

基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制

谢淑平 许国良

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 利用相位调制器提升受激布里渊散射阈值,理论分析了相位调制器的调制深度及调制频率对受激布里渊散射阈值的影响。阈值提升量由调制深度确定,调制深度与半波电压有关。提出了外差法测量相位调制器的半波电压以便确定调制深度。实验测得相位调制器在调制频率 50 MHz 时的半波电压为 3.7 V。实验研究了相位调制器调制频率为 50 MHz,调制深度分别为 1.435、2.631 时的单模光纤受激布里渊散射阈值变化,其中调制深度为 2.631 时的受激布里渊散射阈值提高了 6.7 dB,实验结果与理论计算值相符。在较小的驱动功率、较低的调制频率下获得了较高的受激布里渊散射阈值提升。

关键词 光纤光学;受激布里渊散射;相位调制;半波电压

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0206003

Suppression on Fiber Stimulated Brillouin Scattering Based on Phase Modulation

Xie Shuping Xu Guoliang

(*Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University,
Nanjing, Jiangsu 210093, China*)

Abstract The phase modulator is used to increase the threshold of the stimulated Brillouin scattering. Effects of modulation depth and frequency on the threshold are analyzed. The increase of the threshold is determined by the modulation depth which is related to the half-wave voltage. A heterodyne method to measure the half-wave voltage of the phase modulator is proposed in order to determine the modulation depth. The results of the experiments demonstrate that the half-wave voltage is 3.7 V when modulation frequency is 50 MHz. The variation of the stimulated Brillouin scattering threshold are researched through experiments when the modulation frequency is 50 MHz and modulation depth is 1.435 and 2.631. Results show that the threshold increases 6.7 dB when modulation depth is 2.631, which matches the theoretic calculation. High threshold is obtained with low power and low modulation frequency.

Key words fiber optics; stimulated Brillouin scattering; phase modulation; half-wave voltage

OCIS codes 060.2430; 060.4370; 060.5060

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)过程可经典地描述为抽运波、斯托克斯(Stokes)波通过声波进行的非线性相互作用,抽运波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,从而导致对光波的散射^[1]。抑制受激布里渊散射在许多方面具有重要的

实用价值。对于窄线宽光纤放大器来说,抑制 SBS 可防止 SBS 中后向传输的 Stokes 光给前级系统带来损坏,同时可以提高窄线宽光纤放大器的最高输出功率^[2]。在光纤有线电视(CATV)系统中,抑制 SBS 同样可防止后向 Stokes 光进入光源使激光振荡产生不稳定现象,同时避免激光器的相对强度噪

收稿日期: 2012-08-21; **收到修改稿日期**: 2012-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(60602001)、江苏省自然科学基金(BK2010379)和中央高校基本科研项目(14340039, 14340003)资助课题。

作者简介: 谢淑平(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yangqing216@126.com

导师简介: 许国良(1973—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光通信系统、器件及其关键技术,光网络健康检测和性能监控、通信网络规划和设计等方面的研究。E-mail: xugl@nju.edu.cn(通信联系人)

声及系统的复合二阶失真恶化^[3]。在光通信系统中,抑制 SBS 可保证通信的信号质量,提升通信系统的信噪比和通信距离^[4]。

光纤中 SBS 的抑制方法主要有激光器高频抖动法和相位调制法,另外还有利用入射光的偏振态对 SBS 的抑制法以及色散补偿法,但色散补偿法中拉曼放大器成本较高,只适用于一些特殊场合。激光器高频抖动法是利用一高频小幅度信号对激光进行附加强度调制,由于激光的频率啁啾效应,使发射光的光谱展宽,提高 SBS 阈值,但该方法会引起附加幅度调制、附加色散效应等一系列问题。相位调制法即在正常的强度调制器前或后对传输光引入附加相位调制,将光信号能量分布到大量的光载波上,降低光功率谱能量密度,提高 SBS 的阈值^[5~7]。目前相位调制抑制受激布里渊散射的研究主要针对调幅载波复用(AM-SCM)系统和调幅有线电视(AM-CATV)系统^[8]。SBS 的抑制是外调制光纤 AM-CATV 系统走向实用化的关键技术之一^[9]。

大多数研究相位调制器对 SBS 抑制的文献中都没有测量相位调制器的半波电压^[2,3,8,9]。由于半波电压随着调制频率的变化而变化,因此将半波电压视为常数可能造成实验数据的不准确,实验时应测量特定调制频率下半波电压的具体值。现有的介绍测量半波电压的文献中提到的主要方法有光通信模拟法,极值测量法和倍频调制法等^[10~13],但大多方法繁琐、存在系统误差或不适于在提升 SBS 阈值实验中使用。本文提出了外差法测量半波电压,从而准确控制相位调制器的调制深度。在调制频率 50 MHz,调制深度 2.631 时,使 SBS 的阈值提升了 6.7 dB。

2 理论分析

当光通过相位调制器中的电光晶体时,光波相位受到调制。假设输入相位调制器的单频光波场强为 $E_{in} = A_0 \exp(j\omega t)$,经电光晶体调制后,引入新的相位 $\Phi(t)$ 。输出的光波场强可表示为

$$E_{out} = A_0 \exp\{j[\omega t + \Phi(t)]\},$$

式中 $\Phi(t) = A_m \sin \omega_m t$ 。式中 ω_m 为调制频率, A_m 为调制深度, ω 为输入光的频率, A_0 为输入光的振幅。若存在母函数

$$G(x, z) = \exp\left[\frac{x}{2}\left(z - \frac{1}{z}\right)\right], \quad (0 < |z| < \infty),$$

则有

$$G(x, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(x) z^n,$$

式中 $J_n(x)$ 称为第一类贝塞尔函数。利用上述公式,可对输出场强进一步展开^[14]:

$$\begin{aligned} E_{out} &= A_0 \exp\{j[\omega t + \Phi(t)]\} = \\ &= A_0 \exp(j\omega t) \exp(jA_m \sin \omega_m t) = \\ &= A_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(A_m) \exp[j(\omega + n\omega_m)t]. \end{aligned} \quad (1)$$

式中的调制深度为^[9]

$$A_m = \frac{V}{V_\pi} \cdot \pi, \quad (2)$$

式中 V 为射频驱动信号的电压, V_π 为相位调制器的半波电压,定义为光波的相位变化为 π 时所加的射频电压。由(1)式可见,调制后的光为多频光,且各频率光的振幅对应于由调制深度决定的贝塞尔函数值。

理论及实验研究已经表明,使用单个调制信号时相位调制法对 SBS 阈值的提升量 $\Delta P_{SBS}^{th}(A_m)$ 可以表示为^[15]

$$\Delta P_{SBS}^{th}(A_m) = -10 \lg[\max_{n \in \{0,1,2,\dots\}} J_n^2(A_m)]. \quad (3)$$

因此,单频相位调制对受激布里渊散射阈值的提升量仅由调制深度决定,只要调制深度确定,便可由(3)式得出 SBS 阈值的提升量。但是有两点值得注意:1)当调制频率过低时,多频光的受激布里渊增益谱互相叠加,有可能导致阈值提升达不到预期值;2)当调制频率有较大变化时,相位调制器的半波电压的变化不可忽略,此时需测量出新的半波电压,才能确定调制深度。文献[14]在进行不同调制频率对 SBS 阈值影响的实验中发现,相位调制器的驱动电压不变的条件下,当调制频率超过 40 MHz 时, SBS 阈值的提升量较大,而调制频率小于 40 MHz 时, SBS 阈值提升量很小。本实验选择调制频率 50 MHz。

图 1 显示了不同调制深度下相位调制器输出的几个主要频率的归一化功率变化曲线,各阶频率分别对应贝塞尔函数的阶数。从图中可以看出,当调制深度为 1.435 时,0 阶功率和 ± 1 阶功率相等, ± 2 阶功率约比 0 阶小 8 dB,按(3)式计算出 SBS 阈值提升 5.2 dB。当调制深度为 2.405 时 0 阶功率最低,比 ± 1 阶小约 20 dB。调节相位调制器的驱动电压使 0 阶及 ± 1 阶功率相等,那么就可轻松算出相位调制器的半波电压,同样道理将 0 阶频率调至最低,也可算得半波电压值。

从图 1 中也可看出,当相位调制器的调制深度小于 3 时,最佳调制深度为 2.631,此时对应的 SBS

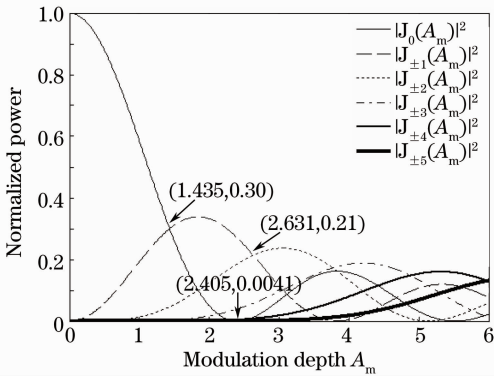


图 1 相位调制器的调制深度与功率谱关系图
Fig. 1 Power spectrum versus modulation depth of phase modulator

阈值提升 6.7 dB。只要给定调制深度的范围,便可从图 1(按需要对横坐标的值及贝塞尔阶数进行扩展)中找到最佳的调制点,使 SBS 阈值提升最大,并得出具体的提升量,前提是要准确获得相位调制器的半波电压。

3 实验内容与结果

3.1 相位调制器半波电压的测量

在进行 SBS 阈值测量的实验之前,首先测量相位调制器的半波电压。测量装置如图 2 所示。

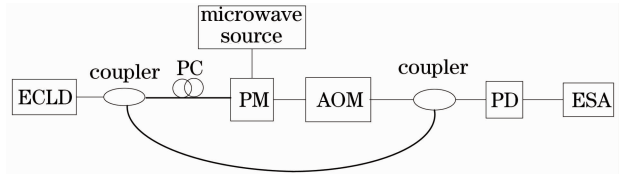


图 2 外差法测量相位调制器半波电压示意图
Fig. 2 Schematic of the measurement of half-wave voltage of phase modulator with heterodyne method

外腔式半导体激光器(ECLD)用作光源,最大输出功率 12 mW,中心波长 1561.42 nm,线宽小于 4 kHz。经 90/10 的耦合器后,其中一路(10%)用作本振光,另一路(90%)接偏振控制器(PC)后进入相位调制器(PM)。微波源用来产生正弦调制信号。调制后的多频光经声光调制器(AOM)移频后与本振光外差产生中频信号,移频量为 200 MHz。最终由带宽为 800 MHz 的平衡探测器(PD)和频谱仪(ESA)观察到多频光的频谱。实验结果得到的未加调制信号时的单频光频谱以及调制频率为 50 MHz,调制深度为 2.405 时的多频光频谱见图 3。对比图 3(b)中各阶功率值的相对大小,与理论分析完全一致,此时对应的微波源射频信号的电压为 2.82 V,于是由(2)式即可算出相位调制器在 50 MHz 调制频率下的半波电压为 3.7 V。

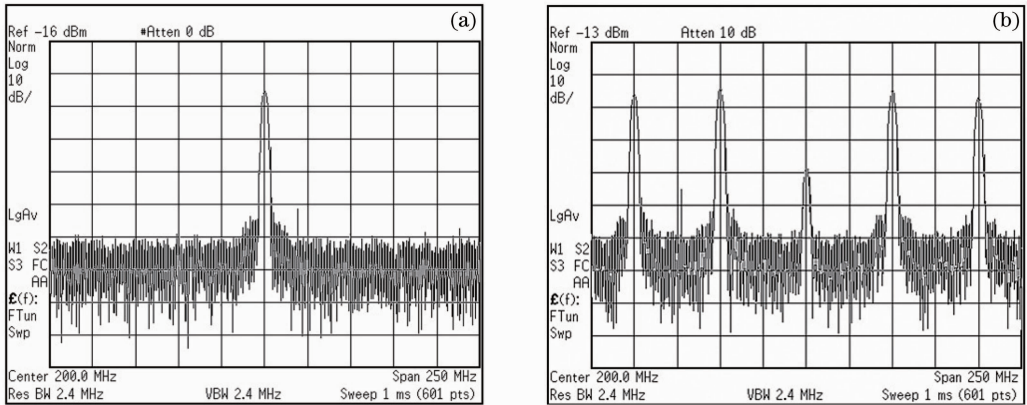


图 3 (a)经相位调制器之前的光源的频谱图;(b)调制频率 50 MHz,调制深度 2.405 时对应的频谱图
Fig. 3 (a) Light spectrum before phase modulator; (b) power spectrum when modulation frequency is 50 MHz and modulation depth is 2.405

3.2 相位调制法提升 SBS 阈值

实验装置如图 4 所示,光源、偏振控制器、相位调制器及微波源与 3.1 节中的实验相同。经相位调制器输出的多频光经掺铒光纤放大器(EDFA)和可调节衰减器(VOA)后注入 24 km 长的 G652 单模光纤,利用光功率计测量输入和输出的光功率。将相位调制器的正弦调制信号设置为调制频率

50 MHz、调制深度 2.631(从 3.1 节中实验得到,对应的频谱图如图 5 所示),逐步减小衰减量,并依次记录两个功率计的值以便得出 SBS 阈值。

实验还测量了未加调制以及调制深度为 1.435 时的 SBS 阈值。最终得出受激布里渊散射阈值与调制深度的关系,如图 6 所示。

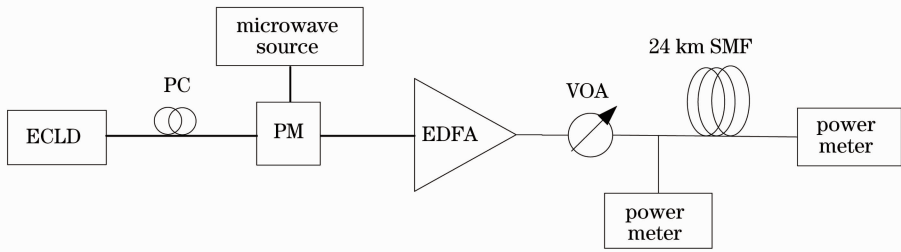


图 4 相位调制法提升 SBS 阈值的实验示意图

Fig. 4 Schematic of the experiment to increase SBS threshold based on phase modulation

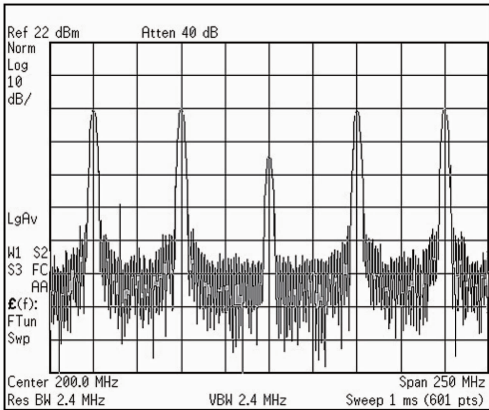


图 5 调制频率为 50 MHz, 调制深度为 2.631 时对应的频谱图

Fig. 5 Power spectrum when modulation frequency is 50 MHz and modulation depth is 2.631

不会导致 SBS 增益谱相互叠加, 如调制频率继续增加, 除引起半波电压变化外对阈值的进一步提升并无贡献。

4 结 论

使用相位调制的方法提升了 SBS 阈值。理论分析了调制深度及调制频率对 SBS 阈值的影响。介绍了计算 SBS 阈值提升量以及测量相位调制器半波电压的方法。使用外差法简单、迅速地测出了相位调制器在 50 MHz 调制频率下的半波电压, 在此基础上, 通过计算得出单个调制信号时调制深度小于 3 的范围内 SBS 阈值提升量最大时的调制参数, 并进行了实验。实验结果与理论计算相吻合, 在调制频率 50 MHz, 调制深度为 2.631 时, 单频调制使 SBS 的阈值提升了近 7 dB。

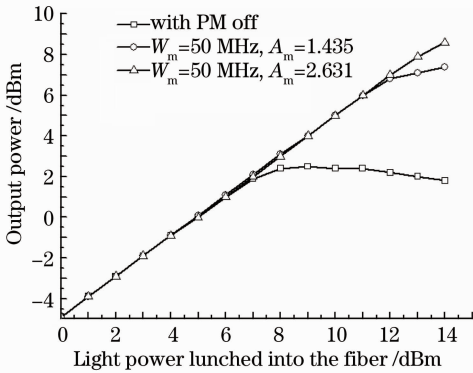


图 6 受激布里渊散射阈值与调制深度的关系

Fig. 6 SBS threshold versus modulation depth

从图 6 中明显可以看出, 线性范围内输出功率比输入功率小 5 dB, 这是由于光纤的损耗造成的。当相位调制器的调制信号关闭时, 输入功率达到 7 dBm 后输出功率不再随着输入功率的增加而增加, 意味着此时的 SBS 阈值为 7 dBm。当调制频率为 50 MHz, 调制深度为 1.435 时, SBS 阈值约为 12.2 dBm, 提升了 5.2 dB; 调制深度为 2.631 时, 阈值约为 13.7 dBm, 提升了 6.7 dB。实验结果与理论计算完全相符。也表明 50 MHz 的调制频率已经

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics, Third Edition [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
- Leng Jinyong. Theoretical and Experimental Research on Narrow-linewidth Fiber Amplifiers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 2~3
冷进勇. 窄线宽光纤放大器的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 2~3
- Yang Jianliang, Zha Kaide. Two signal phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV transmission system [J]. Chinese J. Lasers, 2000, 27(8): 724~728
杨建良, 查开德. 光纤 AM-CATV 外调制传输系统中双频调制抑制 SBS 的理论分析[J]. 中国激光, 2000, 27(8): 724~728
- Zhao Lijuan. Analysis and calculation of SBS threshold in single mode fibers [J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2009, 3(3): 24~25
赵丽娟. 单模光纤受激布里渊散射阈值分析与计算[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009, 3(3): 24~25
- C. Tang, G. Reed. Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides [J]. Electron. Lett., 1995, 31(6): 451~452
- S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou et al.. Single side-band modulation performance of a LiNiO₃ integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2001, 13(4): 364~366

- 7 Liu Yingfan. Generation and Applications of Equal-Amplitude Optical Comb Based on Multi-Phase Modulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 11~13
刘英繁. 基于相位调制的等幅光梳产生及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008. 11~13
- 8 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
- 9 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
- 10 Sun Jian, Mou Haiwei, Liu Shiqing *et al.*. Measurement of half-wave voltage in electro-optic modulation experiment [J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(3): 212~215
孙鉴, 牟海维, 刘世清等. 电光调制实验中半波电压的测量[J]. 光电子技术, 2007, **27**(3): 212~215
- 11 Wei Zhengjun, Li Huazeng, Wang Jindong *et al.*. A new method to measure half-wave voltage of phase modulator based on Sagnac optical-fiber interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612006
魏正军, 李华程, 王金东等. 基于萨尼亚克光纤干涉仪的相位调制器半波电压的测量方法[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0612006
- 12 Y. Di, P. Gardner, H. Ghafouri-Shiraz. Methods for measuring the rf half-wave voltage of LiNbO₃ optical modulators [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **46**(5): 440~443
- 13 Guo Minglei, Han Xinfeng, Zhang Maolian. Frequency doubling method for half-wave voltage measurement based on electro-optical modulation [J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **31**(1): 106~109
郭明磊, 韩新风, 章毛连. 电光调制晶体半波电压倍频测量方法的讨论[J]. 应用光学, 2010, **31**(1): 106~109
- 14 Lü Lidong. Research on Frequency Division Multiplexing Probe Based Coherent Optical Time Domain Reflectometry [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012. 31~33
吕立冬. 频分复用相干光时域反射系统研究[D]. 南京:南京大学, 2012. 31~33
- 15 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 Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1476~1478

栏目编辑: 李文喆