

文章编号: 0258-7025(2005)04-0497-04

单模光纤中受激布里渊散射阈值研究

沈一春, 宋牟平, 章献民*, 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 分析和讨论了受激布里渊散射(SBS)阈值计算的 Smith 模型和 K \ddot{u} ng 模型,研究了更为准确估算光纤中布里渊散射阈值的方法,通过布里渊增益系数与光纤长度的关系,发现对于较短长度光纤,其布里渊增益系数随着光纤长度变化范围较大,仅在长距离光纤时,布里渊增益系数才可以近似为常数。实验测量了 25 km 单模光纤的受激布里渊散射阈值,推导出用布里渊时域反射仪(BOTDR)测量受激布里渊散射阈值计算公式,最后用布里渊时域反射仪测量了不同长度光纤受激布里渊散射阈值,实验结果与理论分析吻合。

关键词 光电子学; 单模光纤; 布里渊时域反射仪; 受激布里渊散射

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Analysis and Measurement of Stimulated Brillouin Scattering Threshold in Single Mode Fiber

SHEN Yi-chun, SONG Mu-ping, ZHANG Xian-min, CHEN Kang-sheng

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The Smith's model and K \ddot{u} ng's model for calculating the threshold of stimulated Brillouin scattering (SBS) are analyzed and discussed. The more exact method is investigated. The relationship between critical gain coefficient and fiber length is obtained, which shows that the critical gain coefficient can be considered as constant only when fiber length is long enough. The SBS threshold of 25 km single mode fiber is measured by experiment. Finally, the experiment to measure SBS threshold using Brillouin optical-time-domain reflectometer (BOTDR) is done. The results are well agreed with the theoretical predication.

Key words optoelectronics; single mode fiber; Brillouin optical-time-domain reflectometer; stimulated Brillouin scattering

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是一种光纤内发生的非线性过程,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。抽运引起的折射率光栅通过布拉格衍射抽运光,由于多普勒位移与声速移动的光栅有关,散射光产生了频率下移,形成了斯托克斯波^[1]。受激布里渊散射是光纤中的一种常见的非线性现象,通常会对光通信系统造成危害^[2~4]。但近些年来,光纤中的受激布里渊散射在激光器、放大器、滤波器、传感器等许多领域的应用引起了人们

极大的关注^[5~9]。光纤中布里渊散射一旦达到阈值,受激布里渊散射将把绝大部分输入功率转换为后向斯托克斯波。因而研究光纤中的布里渊散射阈值显得十分必要。Smith 提出了布里渊散射阈值的理论估算法^[10],由于当时光纤损耗较大,这样的理论估算法应用于现在低损耗光纤并不准确。传统上测量光纤中布里渊散射阈值的系统搭建比较复杂,而且不适合野外作业。C. C. Lee 等^[11]提出了使用布里渊时域反射仪(BOTDR)测量光纤中布里渊散射阈值的简单方法,但使用的理论模型中将布里渊

收稿日期: 2004-02-17; 收到修改稿日期: 2004-07-06

基金项目: 浙江省自然科学基金(M603127)资助项目。

作者简介: 沈一春(1979—),男,江苏南通人,浙江大学信息与电子工程学系博士研究生,主要从事光纤光子学方面的研究。E-mail: syczju@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangxm@zju.edu.cn

增益系数近似为一常数,有一定的误差,而且不能方便测量不同长度光纤的受激布里渊散射阈值。

本文从理论上分析了光纤中布里渊散射准确的理论模型,在此基础上推导出使用布里渊时域反射仪测量不同长度光纤受激布里渊散射阈值时的计算公式,最后利用布里渊时域反射仪和已知阈值的25 km康宁标准单模光纤测量出不同长度的中天光纤受激布里渊散射阈值,测量结果与理论分析值吻合。

2 理论分析

人们对光纤中布里渊散射阈值作了很多理论分析,继 Smith 之后 Küng 又经实验研究后提出了增益模型^[12]。但是,所有这些阈值估算都可以用一个通用计算模型

$$P_{th} = GA_{eff}/g_0 L_{eff}, \quad (1)$$

其中 P_{th} 为布里渊散射阈值, G 为阈值增益系数, A_{eff} 为光纤有效截面积, g_0 为布里渊增益峰值, 光纤有效长度 L_{eff} 为

$$L_{eff} = [1 - \exp(-aL)]/a, \quad (2)$$

其中 a 为光纤损耗系数, L 为光纤长度。

影响光纤中布里渊散射阈值有很多因素,除了与光纤长度、面积有关外,还与激光器的波长等很多因素有关。在(1)式中,应该在阈值增益系数 G 中体现出来。但无论在 Smith 还是 Küng 的理论分析中都将 G 近似为一常数,而更为准确的阈值增益系数应为^[12]

$$G \approx \ln\left(\frac{4A_{eff}\nu_B \bar{G}^{3/2} \pi^{1/2}}{g_0 k T \Gamma \nu_0 L_{eff}}\right), \quad (3)$$

式中 ν_B 为布里渊频移, $\bar{G} \approx 21$, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, Γ 为声子衰减速率, ν_0 为抽运波频率。

从(3)式可以看出,阈值增益系数 G 并不是一个常数,与很多因素有关,其中包括光纤长度。但对于长距离光纤,这时 $aL \gg 1$, (3) 式为

$$G \approx \ln\left(\frac{4aA_{eff}\nu_B \bar{G}^{3/2} \pi^{1/2}}{g_0 k T \Gamma \nu_0}\right). \quad (4)$$

从(4)式可以看出,这时阈值增益系数 G 与光纤长度并没有关系,在一定的条件下近似为一常数。

图1为阈值增益系数 G 随光纤长度的变化关系。这里的计算参数为,抽运波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 单模光纤模场直径 $d = 9 \mu\text{m}$, 布里渊频移 $\nu_B = 11 \text{ GHz}$, 布里渊增益峰值 $g_0 = 2 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, 绝对温度 $T = 330 \text{ K}$, 声子寿命 $T_B = 10 \text{ ns}$, 声子衰减速率 $\Gamma = 1/T_B$ 。从图中可以看出,阈值增益系数 G 不是 Smith 提出的常数 21 或 Küng 认为的小一些的数值,而是随着光纤长度的增大而减小。随着光纤长度的增加, G 的减小幅度

越来越小,光纤长度大于一定长度后,阈值增益系数 G 几乎保持不变,其值可由(4)式求出。在一定条件下,当知道光纤长度后可由图1查出或由(3)式计算出阈值增益系数 G , 代入(1)式就可以估算出光纤中受激布里渊散射的阈值。

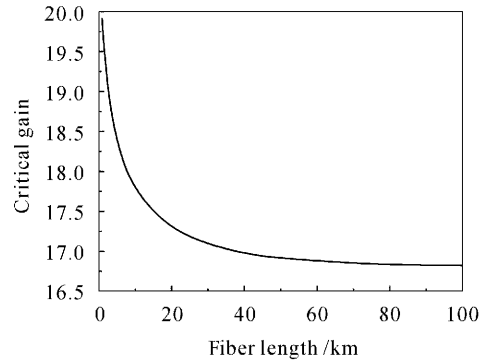


图1 阈值增益系数与光纤长度的关系

Fig. 1 Critical gain coefficient G versus fiber length

3 实验结果与分析

首先测量 25 km 康宁公司的 SMF-28 单模光纤的受激布里渊散射阈值,实验原理如图2所示。激光器发射的 1550 nm 抽运光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过 3 dB 耦合器进入 25 km 的单模光纤,功率计 B 用来监测入纤抽运光功率。抽运光进入光纤后由于布里渊散射效应,产生斯托克斯光,通过 3 dB 耦合器耦合到 A 端,在 A 处利用光谱分析仪分析,观测后向斯托克斯波频谱和测量功率。在光纤中产生的瑞利散射也会进入到 A 处,实验中将 Agilent86141B 光谱分析仪设定为滤波器模式,带宽为 0.07 nm,来减小瑞利散射带来的影响。光纤末端的传输功率用功率计 C 测量。在 B, C 之前,为了防止功率过大对功率计造成损害,分别加入了 100:1 和 100:10 的固定衰减器。

通过实验测得 25 km 康宁公司的 SMF-28 单模

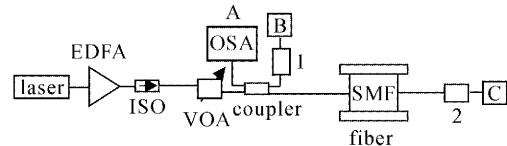


图2 实验系统框图

ISO: 光隔离器; VOA: 可调光衰减器; OSA: 光谱分析仪;

SMF: 标准单模光纤; B, C: 功率计; 1, 2: 衰减器

Fig. 2 Experimental setup

ISO: Isolator; VOA: Variable optical attenuator; OSA: Optical spectrum analyzer; SMF: Single mode fiber; B, C: Powermeters; 1, 2: Attenuator

光纤的受激布里渊散射阈值为 6 mW。图 3 为实验中测得的斯托克斯光与入纤抽运光功率的关系。

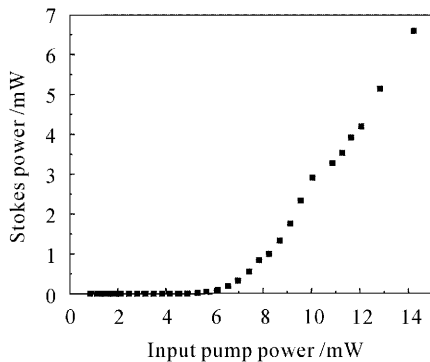


图 3 斯托克斯光与入纤抽运光功率的关系
Fig. 3 Stokes power versus launching power

光纤中受激布里渊散射阈值是由其布里渊增益频谱决定的,故可以通过测量光纤中的布里渊增益频谱来测量布里渊散射阈值。而布里渊光时域反射仪用于测量光纤中自发布里渊散射频谱,受激布里渊增益频谱可由其推出,因此利用布里渊时域反射仪可以测量光纤中的布里渊散射阈值,实验装置如图 4。实验中布里渊光时域反射仪为日本 Ando 公司生产的 AQ8063,其空间分辨率为 5 cm,测量精度为 $\pm 0.005\%$ 。布里渊时域反射仪利用光纤中布里渊散射现象,通过自相干检测,可以测得沿整个光纤后向斯托克斯光功率分布和其布里渊增益频谱。25 km 的标准单模光纤 A 通过连接器与需要测量的单模光纤 B 连接,为了减少光纤末端的反射对布里渊阈值的影响,将光纤的末端浸入匹配液,然后利用布里渊时域反射仪对光纤的正向和负向进行测量,得到自发布里渊散射后向斯托克斯光功率沿光纤的分布 $P_s^+(z)$ 和 $P_s^-(z)$,其值可以表示为^[13]:

$$P_s^+(z) = P_0 \exp(-2az) a_B S \times (c/n) \cdot W/2, \quad (5)$$

$$P_s^-(z) = P_0 \exp[-2a(l-z)] a_B S \times (c/n) \cdot W/2, \quad (6)$$

式中 P_0 为输入脉冲光功率, c 为真空中光速, n 为光纤折射率, W 为脉冲宽度, l 为光纤总长度, a_B 为布

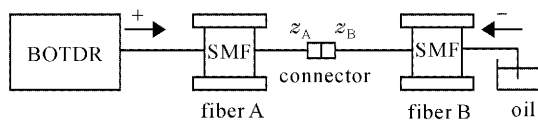


图 4 测量光纤受激布里渊散射阈值的实验装置图
Fig. 4 Experimental setup for SBS threshold measurement of fibers using BOTDR

里渊散射损耗系数,可以表示为

$$a_B = \frac{8\pi^2 c n^2 k T \Delta\nu_B g_0}{3\nu_B \lambda^3 K}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\nu_B$ 为布里渊频谱宽度, λ 为入射光波长, K 为偏振极化系数,其值在 $0 \sim 1$ 之间,由抽运波和斯托克斯波的偏振极化匹配度决定,即当抽运波和斯托克斯波偏振极化方向相同时为 1,相反时为 0。

后向散射分量 S 为^[13]

$$S = \frac{(\lambda/n)^2}{4\pi A_{\text{eff}}}. \quad (8)$$

由(5)式~(8)式可以推导出光纤 A, B 的布里渊增益峰值关系^[11]

$$\frac{g_0^A}{g_0^B} = \left[\frac{P_s^+(z_B) P_s^-(z_B)}{P_s^+(z_A) P_s^-(z_A)} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中 z_A, z_B 和分别为光纤 A, B 在连接器附近的位置。

由(1)式和(9)式可以推导出光纤 A, B 的布里渊散射阈值关系式

$$P_{\text{th}}^B = \frac{G^B L_{\text{eff}}^B}{G^A L_{\text{eff}}^A} \left[\frac{P_s^+(z_B) P_s^-(z_B)}{P_s^+(z_A) P_s^-(z_A)} \right]^{1/2} P_{\text{th}}^A, \quad (10)$$

式中 G^A, G^B 为光纤 A, B 的增益系数,其值可由(3)式求出或从图 1 查出。 $L_{\text{eff}}^A, L_{\text{eff}}^B$ 为光纤 A, B 的有效长度。

如果知道光纤 A 的布里渊散射阈值,通过布里渊时域反射仪测量出光纤连接器处的斯托克斯波的功率 $P_s^+(z_A)$ 和 $P_s^-(z_B)$,代入(10)式就可以知道光纤 B 的布里渊散射阈值。实验中光纤 A 为已测出其受激布里渊散射阈值的 25 km 标准康宁光纤。采用了中天科技光纤有限公司(ZOFC)生产的多根同一型号标准单模光纤作为不同长度光纤 B,用于测量受激布里渊散射阈值。图 5 为光纤 B 的受激布里渊散射阈值与其长度的关系。曲线 1 为 Smith 模型计算后得到的受激布里渊散射阈值,曲线 2 为 Küng 模型计算出的受激布里渊散射阈值,曲线 3

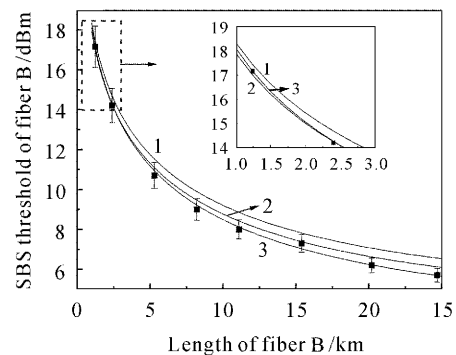


图 5 光纤 B 的受激布里渊散射阈值与长度的关系
Fig. 5 SBS threshold of fiber B versus length of fiber B

为考虑到光纤长度对布里渊增益系数影响后的受激布里渊散射理论值,离散点为利用布里渊时域反射仪测量不同长度光纤后得到的受激布里渊散射阈值。从图中可以看出,用 Smith 模型计算的受激布里渊散射阈值在计算短距离光纤时比本文测得的受激布里渊散射阈值偏高,随着光纤长度的增加,偏差越来越大,这是因为在计算短距离光纤时,Smith 模型中布里渊增益系数近似常数 21 接近图 1 中短距离光纤的布里渊增益系数,因而用 Smith 模型计算的受激布里渊散射阈值与本文算出的受激布里渊散射阈值相差不大,但在计算长距离光纤受激布里渊散射阈值时,由于光纤中布里渊增益系数随着光纤长度的增加越来越小,故 Smith 模型计算的受激布里渊散射阈值偏差越来越大,但是当光纤增长一定长度,光纤中布里渊增益系数近似为一常数,Smith 模型计算的受激布里渊散射阈值的偏差会恒定在一定范围内。如图所示,Küing 模型计算后的受激布里渊散射阈值,在计算短距离光纤时,比实际测得的受激布里渊散射阈值要小,而在计算长距离光纤时,其受激布里渊散射阈值会比实际测得的值要大。这是因为 Küing 模型中近似常数约为 19,这在比短距离光纤中的布里渊增益系数要小,而比长距离光纤中布里渊增益系数要大。从图 5 可以看出,本文利用布里渊时域反射仪所测的不同长度光纤的受激布里渊散射阈值与理论分析计算后的阈值比较吻合,误差在 0.2 dBm 范围内,这可能是在测量过程中的误差所引起的。

4 结 论

提出一种利用布里渊时域反射仪简易测量不同长度光纤受激布里渊散射阈值的方法。分析出布里渊增益系数随着光纤长度的增加而减小,在长距离光纤中可以近似为常数。推导出布里渊时域反射仪测量受激布里渊散射阈值的计算公式,利用本文方法测量的不同长度光纤的受激布里渊散射阈值,与理论估算值比较,误差仅在 0.2 dBm 范围内。

致谢 感谢中天科技公司为实验提供了布里渊时域反射仪和测量所需光纤,感谢中天科技薛 驰,吴功

建等工程师在实验中提供的帮助和有益的建议。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Jia Dongfang trans. Principle & Application of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
阿格拉瓦. 贾东方译. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2002
- 2 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
- 3 Yang Jianliang, Tu Tao, Zha Kaide. Influence of incident polarization state on performance for SBS suppression of CATV transmitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 28~31
杨建良, 涂 涛, 查开德. 入射偏振对有线电视光发射机受激布里渊散射抑制性能的影响 [J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 28~31
- 4 Jiang Hongtao, Zha Kaide. Laser dithering to suppress stimulated Brillouin scattering in optical fiber AM CATV externally modulated transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1034~1039
蒋洪涛, 查开德. 激光抖动法抑制光纤调幅有线电视外调制传输中的受激布里渊散射 [J]. 光学学报, 1998, **18**(8): 1034~1039
- 5 V. Leconuche, S. Randouche, B. Ségard *et al.*. Dynamics of Brillouin fiber ring laser: Off-resonant case [J]. *Phys. Rev. A*, 1996, **53**(4): 2822~2828
- 6 S. Norcia, S. Tonda-Goldstein, D. Dolfi *et al.*. Efficient single-mode Brillouin fiber laser for low-noise optical carrier reduction of microwave signals [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1888~1890
- 7 Takuo Tanemura, Yuichi Takushima, Kazuro Kikuchi. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17): 1552~1554
- 8 Liu Dahe, Wang Huaying, Zhou Jing. Measurements of sound speed in sea water with different salinity and temperature by Brillouin scattering method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4): 381~384
刘大禾, 汪华英, 周 静. 布里渊散射法测量盐度及温度不同的海水中的声速 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(4): 381~384
- 9 Xu Jianfeng, Li Rongsheng, Zhou Jin *et al.*. Measurements of bulk viscosity of water using Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1112~1115
徐建峰, 李荣胜, 周 静等. 用布里渊散射测量水的体粘滞系数 [J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1112~1115
- 10 R. G. Smith. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2489~2494
- 11 C. C. Lee, S. Chi. Measurement of stimulated-Brillouin-scattering threshold for various types of fibers using Brillouin optical-time-domain reflectometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 672~674
- 12 A. Küing. Laser emission in stimulated Brillouin scattering in optical fibers [D]. Ph. D. dissertation No. 1740 (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland), 1997
- 13 T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA-nondestructive measurement at single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1170~1176