

相位调制法抑制 2 μm 光纤激光受激布里渊散射效应的实验研究

伍惟骏 王雄 肖虎 周朴

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用相位调制法研究了调制电压与调制频率对 2 μm 光纤激光受激布里渊散射(SBS)效应抑制效果的影响。实验观测了当 SBS 产生时, Stokes 光的频移约 0.17 nm, 对应激光功率约为 120 mW。用半波电压为 3.5 V 的电光相位调制器对激光进行相位调制, 当调制频率为 1 MHz 和 5 MHz, 调制电压为 4 V 时, SBS 阈值分别为 250 mW 和 440 mW。固定调制电压, 提高调制频率, 阈值功率持续提升。调制频率大于 30 MHz 时, 在允许承受的功率范围内, 未观测到 SBS 产生。

关键词 光纤光学; 非线性光学; 相位调制; 受激布里渊散射; 2 μm 波段

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1005002

Experimental Study on Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in 2 μm -Band Fiber Laser Based on Phase Modulation

Wu Weijun Wang Xiong Xiao Hu Zhou Pu

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

Abstract Experiments are conducted based on phase modulation in order to research the suppression on stimulated Brillouin scattering (SBS) effect at different modulation frequencies and voltages. A 0.17 nm Stokes frequency shift without phase modulation is observed, and the corresponding SBS threshold is about 120 mW. The phase modulation is realized by an electro-optic modulator whose half-wave voltage is 3.5 V. When the modulation voltage is 4 V and the frequencies are 1 MHz and 5 MHz, respectively, and the SBS threshold power is 250 mW and 440 mW. When the modulation frequency increases, the threshold power continuously increases. When the modulation frequency is higher than 30 MHz, the SBS effect is not observed below the damage limited power.

Key words fiber optics; nonlinear optics; phase modulation; stimulated Brillouin scattering; 2 μm -band

OCIS codes 060.2310; 060.4370; 120.5060

1 引 言

近年来, 窄线宽激光器成为激光研究领域的热点。因其良好的时间相干性, 窄线宽激光器被广泛应用于通信、遥感、雷达等领域^[1-2]。当前, 国内外研究重点是 1.5 μm 波段掺 Er 激光器^[3-5] 和 1.0 μm 波段掺 Yb 激光器^[6-9]。受激布里渊散射(SBS)是制约窄线宽光纤激光器功率提升的重要因

素。相对于 1 μm 掺 Yb 和 1.5 μm 掺 Er 光纤激光, 2 μm 波段的掺 Tm 光纤可拥有更大的模场面积, SBS 阈值有望提升数倍^[10]。因此, 2 μm 波段窄线宽激光器在高功率输出方面具有巨大的潜能。

相位调制是提升 SBS 阈值的常用方法之一^[11]。目前, 国内外研究人员已利用此方法对 1 μm 和 1.5 μm 波段的 SBS 特性开展了大量的研究^[12-17],

收稿日期: 2014-01-16; 收到修改稿日期: 2014-03-20

作者简介: 伍惟骏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事大功率光纤激光器方面的研究。E-mail: wwj1313@qq.com

导师简介: 周朴(1984—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zhoupu203@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

但对于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的研究尚未见相关报道。由于在石英光纤中, Tm 离子的增益谱与 Yb、Er 等离子有较大区别^[18-19]。因此, 开展 $2\ \mu\text{m}$ 波段掺 Tm 激光器中 SBS 效应的研究具有重大的研究意义和研究价值。本文采用相位调制法, 对 $2\ \mu\text{m}$ 波段窄线宽激光的 SBS 特性开展实验研究, 重点分析调制电压与调制频率对抑制 SBS 效果的影响。

2 实验装置

实验结构如图 1 所示。种子源为单纵模光纤激光器, 中心波长为 $1971\ \text{nm}$, 线宽小于 $100\ \text{kHz}$, 最大输出功率为 $40\ \text{mW}$ ^[20]。种子源与 $2\ \mu\text{m}$ 波段电光相位调制器 (PM) 连接, 经过 $2\ \mu\text{m}$ 波段隔离器 (ISO) 后注入放大器 (AMP), 放大器采用 2 个波长为 $793\ \text{nm}$ 的激光二极管 (LD) 抽运, 总抽运功率可达 $16\ \text{W}$, 使用的光纤为双包层掺铒光纤, 在 $793\ \text{nm}$ 处吸收系数约为 $3\ \text{dB/m}$ 。放大器的输出端与 $2\ \mu\text{m}$ 波段环形器 (CIR) 相连接, 受限于环形器的承受功率, 环形器的输出端 2 可输出最大约为 $5\ \text{W}$ 信号光, 并连接长约 $450\ \text{m}$ 的单模传能光纤, 输出端切 8° 的斜角以防止端面反馈。在单模传能光纤中, 由于发生 SBS 效应所产生的后向 Stokes 光通过环形器的输出端 3 输出。在输出端用功率计、频谱仪等观察和分析 Stokes 光的功率、光谱特性。实验中所使用的光纤、LD 等设备均为商业化产品。

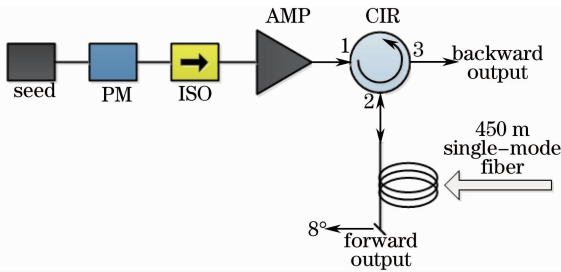


图 1 实验结构图

Fig. 1 Experimental setup

实验中, 通过控制放大器的输出功率来研究 SBS 特性, 用后向光功率的突变点来表征光纤中的 SBS 阈值。调节相位调制器的调制电压与调制频率, 观测 SBS 阈值的变化, 研究 SBS 阈值与调制电压和调制频率之间的关系。

3 实验结果及分析

未加相位调制时, 不断增大抽运电流, 当前向光功率约为 $120\ \text{mW}$ 时, 后向光功率产生突变, 此时认为产生 SBS 效应。继续加大电流, 后向光功率持续

上升。到达 SBS 阈值前的前向光与出现 SBS 之后的后向光光谱如图 2 所示, 可以看到, 图中后向光光谱中, Stokes 光与前向光相比产生约 $0.17\ \text{nm}$ 的布里渊频移, 而计算得到布里渊频移理论值为 $0.11\ \text{nm}$ ^[19]。实验中光谱仪的分辨率为 $0.05\ \text{nm}$, 实际测量值和理论测量值之间的差异可能是光谱仪分辨率不够所造成的。

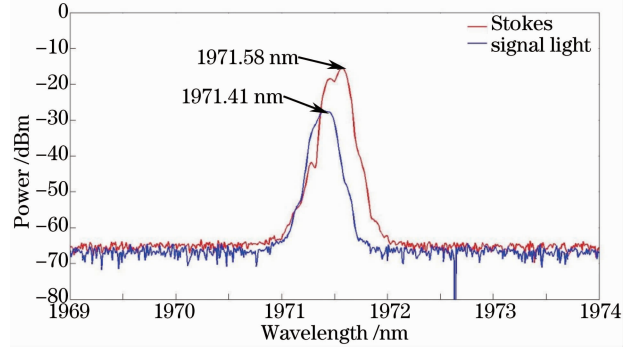


图 2 到达 SBS 阈值前后, 前向光与后向光光谱图

Fig. 2 Spectrum of forward propagating light before the appearance of SBS and the backward scattering light after the appearance of SBS

图 3 为电压为 $4\ \text{V}$ (峰峰值) 时不同调制频率 f 下的信号光与 Stokes 光功率关系图。当调制频率增大时, SBS 效应逐渐得到抑制, 频率为 $30\ \text{MHz}$ 以上时, 几乎不产生后向 Stokes 光。此外, 调制频率为 $1\ \text{MHz}$ 和 $5\ \text{MHz}$ 时, SBS 阈值分别为 $250\ \text{mW}$ 和 $440\ \text{mW}$ 。调制频率为 $5\ \text{MHz}$ 与调制频率为 $1\ \text{MHz}$ 时相比, 对于 SBS 抑制效果几乎提高一倍。在相同条件下, $5\ \text{MHz}$ 的调制频率几乎对 $1\ \mu\text{m}$ 波段和 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段激光没有任何效果^[12-13]。调制频率大于 $30\ \text{MHz}$ 后, 在允许的功率承受范围内, 未观测到明显功率突变, 即未产生后向 Stokes 光。

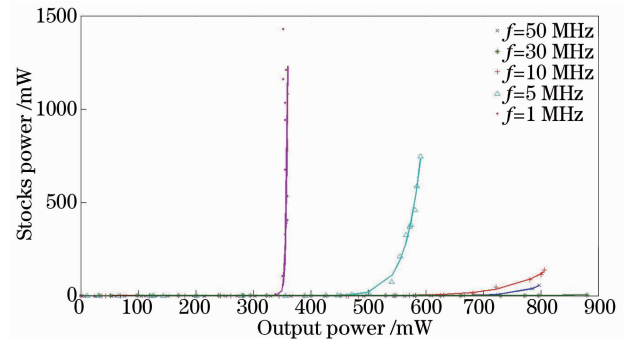
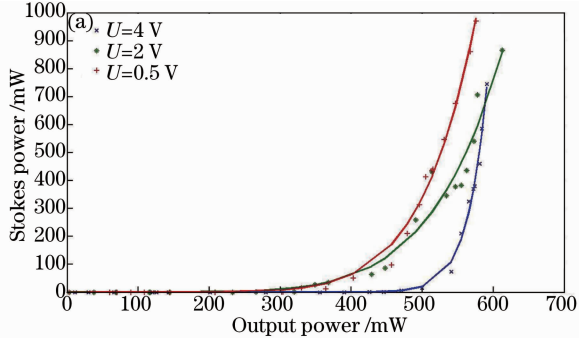


图 3 调制电压为 $4\ \text{V}$ 时, 不同频率下的前向光与后向光关系

Fig. 3 Backward scattering power versus the forward propagating power at different modulation frequencies when the modulation voltage is $4\ \text{V}$

图 4 给出了在调制频率为 5 MHz 和 30 MHz 的条件下,不同调制电压 U 下信号光与 Stokes 光的关系。将调制频率设为 5 MHz,不断增大电压,SBS 阈值功率持续提升,调制电压为 4,2,0.5 V 时,SBS 阈值功率分别为 440,340,304 mW。而在调制频率 30 MHz 的情况下,调节调制电压分别到 0.5 V 和



2 V, 阈值功率为 330 mW 和 640 mW。当增大调制电压到 4 V 时,在允许的功率承受范围内,未产生 SBS 效应。无论在 5 MHz 还是 30 MHz 时,增大调制电压,都有利于抑制 SBS 效应。调制频率为 30 MHz 时,对于 SBS 抑制效果比 5 MHz 更加明显。

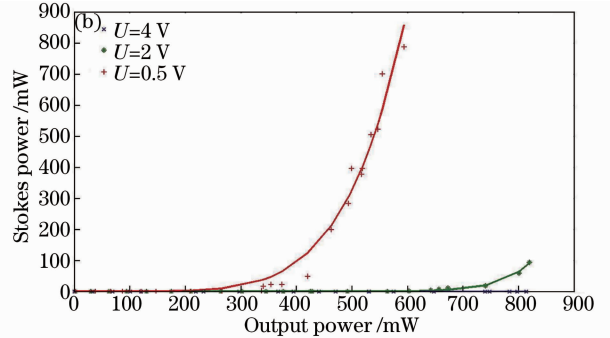


图 4 调制频率为(a) 5 MHz 和(b) 30 MHz 时,不同调制电压下的前向光与后向光关系

Fig. 4 Backward scattering power versus the forward propagating power at different modulation voltages when the modulation frequencies are (a) 5 MHz and (b) 30 MHz

实验还研究了调制电压为 4 V,到达 SBS 阈值时,入射单模光纤的光功率与调制频率之间的关系,如图 5 所示。由图可知,入射功率随着调制频率呈上升趋势。调制频率为 1~3 MHz 时,入射功率都约为 1400 mW,几乎体现不出对于 SBS 的抑制效果。而调制频率为 10 MHz 时的入射功率为 2600 mW,大约是 1 MHz 或未加调制时的两倍,SBS 阈值提升非常明显。

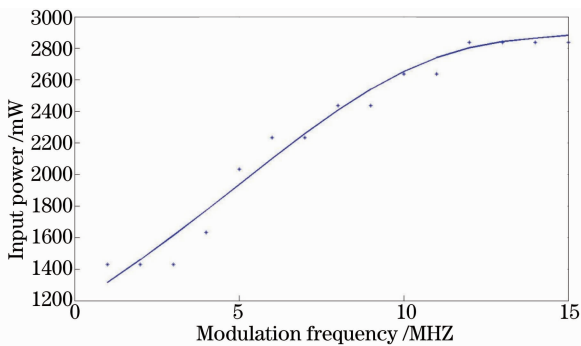


图 5 阈值功率与调制频率关系

Fig. 5 SBS threshold power versus the modulation frequency

以上实验现象皆与理论相符,当连续波激光器宽为 $\Delta\nu_p$ 时,SBS 阈值正比于 $(1 + \Delta\nu_p/\Delta\nu_B)$, $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽^[19]。由于增大调制电压与调制频率,均可使种子光频谱展宽^[12]。因此调制电压或者调制频率越大,SBS 阈值提升越多。相对于掺铯光纤激光, $2\ \mu\text{m}$ 掺铯光纤激光的布里渊增益谱宽仅为其 1/4,这使得相位调制法对于 $2\ \mu\text{m}$ 激光 SBS 效应

的抑制效果可达 $1\ \mu\text{m}$ 激光的数倍。同时,在归一化工作频率 V 相同时,掺铯光纤拥有更大的模场面积,可达到掺铯光纤的 4 倍^[21],从而进一步提高 SBS 的阈值。鉴于上述优点,掺铯光纤激光器有望成为获得高功率、窄线宽激光输出的重要方式。实验研究 $2\ \mu\text{m}$ 激光在光纤中的 SBS 特性,可为高功率、窄线宽光纤激光器的研究提供参考。

4 结 论

采用相位调制法实验研究了调制频率和调制电压对 $2\ \mu\text{m}$ 波段光纤激光 SBS 阈值特性的影响。采用环形腔结构分离前向信号光与后向 Stokes 光,并分别进行观测。当调制电压为 4 V,调制频率为 5 MHz 和 1 MHz 时,阈值功率为 250 mW 和 440 mW,与未加调制时相比分别提升近 1 倍和 3 倍。固定调制电压,提高调制频率,阈值功率持续提升。该结果对 $2\ \mu\text{m}$ 波段高功率、窄线宽光纤激光的研究具有一定参考价值。

参 考 文 献

- Hovis F E, Edelman J, Schum T, *et al.*. Recent progress on single frequency lasers for space and high altitude aircraft applications[C]. SPIE, 2008, 6871; 68710E.
- Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Xue Dong. Progresses of narrowlinewidth fiber lasers[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(1): 1-4.
- 叶震寰, 楼祺洪, 薛东. 窄线宽光纤激光器进展[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(1): 1-4.
- Meng Zhou, Stewart George, Whitenett Gillian. Stable single-

- mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(5): 2179–2183.
- 4 Spiegelberg Christine, Geng Jihong, Hu Yongdan, *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003)[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 57–62.
- 5 Zhang Kang, Kang Jin U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Opt Express*, 2008, 16(18): 14173–14179.
- 6 Xu S, Li C, Zhang W, *et al.*. Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 501–503.
- 7 Xu S, Yang Z, Zhang W, *et al.*. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb³⁺ doped phosphate fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3708–3710.
- 8 Paschotta R, Nilsson J, Reekie L, *et al.*. Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(1): 40–42.
- 9 Zeil P, Pasiskevicius V, Laurell F. Efficient spectral control and tuning of a high-power narrow-linewidth Yb-doped fiber laser using a transversely chirped volume Bragg grating [J]. *Opt Express*, 2013, 21(4): 4027–4035.
- 10 Moulton P F. High power Tm: silica fiber lasers: current status, prospects and challenges[C]. *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/EUROPE EQEC)*, 2011 Conference on and 12th European Quantum Electronics Conference. IEEE, 2011. 1–1.
- 11 Korotky S K. Multifrequency Lightwave Source Using Phase Modulation for Suppressing Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers[P]. US Patent 5566381. 1996.
- 12 Du Wenbo, Wang Xiaolin, Han Kai, *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high power narrow-linewidth fiber amplifier with phase modulation [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1105009.
杜文博, 王小林, 韩 凯, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1105009.
- 13 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.
- 14 Chen Wei, Meng Zhou. Effects of modulation amplitude and frequency of frequency-modulated fiber lasers on the threshold of the stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(12): 1124–1126.
- 15 Yang Jianliang, Guo Zhaonan, Zha Kaide. 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.
- 16 Liu Yingfan, Lu Zhiwei, Dong Yongkang, *et al.*. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 07(1): 29–31.
- 17 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): 0814003.
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): 0814003.
- 18 Goodno Gregory D, Book Lewis D, Rothenberg Joshua E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1204–1206.
- 19 Govind P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics, Second Edition*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 245–246.
Govind P Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用(第二版)*[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010. 245–248.
- 20 Jihong Geng, Qing Wang, Tao Luo, *et al.*. Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(22): 3493–3495.
- 21 Goodno Gregory D, Book Lewis D, Rothenberg Joshua E. Narrow linewidth power scaling and phase stabilization of 2 μm thulium fiber lasers[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(11): 111608.

栏目编辑: 王晓球