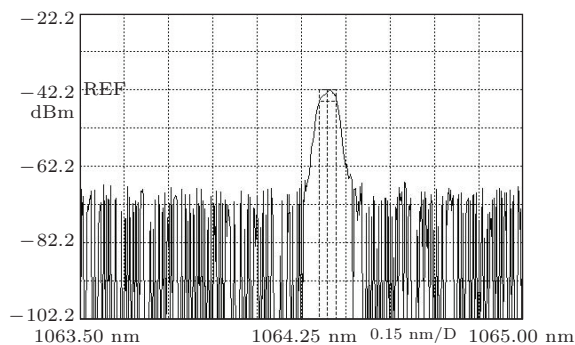


图6 输出功率为780 W时的激光光谱

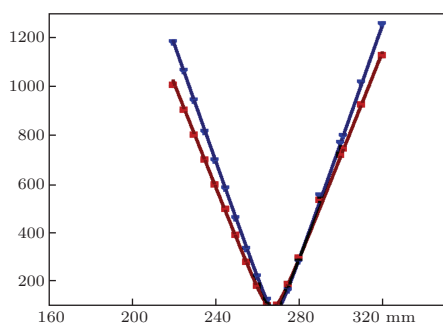
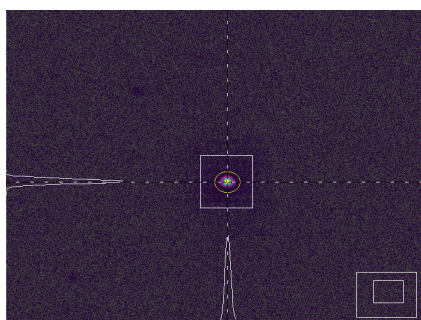


图7 输出功率780 W时的光束质量测量图

## 5 结 论

本文讨论了窄线宽光纤激光器中SBS的抑制方法,分析了正弦相位调制理论.采用正弦相位调制技术将单频LD的线宽展宽至2.9 GHz,并以此作为种子源通过三级放大的MOPA结构实现了中心波长1064.34 nm、线宽2.9 GHz、功率780 W的窄线宽全光纤激光输出,光—光转换效率79%,斜效率82%,光束质量 $M_x^2 = 1.44$ ,  $M_y^2 = 1.43$ .初步分析了相位调制前后输出功率提高的原因,认为正弦相位调制增加的纵模降低了光纤中的功率谱密度,减小了单个纵模的SBS有效增益系数,提高了输出激光的SBS阈值,最终促使相位调制后的输出功率

大幅提高.目前,该系统中未发现SBS,输出功率仅受限于抽运功率,进一步提高抽运功率,有望实现更高功率的窄线宽光纤激光输出.下一步工作将进一步研究纵模分布特性对窄线宽光纤激光器输出功率的影响.

## 参考文献

- [1] Yusuke Koshikiya, Xinyu Fan, Fumihiko Ito 2008 *Journal of Lightwave Technology* **26** 3287
- [2] Bondu F, Friyschel P, Man C N, Brillat A 1996 *Optics Letters* **21** 582
- [3] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, Goldizen K C, Murphy D V, Sanchez A, Fan T Y 2011 *Optics Letters* **36** 2686
- [4] Hu X D, Ning T G, Pei L, Li J, Zhou Q 2010 *Laser & Optoelectronics Progress* **47** 081401 (in Chinese)[胡旭东, 宁提纲, 裴丽, 李晶, 周倩 2010 激光与光电子学研究进展 **47** 081401]
- [5] Ji W, Chen S F, Fu L, Zou Z F 2012 *Chinese Optics Letters* **10** 080601
- [6] Liu F N, Jia X J, Liu Y G, Yuan S Z, Dong X Y 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 929
- [7] Khitrov V, Farley K, Leveille R Galipeau J, Majid I, Christensen S, Samson B, Tankala K 2010 *Proc. of SPIE* **7686** 76860A
- [8] Robin C, Dajani I, Zernigue C, Flores A, Pulford B, Lannari A, Naderi S 2013 *Proc. of SPIE* **8601** 86010Z
- [9] Qi Y F, Liu C, Zhou J, Chen W B, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3942 (in Chinese)[漆云凤, 刘驰, 周军, 陈卫标, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 3942]
- [10] Du W B, Xiao H, Wang X L, Leng J Y, Zhou P, Liu Z J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 1996 (in Chinese) [杜文博, 肖虎, 王小林, 冷进勇, 周朴, 刘泽金 2011 强激光与粒子束 **23** 1996]
- [11] Wang X L, Zhou P, Leng J Y, Du W B, Xu X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044205
- [12] Du W B, Wang X L, Han K, Zhou P, Xu X J, Shu B H 2011 *Chinese Journal of Lasers* **38** 1105009 (in Chinese) [杜文博, 王小林, 韩凯, 周朴, 许晓军, 舒柏宏 2011 中国激光 **38** 1105009]
- [13] Zeringue C, Dajani I, Naderi S, Moore G T, Robin C 2012 *Optics Express* **20** 21196
- [14] Gray S, Walton D, Wang J, Li M J, Chen X, Ruffin A. B, Demeritt J, Zenteno L 2006 OSA/OAA OSuB OSuB1
- [15] Walton D, Gray S, Wang J, Li M J, Chen X, Liu A P, Zenteno L, Crowley A 2007 *Proc. of SPIE* **6453** 645314
- [16] Liu A P 2007 *Optics Express* **1** 977
- [17] Hildebrandt M, Büsche S, Weßels P, Frede M, Kracht D 2008 *Optics express* **16** 15970
- [18] Rothenberg J E, Thielen P A, Wickham M, Asman C P 2008 *Proc. of SPIE* **6873** 68730O

## 780 W narrow linewidth all fiber laser

Zhang Li-Ming<sup>†</sup> Zhou Shou-Huan Zhao Hong Zhang Kun Hao Jin-Ping  
Zhang Da-Yong Zhu Chen Li Yao Wang Xiong-Fei Zhang Hao-Bin

(*Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China*)

( Received 28 December 2013; revised manuscript received 17 February 2014 )

### Abstract

High-power narrow linewidth fiber lasers are extensively applied in coherent detection and power-spectrum beam combination etc. The suppressing method of stimulated Brillouin scattering is analyzed. And the theory of sinusoidal phase modulation is analyzed also. A single frequency laser is broadened to become a 2.9 GHz linewidth seed by sinusoidal phase modulation technology. The power of the seed is then boosted from 50 mW to 780 W through a three-stage power amplifiber configuration. Central wavelength and linewidth of the laser are 1064.34 nm and 2.9 GHz respectively, with an optical-optical efficiency being 79%. And the beam quality is  $M_x^2 = 1.44$  and  $M_y^2 = 1.43$ . The output powers before and after phase modulation are compared with each other. And the reason why output power increases is analyzed. The stimulated Brillouin scattering threshold is promoted by added longitudinal mode. Finally, the output power is promoted after phase modulation, so that the output power of this laser is only limited by the pump power. If the pump power is increased, the higher output power of narrow linewidth fiber laser will be achieved.

**Keywords:** fiber laser, narrow linewidth, phase modulation, nearly single mode

**PACS:** 42.55.Wd, 42.62.Fi, 42.60.Fc, 42.60.Jf

**DOI:** [10.7498/aps.63.134205](https://doi.org/10.7498/aps.63.134205)

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zlm200811@sina.com](mailto:zlm200811@sina.com)