

相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响

陈 伟 孟 洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 相位调制是光纤中提高受激布里渊散射阈值、抑制受激布里渊散射效应的有效方法。理论分析了相位调制中调制幅度及调制频率的改变对受激布里渊散射阈值的影响, 实验研究了 25 MHz 调制频率、不同调制幅度以及调制幅度为 1.5, 不同调制频率下受激布里渊散射阈值的变化情况。结果表明, 受激布里渊散射阈值既随相位调制幅度的增大而增大, 又随相位调制频率的增大而增大。当相位调制幅度为 7.7, 相位调制频率为 25 MHz 时, 受激布里渊散射阈值提高约 7 dB。当相位调制幅度为 1.5, 相位调制频率较小为 5 MHz 时, 相位调制对受激布里渊散射阈值的影响不够明显。

关键词 光纤光学; 受激布里渊散射; 相位调制; 阈值

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0305002

Effects of Phase Modulation on Threshold of Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers

Chen Wei Meng Zhou

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

Abstract Phase modulation is an effective method to increase the threshold of the stimulated Brillouin scattering. Effects of modulation amplitude and frequency on the threshold are analyzed in theory. Experiments at different modulation amplitudes and frequencies are conducted to investigate the variance of the threshold. It is shown that the threshold increases with not only the modulation amplitude but also the modulation frequency. When the modulation amplitude is 7.7 and the modulation frequency is 25 MHz, the threshold is improved by about 7 dB. When the modulation amplitude is 1.5 and the modulation frequency is as small as 5 MHz, the effect of phase modulation on the threshold is not obvious.

Key words fiber optics; stimulated Brillouin scattering; phase modulation; threshold

OCIS codes 060.2430; 060.4370; 060.5060

1 引 言

随着光纤传输距离以及入纤功率的增大, 光纤中非线性效应(如受激布里渊散射^[1]、受激拉曼散射^[2]、四波混频^[3,4]、自相位调制和交叉相位调制^[5,6]等)的影响日益显著。受激布里渊散射是光纤中一种非常重要的非线性效应, 它源于光波与声波间的相互作用。当光纤入射功率超过受激布里渊散射阈值时, 大部分功率将转移至频率较低的后向

斯托克斯光, 斯托克斯光功率迅速增长, 即发生了受激布里渊散射。对于 1.55 μm 的光通信系统而言, 其受激布里渊散射阈值可低至 1 mW^[7], 使得受激布里渊散射成为限制入纤功率的最主要因素。为增大入纤功率, 人们采用多种方法提高受激布里渊散射阈值, 包括相位调制法^[8~10]、频率抖动法^[11]、沿光纤引入参量(如温度、压力、芯径和布里渊频移等)变化^[12~15]、改变光纤横向声学特性^[16]等。在这些方

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2010-11-10

基金项目: 新世纪优秀人才项目(NCET-06-0925)资助课题。

作者简介: 陈 伟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤非线性效应方面的研究。E-mail: kevinkobegames@126.com

导师简介: 孟 洲(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: zhoumeng6806@163.com(通信联系人)

法中,相位调制法通过相位调制器给激光引入外加相位调制,将一部分能量分布到激光的一系列边频上,从而降低了光功率谱的能量密度,以此实现对受激布里渊散射的抑制。相位调制法以其结构简单、不会引入附加的幅度调制等优点日益受到人们的重视。现有的单频相位调制抑制受激布里渊散射的研究主要针对调幅副载波复用(AM-SCM)系统^[17]和调幅有线电视(AM-CATV)系统^[18],且研究重点放在相位调制对受激布里渊散射阈值的影响上。文献^[17,18]在使用电放大器即对调制信号进行电学放大后再输入相位调制器的情况下可将受激布里渊散射阈值提高 5 dB 和 8 dB。

本文针对未引入强度调制的光纤传输系统,不但研究了相位调制幅度对受激布里渊散射阈值的影响,还研究了相位调制频率对受激布里渊散射阈值的影响。在未使用电放大器的情况下,当相位调制幅度和频率分别为 7.7 和 25 MHz 时,受激布里渊散射阈值提高约 7 dB。

2 理论分析

假设光波的电场强度为

$$E = E_0 \exp(i2\pi\nu_0 t), \quad (1)$$

式中 E_0 和 ν_0 分别为电场的振幅和频率。经过调制度为 M , 调制频率为 ν_m 的相位调制器后, 电场强度为

$$E = E_0 \exp[i2\pi\nu_0 t + iM \sin(2\pi\nu_m t)]. \quad (2)$$

假设光波经过频偏为 $\Delta\nu$, 调制频率为 ν_m 的频率调制, 则电场强度为

$$\begin{aligned} E &= E_0 \exp(i2\pi\nu t) = \\ &E_0 \exp\{i2\pi[\nu_0 + \Delta\nu \cos(2\pi\nu_m t)]t\} = \\ &E_0 \exp[i2\pi\nu_0 t + i2\pi\Delta\nu \int_0^t \cos(2\pi\nu_m \tau) d\tau] = \\ &E_0 \exp[i2\pi\nu_0 t + i(\Delta\nu/\nu_m) \sin(2\pi\nu_m t)]. \end{aligned} \quad (3)$$

比较(2),(3)式可得

$$M = \Delta\nu/\nu_m. \quad (4)$$

文献^[19]中给出受激布里渊散射的阈值公式为

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_s}{\Delta\nu_B}\right), \quad (5)$$

式中 K 为偏振因子, 对于偏振完全混乱的情况, 取 $K=2$; g_B 为布里渊增益峰值; A_{eff} 和 L_{eff} 分别为光纤的有效面积和有效长度; $\Delta\nu_s$ 为激光线宽, 可近似认为 $\Delta\nu_s = 2\Delta\nu$; $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽, 约为 50 MHz, 当 $\Delta\nu_s \ll \Delta\nu_B$ 时, $\Delta\nu_s/\Delta\nu_B \approx 0$, 即激光线宽对受激布里渊散射阈值的影响可以忽略。将(4)式代入(5)式可得

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{2M\nu_m}{\Delta\nu_B}\right). \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 受激布里渊散射阈值将随调制幅度 M 和调制频率 ν_m 的增大而增大。

经过相位调制, 光波将产生一系列边频。受激布里渊散射阈值随相位调制频率的变化的另一物理解释为: 当相位调制频率较小特别是小于布里渊增益带宽时, 不同边频产生的布里渊增益谱将会相互叠加, 使后向斯托克斯光有所增强, 从而引起受激布里渊散射阈值的减小。

3 实验装置与结果

实验装置如图 1 所示。光源采用窄线宽半导体激光器(HY-NL-M), 输出光功率为 10.28 dBm, 中心波长为 1550.13 nm, 线宽小于 20 kHz, 远小于 $\Delta\nu_B$, 故可不考虑激光器自身线宽对受激布里渊散射阈值的影响。相位调制器(PMS1300-M)采用铌酸锂波导调制器, 调制信号由信号源(Tektronix, AFG 3022B)产生。光波经相位调制后, 再经掺铒光纤放大器(EDFA)、可调光衰减器(VOA)和环行器进入 50 km 的 G652 光纤, 利用光功率计测量前向输出和后向散射的光功率。

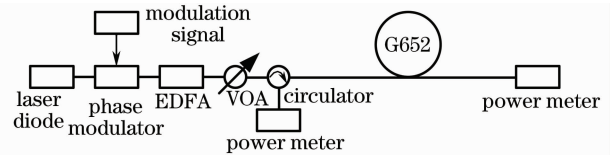


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

图 2 给出了调制频率为 25 MHz 时后向散射光功率随入射功率的变化曲线, 为便于比较, 同时给出了不加相位调制时的曲线。从图中可以看出, 当不加相位调制时, 受激布里渊散射阈值约为 4 mW, 当调制幅度分别为 1.2, 1.4 和 1.5 时, 受激布里渊散射阈值分别被提高至 5, 8 和 10 mW, 即在调制频率不变的情况下, 受激布里渊散射阈值随调制幅度的增大而增大, 实验结果与理论分析一致。图 3 给出了上述各种情况下当入射功率为 10 mW 时的后向散射光谱图, 采用的光谱仪型号为 ADVANTEST Q8384, 分辨率设为 0.02 nm。图 3 中从右至左的波峰分别对应斯托克斯光、瑞利光和反斯托克斯光, 其波长分别为 1550.22, 1550.13 和 1550.04 nm, 其中高频的反斯托克斯光由光纤介质吸收入射激光和声波的能量产生。3 个波峰之间的波长间隔为 0.09 nm, 这与石英光纤在波长 1550 nm 附近的布

里渊频移理论值一致^[7]。还可以看出调制幅度越大,斯托克斯光被抑制得越明显。图 4 给出了调制幅度为 7.7,调制频率为 25 MHz 时的曲线,受激布里渊散射阈值被提高至 20 mW,与不加相位调制时相比,阈值提高了约 7 dB。

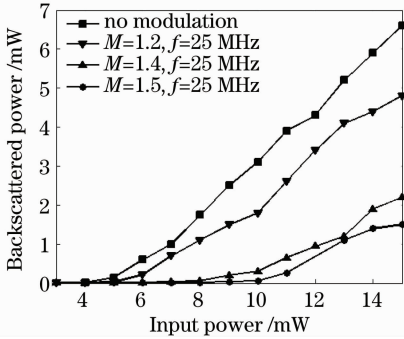


图 2 调制频率为 25 MHz 时后向散射光功率随入射功率的变化

Fig. 2 Backscattered power versus input power at 25-MHz modulation frequency

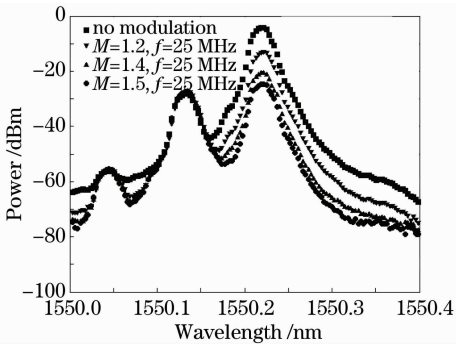


图 3 入射功率为 10 mW,调制频率为 25 MHz 时的后向散射光谱

Fig. 3 Backscattered spectra at 10-mW input power and 25-MHz modulation frequency

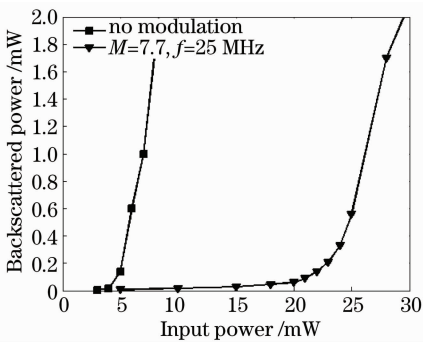


图 4 不加相位调制和调制幅度为 7.7,调制频率为 25 MHz 时后向散射光功率随入射功率的变化

Fig. 4 Backscattered power versus input power without modulation and when the modulation amplitude and frequency are 7.7 and 25 MHz

图 5 给出了调制幅度为 1.5 时后向散射光功率随入射功率的变化曲线,同时给出不加相位调制时的曲线以作比较。从图中可以看出,当加 5,15 和 25 MHz 的调制频率时,受激布里渊散射阈值分别被提高至 5,8 和 10 mW,即在调制幅度不变的情况下,受激布里渊散射阈值随调制频率的增大而增大,实验结果与理论分析一致。图 6 给出了入射功率为 10 mW 时相应的后向散射光谱图,可以看出调制频率越大,斯托克斯光被抑制得越明显。还可以看出,当调制幅度为 1.5,调制频率为 5 MHz 时,后向散射光谱几乎与不加调制时重合,即此时并未产生抑制效果,说明当调制频率较小时,相位调制对受激布里渊散射阈值的影响不够明显。这是由于此时调制频率小于布里渊增益带宽,经相位调制产生的不同边频的布里渊增益谱相互叠加,从而增强了后向斯托克斯光,大大降低了对后向斯托克斯光的抑制程度。

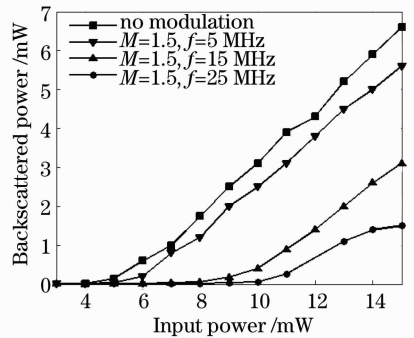


图 5 调制幅度为 1.5 时后向散射光功率随入射功率的变化

Fig. 5 Backscattered power versus input power when the modulation amplitude is 1.5

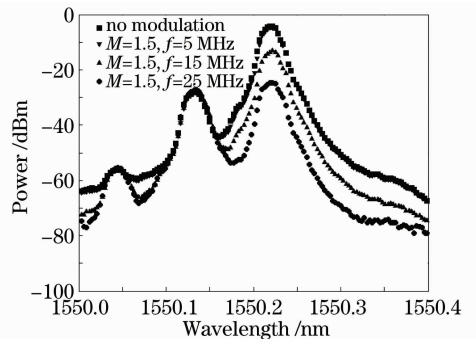


图 6 入射功率为 10 mW,调制幅度为 1.5 时的后向散射光谱

Fig. 6 Backscattered spectra when the input power is 10 mW and the modulation amplitude is 1.5

值得注意的是,单频相位调制法提高受激布里渊散射阈值的能力既取决于信号源所能提供的调制

电压和调制频率的大小,又取决于相位调制器的射频极限输入功率和其所能响应的最大调制频率。实际应用中要在确保相位调制器正常工作的前提下,尽量提高调制电压和调制频率,从而获得较高的受激布里渊散射阈值。实验中所用信号源的最大调制电压为 10 V(对应最大调制幅度为 7.7),最大调制频率为 25 MHz,在未使用电放大器的情况下,最大可将受激布里渊散射阈值提高约 7 dB。

4 结 论

利用相位调制可提高光纤传输系统中受激布里渊散射的阈值。理论分析并实验研究了受激布里渊散射阈值随相位调制幅度和频率的变化情况,研究表明,受激布里渊散射阈值既随相位调制幅度的增大而增大,又随相位调制频率的增大而增大。在未使用电放大器的情况下,当调制幅度为 7.7,调制频率为 25 MHz 时,受激布里渊散射阈值由 4 mW 增大到 20 mW,提高约 7 dB。当调制幅度为 1.5,调制频率为 5 MHz 时,后向散射光谱几乎与不加调制时重合,说明相位调制频率较小时对受激布里渊散射阈值的影响不够明显。

参 考 文 献

- Wei Chen, Zhou Meng. Stimulated Brillouin scattering effect on gain saturation of distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 365~367
- Wang Zhengping, Hu Dawei, Zhang Huaijin *et al.*. High efficiency stimulated Raman scattering of BaWO₄ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2130~2134
王正平, 胡大伟, 张怀金 等. BaWO₄ 晶体的高效受激拉曼散射 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2130~2134
- Dong Ze, Cao Zizheng, Lu Jia *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2952~2956
董 泽, 曹子峥, 卢 嘉 等. 基于半导体光放大器的四波混频效应对正交频分复用光信号进行全光波长变换 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2952~2956
- Du Jianxin. Degenerate four-wave-mixing noise in dispersion managed wavelength-division-multiplexed system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2361~2367
杜建新. 色散管理波分复用系统中的简并四波混频噪声 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2361~2367
- Zhang Huan, Li Wei, Mei Junyao *et al.*. Transmission penalty of dynamical optical networks considering accumulation effects of XPM and ASE noises [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1111~1117
张 欢, 李 蔚, 梅君瑶 等. 动态光网络中交叉相位调制和放大自发辐射噪声积累效应的传输代价 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1111~1117
- Zhong Xianqiong, Xiang Anping. Modulation instability induced

- by cross-phase modulation in case of high-order dispersion and saturable nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 391~397
钟先琼, 向安平. 高阶色散和饱和非线性下的交叉相位调制不稳定性 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 391~397
- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 223~226
阿戈沃. *非线性光纤光学原理及应用(第三版)* [M]. 贾东方 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 223~226
- Yang Jianliang, Zha Kaide, Tu Tao. Theoretical analysis on laser dithering for SBS and MPI suppression in externally modulated optical fiber CATV [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1): 53~57
杨建良, 查开德, 涂 涛. 外调制光纤 CATV 中 SBS 与 MPI 的激光器高频微扰抑制理论分析 [J]. *光子学报*, 2000, **29**(1): 53~57
- 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相抑制 SBS 的理论分析 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 724~728
- 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, **A28**(5): 439~442
- Wei Chen, 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
- J. Hansryd, F. Dross, M. Westlund *et al.*. Increase in the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(11): 1691~1697
- N. Yoshizawa, T. Imai. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(10): 1518~1522
- K. Shiraki, M. Ohashi, M. Tateda. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(8): 668~669
- C. A. S. de Oliveira, C. K. Jen, A. Shang *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in cascaded fibers of different Brillouin frequency shift [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(6): 969~972
- M. J. Li, X. Chen, J. Wang *et al.*. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8290~8299
- 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 Photonic Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1476~1478
- F. W. Willems, J. C. van der Plaats, W. Muys. Harmonic distortion caused by stimulated Brillouin scattering suppression in externally modulated lightwave AM-CATV systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(4): 343~345
- 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