

文章编号: 0258-7025(2005)01-0075-04

# 利用参量放大效应测量光纤的非线性系数 和色散参数

王 青, 王 燕, 蒋俏峰, 刘小明, 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘要** 通过对理想条件下得出的光纤参量放大增益解析解和相位匹配关系表达式进行修正, 得出在光纤有损耗时, 小信号峰值增益和光纤非线性系数成正比以及光纤色散参数和峰值增益波长与抽运光波长的差成反比两个近似表达式。以此为基础提出: 只要在直流抽运光作用下测出小信号峰值增益以及增益峰值波长与抽运波长之差, 然后通过简单的代数运算就可以得出光纤的非线性系数和色散参数。实验中, 分别用两个不同波长的抽运光, 对一卷长度为 1450 m 的高非线性色散平坦光纤(HNLF)的非线性系数和色散参数进行了测量。测得非线性系数为  $\gamma = 11.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 色散斜率在 1550 nm 附近为  $S = 0.0157 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。其中, 色散斜率测量值和商家给定的值之间误差不超过 5%。对在测量中抽运光和信号光之间由于拉曼放大作用所带来的增益谱不对称性进行了讨论。

**关键词** 光电子学; 光纤参量放大; 非线性系数; 色散参数

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A

## Nonlinear Coefficient and Dispersion Parameters Measurement Utilizing Optical Parametric Amplification

WANG Qing, WANG Yan, JIANG Qiao-feng, LIU Xiao-ming, ZHOU Bing-kun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The analytical relations of parametric peak gain versus fiber nonlinear coefficient and fiber dispersion versus the difference between gain peak and pump wavelengths were derived when the fiber loss was taken into account, based on which a new method to measure the nonlinear coefficient and dispersion parameters was proposed with only simple algebraic calculation required. In the experiment, a 1450-m-long highly nonlinear dispersion flattened fiber (HNLF) was measured by using two different pump wavelengths, the measured nonlinear coefficient was  $\gamma = 11.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , and the dispersion slope was  $S = 0.0157 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  with the error from the value given by the manufacturer below 5%. The measured asymmetry of gain spectrum ascribed to the Raman effect was discussed.

**Key words** optoelectronics; fiber parametric amplification; nonlinear coefficient; dispersion parameter

## 1 引 言

近年来, 密集波分复用(DWDM)技术的成熟促进光纤通信系统向更高速(10 Gb/s 或 40 Gb/s)、更大容量(上百个信道)和更长距离(数千千米)的方向发展。由于光纤中信道数和单信道光功率的增加, 同时由于色散管理的需要引入了色散位移或色散补

偿等特种光纤, 光纤中的非线性效应例如自相位调制(SPM)、互相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等有可能对系统的总体性能产生严重不良影响, 成为传输系统中必须考虑的一个重要因素。另一方面, 光纤中的非线性效应也越来越地被有效利用, 比如光纤拉曼放大、光纤参量放大等等<sup>[1]</sup>。而这些非线性效应的强弱都跟光纤的非线性系数  $\gamma$  或色散

收稿日期: 2003-12-07; 收到修改稿日期: 2004-02-26

作者简介: 王 青(1979—), 男, 四川仪陇人, 清华大学电子工程系物理电子学专业博士研究生, 主要从事光纤中的非线性效应研究。E-mail: win2000@mails. tsinghua. edu. cn

参数  $D$  有关,因此,准确地测出  $\gamma$  和  $D$  对于研究光纤通信技术是非常重要的。

目前已见报道的测量光纤非线性系数  $\gamma$  和色散参数  $D$  的方法主要有:自相位调制法<sup>[2]</sup>、互相位调制法、四波混频法<sup>[3]</sup>和调制不稳定法(MI)<sup>[4]</sup>等。本文提出一种新的基于光参量放大效应的测量方法。由于待测参量和可测参量之间具有简单的比例关系,不需要复杂的数值模拟计算,操作简单。而且,相比前面所述其他测试方法而言,由于参量放大的

增益谱在零色散波长附近随非线性系数和色散变化都很敏感,因此,可以得到很高的测量精度。

## 2 测量原理

### 2.1 光纤非线性系数的测量

光纤中的参量放大可以用下面一组耦合波方程来描述<sup>[1]</sup>

$$\frac{dA_p}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_p + i\gamma\{[|A_p|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_q|^2)]A_p + 2A_sA_qA_p^* \exp(i\Delta\beta z)\}, \quad (1a)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_s + i\gamma\{[|A_s|^2 + 2(|A_p|^2 + |A_q|^2)]A_s + A_pA_pA_q^* \exp(-i\Delta\beta z)\}, \quad (1b)$$

$$\frac{dA_q}{dz} = -\frac{\alpha}{2}A_q + i\gamma\{[|A_q|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_p|^2)]A_q + A_pA_pA_s^* \exp(-i\Delta\beta z)\}, \quad (1c)$$

其中  $\Delta\beta = \beta_s + \beta_q - 2\beta_p$  为参与作用各光波的线性波矢失配,  $\alpha$  为光纤的损耗系数,  $A_k$  ( $k = p, s, q$ ) 为抽运光( $p$ ), 信号光( $s$ ) 和闲频光( $q$ ) 波的复振幅。通过数值法求解方程组(1)可以计算得出不同信号波长的参量放大增益  $G_s$ 。

在小信号条件下,可以忽略放大过程消耗的抽运功率。如果暂时忽略光纤的背景损耗,那么参量放大的增益近似为<sup>[5]</sup>

$$G_s = \left(1 + \frac{\kappa^2}{4g^2}\right) \sinh^2(gL), \quad (2)$$

这里,增益系数  $g = [(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2]^{1/2}$  为一个与光纤非线性系数  $\gamma$ , 抽运功率  $P_p$  以及总相位失配  $\kappa$  有关的参量,  $L$  为光纤长度,总相位失配  $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_p$ , 其中第一项  $\Delta\beta$  与波长有关,因此参量放大的增益大小与波长相关;第二项  $2\gamma P_p$  为非线性带来的波矢失配,当非线性波矢失配  $2\gamma P_p$  完全抵消各光波间的线性波矢失配  $\Delta\beta$  时,  $\kappa = 0$ , 达到增益峰值。在  $gL \gg 1$ , 即高增益条件下,峰值增益为

$$G_{\text{peak}} = \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p L), \quad (3)$$

以分贝为单位,式(3)又可以写成

$$G_{\text{peak}}(\text{dB}) = 8.7P_p\gamma L - 6, \quad (4)$$

式(4)表明,当抽运功率和光纤长度不变时,  $G_{\text{peak}}$  的分贝值与光纤非线性系数  $\gamma$  呈线性关系。因此,只要测出小信号条件下参量放大的峰值增益  $G_{\text{peak}}(\text{dB})$ , 就可以确定  $\gamma$  了。但是,实际光纤的背景损耗是不可忽略的,特别当光纤损耗比较大的时候,使用式(4)计算  $\gamma$  会引入较大误差。为此,必须考虑光纤对

抽运光和信号光的损耗。在小信号条件下,忽略抽运光向信号光的功率转移,将式(4)修正为

$$G_{\text{peak}}(\text{dB}) = 8.7P_p\gamma L_{\text{eff}} - 6 + 10\lg e^{-\alpha L}, \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为光纤背景损耗。第一项考虑了抽运光损耗的影响,将光纤长度  $L$  用有效长度  $L_{\text{eff}}$  代替,  $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ ; 第三项表示信号光损耗造成的增益下降。可见,考虑光纤的损耗后,参量放大的小信号峰值增益受光纤损耗系数的影响,但仍然跟光纤的非线性系数  $\gamma$  呈线性关系。

分别考虑光纤背景损耗  $\alpha = 0$ ,  $\alpha = 0.73 \text{ dB/km}$  和  $\alpha = 1.46 \text{ dB/km}$  的不同情况,分别用式(5)计算(解析解)和数值求解方程组(1)(数值解)得到的峰值增益和  $\gamma$  的关系如图 1 所示。计算条件:  $P_p = 200 \text{ mW}$ ,  $\lambda_p = 1552.8 \text{ nm}$ ,  $L = 1450 \text{ m}$ ,  $\lambda_0 = 1548 \text{ nm}$ ,  $S = 0.0155 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ,  $\alpha = 0, 0.73, 1.46$

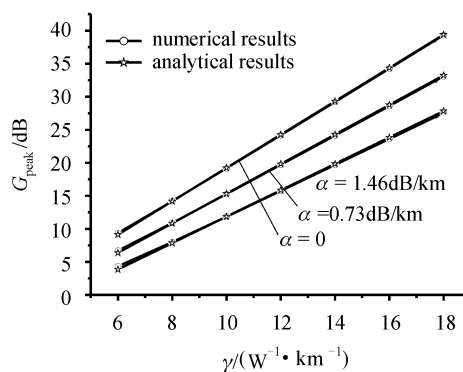


图 1 参量放大峰值增益随光纤非线性系数  $\gamma$  的变化  
Fig. 1 Analytical and numerical results of parametric peak gain versus fiber nonlinear coefficient

dB/km。可见,对于相同的  $\alpha$  和  $\gamma$ , 峰值增益的解析解和数值解的结果差别小于 5%。因此,使用式(5)计算光纤的非线性系数  $\gamma$  具有足够的精度。

## 2.2 光纤色散参数的测量

在零色散区域附近<sup>[6]</sup>, 抽运光、信号光和闲频光之间的线性相位失配可写为

$$\Delta\beta = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} S(\lambda_p - \lambda_0)(\lambda_p - \lambda_s)^2, \quad (6)$$

其中,  $S$  为光纤的色散斜率,  $\lambda_p, \lambda_s$  分别为抽运光和信号光的波长,  $\lambda_0$  为光纤的零色散波长。  $S(\lambda_p - \lambda_0)$  实际上就是抽运波长  $\lambda_p$  处的色散参数  $D_p$ 。由于增益谱的峰值增益对应于总相位失配  $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_p = 0$ <sup>[5]</sup>, 那么, 考虑光纤损耗, 由式(6)得到  $D_p$  与峰值增益波长  $\lambda_{\text{peak}}$  之间关系为

$$D_p = \frac{\lambda_0^2}{\pi c (\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2} \gamma P_p \frac{L_{\text{eff}}}{L} \approx \frac{\lambda_p^2}{\pi c (\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2} \gamma P_p \frac{L_{\text{eff}}}{L}, \quad (7)$$

这里, 与式(5)类似, 采用因子  $L_{\text{eff}}/L$  折合了光纤对抽运功率的损耗。通过与数值解对比发现在  $\alpha = 0, \alpha = 0.73 \text{ dB/km}$  和  $\alpha = 1.46 \text{ dB/km}$  三种情况下, 式(7)与数值解的误差在 5% 以内。式(7)说明, 在测出光纤非线性系数  $\gamma$  的基础上, 如果同时记下峰值增益波长相对于抽运波长的偏移量  $\lambda_p - \lambda_{\text{peak}}$ , 通过式(7)即可求出该抽运波长处的色散参数  $D_p$ 。改变抽运光波长, 用同样的方法可以测得不同波长处的色散参数。然后作出  $D \sim \lambda$  曲线, 用曲线拟合的办法可以求出光纤的零色散波长  $\lambda_0$  和零色散区域的色散斜率  $S$ 。

图 2 所示是其他参数不变的情况下用式(7)计算得到的  $(\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2$  跟  $D_p$  的关系, 计算条件:  $P_p = 240 \text{ mW}$ ,  $\lambda_p = 1552.8 \text{ nm}$ ,  $\gamma = 15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,  $L = 1000 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0.73 \text{ dB/km}$ 。从图中可以看出, 在

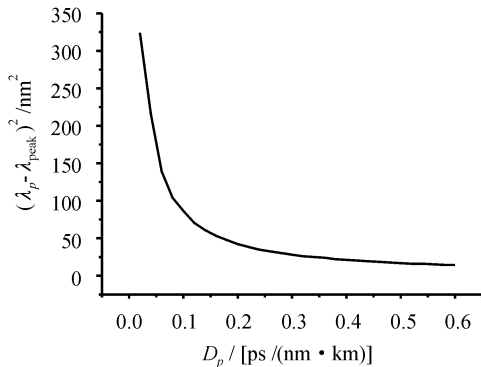


图 2 根据(7)式计算得到的  $(\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2$  跟  $D_p$  的关系

Fig. 2 Analytical results of  $(\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2$  versus  $D_p$

抽运波长色散参数  $D_p$  很小的时候,  $(\lambda_p - \lambda_{\text{peak}})^2$  对于  $D_p$  的变化非常敏感, 因此, 这种方法对于小的色散参数可以得到较高的测量精度。

## 3 测量装置和结果

由测量原理可知, 测量非线性系数和光纤色散参数的关键在于测量参量放大的增益谱, 特别是在峰值附近的增益。因此, 测量装置实际上就是一般的参量放大的实验装置, 如图 3 所示。

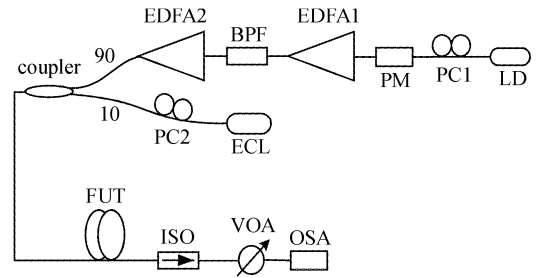


图 3 测量参量放大增益谱实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for optical parametric gain spectrum measurement

半导体激光器(LD)的输出经过两级掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为参量放大的抽运光, 可调谐激光器(ECL)的输出作为信号光, 它们通过一个 10:90 耦合器耦合到待测光纤(FUT)中。其中, 半导体激光器采用的是—台商用的为 CATV 系统设计的信号源(Javelin 1.5-TRNU optical fiber transmitter, ATX telecom systems, Inc.), 该信号源含有内置相位调制以抑制受激布里渊散射(SBS), 调制频率大约为 2 GHz。外置的相位调制器(PM)对该信号源的输出光进行再次相位调制, 调制频率为 365 MHz。二次相位调制可以进一步展宽激光器的输出频谱, 进一步提高受激布里渊散射阈值而有利于得到更高的参量增益<sup>[7]</sup>。调制后的半导体激光器输出经过一台中等功率掺铒光纤放大器 EDFA1 放大到约 17 dBm, 然后经过一个 3 dB 带宽为 1.2 nm 的光带通滤波器(BPF)滤去激光波长外的放大的自发辐射(ASE), 再通过另外一台高功率掺铒光纤放大器 EDFA2 放大到约 25 dBm。待测光纤是由 OFS 公司提供的一卷长度为 1450 m 的高非线性色散位移光纤(HNL-DSF), 在 1550 nm 附近损耗为 0.73 dB/km。考虑 10:90 耦合器的损耗及单模光纤和高非线性色散位移光纤之间约 1.0 dB 的焊点损耗, 实际进入高非线性色散位移光纤的

抽运光功率大约为 23.5 dBm。进入高非线性色散位移光纤的信号光功率为 -20 dBm,符合小信号条件。偏振控制器 PC1 用于调节半导体激光器输出光即抽运光的偏振态使与相位调制器工作的偏振方向一致;PC2 用于调节信号光的偏振态使与抽运光偏振态一致。由于高非线性色散位移光纤输出端光功率很大,所以经过一个可调衰减器(VOA)衰减后再送到光谱仪(OSA)进行测量。分别测出输入、输出的信号功率,两者比较,即可得到该信号波长下的增益。改变信号波长,则可以测出增益谱。根据增益谱确定  $G_{\text{peak}}$  (dB) 和  $\lambda_{\text{peak}}$ ,按照上述办法就可以计算出光纤的非线性系数和抽运波长处的色散。当  $\lambda_p = 1552.8 \text{ nm}$ ,测得  $G_{\text{peak}} = 22.26 \text{ dB}, 23 \text{ dB}$ ;  $\lambda_{\text{peak}} = 1544 \text{ nm}, 1562 \text{ nm}$ ,取峰值增益的平均值作为  $G_{\text{peak}}$  用式(5)计算得到  $\gamma = 11.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,取波长偏移的平均值作为参量峰值增益波长偏移,用式(7)计算得到  $D_{1552.8 \text{ nm}} = 0.07 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ (后面有相关说明)。换用另外一个波长的激光器作为抽运源,波长为 1556.6 nm,它的输出光谱较宽,同样很好地抑制了受激布里渊散射。按照同样办法测量得到  $G_{\text{peak}} = 22.3 \text{ dB}, 22.9 \text{ dB}$ ,  $\lambda_{\text{peak}} = 1550 \text{ nm}, 1563 \text{ nm}$ ,计算得到  $\gamma = 11.8 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,跟上面测得的结果相同。 $D_{1556.6 \text{ nm}} = 0.1298 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。由这两组值确定色散斜率为  $S = 0.0157 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ,零色散波长为  $\lambda_0 = 1548.3 \text{ nm}$ 。与商家给出的该光纤的参数  $S = 0.0155 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  相比,误差为 1.3%。如果条件允许,在更大范围内不同的抽运波长下重复上述测量,通过数据的拟合处理有可能得到更精确的结果。

值得指出的是,理论上参量增益谱关于抽运波长是对称的,但因为参量放大抽运光功率很强,所以拉曼放大作用不可忽略。由于拉曼增益的作用,导致长波长的信号增益比单纯参量放大时增加,而短

波长的信号增益比单纯参量放大时减小<sup>[8]</sup>。因此取二者的平均值作为参量放大的峰值增益值,取峰值增益波长与抽运波长之差的平均值作为参量峰值增益波长偏移。

## 4 结 论

通过对理想条件下得出的光纤参量放大增益解析和相位匹配关系表达式进行修正的办法,提出了一种基于参量放大的同时测量光纤的非线性系数和色散参数的新方法,它的测量精度比较高,尤其适用于小色散光纤。

## 参 考 文 献

- 1 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund. Fiber based optical parametric amplifiers and their applications [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3):506~520
- 2 A. Boskovic, S. V. Chernikov, J. R. Taylor *et al.*. Direct continuous-wave measurement of  $n_2$  in various types of telecommunication fiber at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1966~1968
- 3 L. Prigent, J.-P. Hamaide. Measurement of fiber nonlinear Kerr coefficient by four-wave mixing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(9):1092~1095
- 4 C. Mazzali, D. F. Grosz, H. L. Fragnito. Simple method for measuring dispersion and nonlinear coefficient near the zero-dispersion wavelength of optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2):251~253
- 5 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed. San Diego, CA: Academic, 2001. 392~399
- 6 K. Inoue. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11):1553~1561
- 7 Wang Qing, Liu Xiaoming, Wang Yan *et al.*. Stimulated Brillouin scattering suppression and optical parametric amplification in highly nonlinear optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):802~806  
王青,刘小明,王燕等.高非线性光纤中受激布里渊散射的抑制和光参量放大[J].*中国激光*, 2004, **31**(7):802~806
- 8 M.-C. Ho, K. Uesaka, M. Marhic *et al.*. 200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7):977~981