

光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究

王振宝 邵碧波 张磊 闫燕 杨鹏翎 陈绍武

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 受激布里渊散射(SBS)是光纤中一种非常重要的非线性效应,并且其阈值较低,在光纤中极易产生,造成光纤系统中作为信号载体的入射光的能量损耗,并且其后向散射光有可能对光源造成损害,从而限制进入光纤功率及系统的传输距离。从受激布里渊散射的基本原理出发,分析讨论了受激布里渊散射阈值与光源调制频率、光源线宽、光纤长度及损耗系数的关系。设计并搭建了实验系统,实际测量得到了19.5 km的G.653光纤受激布里渊散射阈值,实验结果与理论计算吻合。

关键词 散射;受激布里渊散射;光纤;非线性效应;阈值

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.090603

Analysis and Measurement of Stimulated Brillouin Scattering Threshold in Fiber

Wang Zhenbao Shao Bibo Zhang Lei Yan Yan Yang Pengling Chen Shaowu

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) is one of important nonlinear effects in fiber communication system or optical fiber sensing system. SBS can be brought easily in fiber for its low threshold, inducing power loss of incident laser in fiber system which is engaged as signal carrier, damaging laser source for backward scattered light caused by SBS, limiting laser power and transmitting distance of fiber system. Basing on the theory of SBS, the relation of SBS threshold with modulating frequency of laser source, linewidth of laser source, length of fiber and coefficient of loss is analyzed. The SBS threshold of 19.5 km G.653 fiber is measured by experiments, and the results accord with the theory calculation.

Key words scattering; stimulated Brillouin scattering; fiber; nonlinear effects; threshold

OCIS codes 060.4370; 190.4370; 290.5830

1 引言

随着光纤通信及光纤传感技术的飞速发展,光纤系统的传输容量急剧增加,同时由于掺铒光纤放大器(EDFA)的使用,光纤传输损耗已经不再是制约系统的主要因素,同时伴随着光纤中光功率的增加及信道数的不断增多,光纤中的非线性效应已经成为影响系统实际应用的主要因素。由于受激布里渊散射(SBS)阈值较低,在光纤中很容易产生,所以它是设计光纤系统时需要考虑的一个很重要的非线性问题^[1,2]。此外,由于SBS效应具有线宽窄、频率稳定、高相干性和增益方向敏感等优点,在光纤激光器和放大器^[3]、光纤延迟线、光纤传感^[4~6]等有着广泛的应用。本文通过理论研究和实验,研究了影响SBS阈值的主要因素,搭建了实验系统对理论计算进行验证。

2 SBS 阈值理论分析

SBS的物理过程可以经典地描述为抽运光、Stokes光以及抽运光通过电致伸缩效应产生的声波之间非线性相互作用的过程。光纤材料的布里渊增益系数定义为单位抽运光强在单位长度光纤内产生的Stokes光强的放大系数,可以表示为^[1]

收稿日期: 2011-01-04; **收到修改稿日期**: 2011-04-22; **网络出版日期**: 2011-07-28

作者简介: 王振宝(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光参数测量及光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: zhenbao_wang98@163.com

$$g_B(\nu) = g_p \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_s - \nu_B)/\Delta\nu_B]^2}, \quad (1)$$

式中 g_p 为峰值布里渊增益系数, ν 为抽运光中心频率, ν_s 为光中心频率, ν_B 为布里渊频移, $\Delta\nu_B$ 为 SBS 带宽。在功率谱为 $S_p(\nu)$ 的抽运光源作用下, 长度为 L 的光纤内所产生的布里渊总增益为

$$G = \int_0^{L+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_p(\nu) \frac{1}{A_e} \exp(-\alpha z) g_p \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_s - \nu_B)/\Delta\nu_B]^2} df dz, \quad (2)$$

式中 α 为光纤的损耗系数, A_e 为有效光纤芯截面积, 可以近似地认为 $A_e = \pi r_0^2$, r_0 为光纤芯半径。

为了得到 SBS 阈值, 应该考虑抽运光和 Stokes 光之间的非线性相互作用。对于连续或准连续波情况, 非线性作用遵循耦合方程

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s, \quad (3)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p, \quad (4)$$

式中 I_s 为 Stokes 光强, I_p 为抽运光强。

若要估算 SBS 阈值, 可以忽略抽运损耗。将 $I_p(z) = I_p(0) \exp(-\alpha z)$ 代入(3)、(4)式, 并对其在整个光纤长度 L 上积分, 得到 Stokes 光强度满足关系

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_e / A_e - \alpha L), \quad (5)$$

式中 $P_0 = I_p(0) A_e$, L_e 为有效作用长度, 其定义为

$$L_e = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}. \quad (6)$$

考虑每个能量为 $\eta(\omega)$ 的频率分量的放大, 在整个布里渊增益谱范围内对(5)式积分即可得到 Stokes 光功率。同时, 定义与后向散射的 Stokes 光功率相等时的抽运光功率为 SBS 阈值, 即

$$P_s(0) = P_p(L) = P_0 \exp(-\alpha L), \quad (7)$$

假设布里渊增益谱为洛伦兹形, 那么连续波及窄线宽抽运光情况下, SBS 阈值功率 P_{th} 表示为

$$P_{th} = 21 \frac{A_e K}{g_B L_e} \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\nu_p$ 为光源线宽, K 为偏振因子 ($1 \leq K \leq 2$), 在保偏光纤中, 若抽运光和斯托克斯光沿相同方向偏振, 则 $K = 1$; 在常规单模光纤中, 抽运光和斯托克斯光之间的相对偏振角随机变化, 则 $K = 2$ 。

在使用窄线宽光源的系统中, 一旦信号光功率超过受激布里渊散射阈值门限, 将有很强的前向传输信号光转化为后向传输光。SBS 效应具有一个较低的阈值功率。不同类型的光纤甚至同种类型的不同光纤之间的受激布里渊散射阈值功率都不同。对于使用窄谱线光源的外调制光纤传感系统, 光源功率典型值在 5~10 mW 量级, 但对直接调制激光器可能会达到 20~30 mW 之间。SBS 效应极大地限制了光纤中可能传输的光功率。

对线宽极窄的入射光 ($\Delta\nu_p \ll \Delta\nu_B$), 有

$$P_{th} = 21 \frac{A_e K}{g_B L_e}. \quad (9)$$

利用 SBS 阈值表达式(8)式, 取 $g_B = 5 \times 10^{-11}$ m/W, $A_e = 50 \mu\text{m}^2$, $\alpha = 0.3$ dB/km, 表 1 给出了一组不同光纤长度对应的 SBS 阈值。

表 1 不同光纤长度 L 对应的 SBS 阈值 P_{th}

Table 1 SBS threshold P_{th} corresponding different lengths of fiber

| Fiber length L/km | P_{th} of single mode fiber /mW | P_{th} of polarization maintaining fiber /mW |
|----------------------------|-----------------------------------|--|
| 0.8 | 53.92 | 26.96 |
| 1.2 | 36.40 | 18.20 |
| 6.5 | 7.96 | 3.98 |
| 19.5 | 3.85 | 1.93 |

在对光源进行调制时, 采用不同的调制方法也会造成 SBS 阈值的差异。光源在频率调制时的光纤 SBS

阈值的计算式^[7]为

$$P_{th} = \frac{P_{th}^{CW}}{1 - (f_0/2\Delta\nu_B)[1 - \exp(-\Delta\nu_B/f_0)]}, \quad (10)$$

式中 f_0 为调制频率; P_{th}^{CW} 为连续光情况下受激布里渊散射阈值, 其表达式如(8)式所示。

图1描述了在不同调制频率情况下, SBS阈值随光源线宽的变化。可以看出在相同光源线宽情况下, SBS阈值随调制频率的增大而增大。光纤中 SBS阈值在不同光源线宽下随光纤长度变化的关系如图2所示。

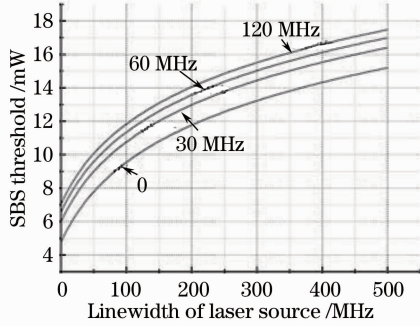


图1 不同调制频率 SBS 阈值随光源线宽变化
Fig. 1 SBS threshold versus modulating frequency and linewidth of laser source

SBS 阈值与损耗系数 α 、光纤长度 L 的关系曲线如图3所示。不难看出, 随着光纤长度的逐渐增加, SBS 阈值逐渐减小, 并逐渐趋于平缓。

由此, 可以得出:

1) 从光纤 SBS 阈值(8)式出发, 可以看出采用宽线宽光源, 也是提高 SBS 阈值的一种方法。在对光源进行不同调制的状态下[ASK (amplitude-shift keying)、PSK (phase-shift keying)、FSK (frequency-shift keying) 等调制方法], 光源线宽展宽也不同, 从而造成 SBS 阈值也有很大差别^[7]。

2) 分析(8)式中的参数 A_e , 由关系式 $A_e = \pi r_0^2$, 可以看出选用纤芯半径大的光纤能够增大光纤的有效纤芯截面积, 从而提高 SBS 阈值。

3) 分析阈值(8)式中的参数 K 可以看出, 普通单模光纤的阈值功率比保偏光纤 SBS 阈值提高将近1倍。

4) 分析阈值(8)式中的参数 L_e , 由(6)式可以看出, 光纤有效作用长度 L_e 与损耗系数 α 以及光纤长度 L 相关。当 $L \gg 1/\alpha$, 则有 $L_e \approx 1/\alpha$ (如: 当 $\alpha = 0.3$ dB/km, $L > 100$ km 时, 有 $L_e \approx 1/\alpha \approx 15$ km, SBS 阈值为 1.4 mW), SBS 阈值基本保持不变。

为了避免不利于光纤传输的负面作用, 产生了许多抑制 SBS 效应的技术, 如采用非均匀光纤^[8]、利用光纤布拉格光栅等。此外, 偏振复用技术也可以用来抑制 SBS 效应。

3 SBS 阈值测试

在对 SBS 阈值进行了详细的理论研究后, 搭建了如图4所示的光路, 对 SBS 效应进行实验测试, 以验证前面的理论分析。

图4中耦合器分束比为 1:47; 实验中选用的光纤为 G. 653 单模光纤, 损耗系数为 0.3 dB/km, 传输光纤长度为 19.5 km; 光源线宽约为 1 kHz。光功率计 1 用来测试后向散射光, 功率计 2 监测耦合器输出功率较小的一端, 以此来推算进入传输光纤的光功率。光功率计 3 用来检测前向输出光强。不断增大光源输出光功率, 记录 3 个功率计读数的变化, 并绘制了如图5所示的曲线。

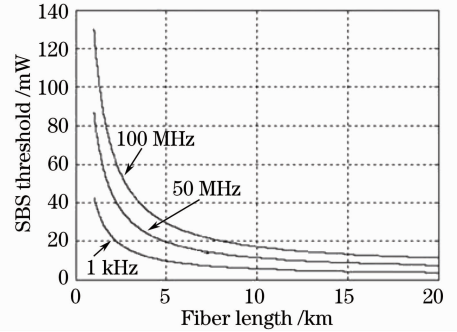


图2 不同调制频率 SBS 阈值随光纤长度变化
Fig. 2 SBS threshold versus fiber length and modulating frequency

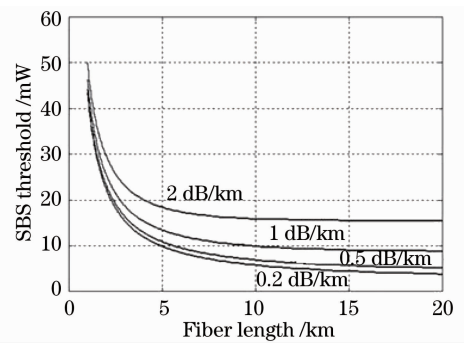


图3 SBS 阈值与损耗系数、光纤长度的关系曲线
Fig. 3 SBS threshold versus fiber length and loss coefficient

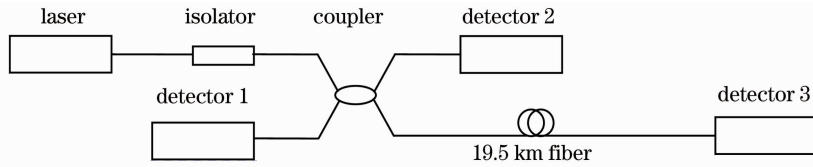


图4 SBS效应测试光路图

Fig. 4 Experimental arrangement for SBS threshold measurement

从图中可以看出,随着输入光功率的增加,前向输出光功率逐渐增加并趋于饱和;后向散射光功率也逐渐增加,并且在输入光功率约为6 dB时,后向散射光功率急剧增加,即产生SBS效应,那么实际测试得到的SBS阈值即约为6 dB。与表1理论计算值3.85 mW (5.85 dB)基本吻合,实测值与理论值的少许偏差主要是由于计算时光纤损耗系数与实际值略有差异而引起的。

4 结 论

从受激布里渊散射的基本理论出发,受激布里渊散射不仅是限制光纤传输容量的主要因素,同时在光纤传感,光纤激光器和放大器等方面又有着广泛的应用。通过理论计算,分析了受激布里渊散射阈值与光源调制频率、光源线宽、光纤长度及损耗系数的关系。利用线宽为1 kHz的窄线宽光纤激光器,设计并搭建了实验系统,测量了19.5 km的G.653光纤受激布里渊散射阈值,理论阈值为5.85 dB,实测阈值为6 dB,实验结果与理论计算吻合。

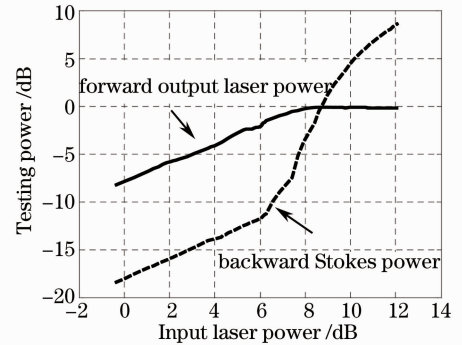


图5 SBS阈值测试曲线

Fig. 5 Testing result of SBS threshold

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang *et al.*. Tnansl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- Yasuhiro Aoki, Kazuhito Tajima, Ikuo Mito. Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems[J]. *J. Lightwave Technol*, 1988, **6**(5): 710~719
- Zhang Li, Gu Zhaochang, Xing Liang *et al.*. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 901~911
詹黎, 顾照昶, 邢亮等. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 901~911
- Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
宋牟平, 鲍翀, 裘超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 650~654
- Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 757~762
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 757~762
- Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1426~1429
宋牟平, 励志成, 裘超. 50 km长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1426~1429
- D. A. Fishman, J. A. Nagel. Degrations due to stimulated Brillouin scattering in mutigigabit intensity-modulated fiber-optics systems[J]. *J. Lightwave Technol*, 1993, **11**: 1721~1727
- K. Shiraki, M. Ohashi, M. Tateda. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fiber by changing the core radius [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(8): 668~669