

doi:10.3788/gzxb20124105.0536

# 基于四波混频的光纤非线性系数测量方法

李智, 武保剑, 文峰, 安俊鸽

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

**摘 要:**为解决四波混频法测量光纤非线性系数未考虑泵浦消耗而导致结果不准确的问题,提出了一种在简并四波混频情况下测量非线性系数的方法.根据光纤中简并的四波混频理论,推导出了考虑泵浦消耗和光纤损耗的椭圆方程.通过设定数值计算所需的各个参量并利用简单的数学方法分析了计入泵浦消耗、光纤损耗的必要性,得到被测光纤的非线性系数,与 Optisystem 的仿真结果一致.研究表明,这种改进的测量方法不但适用于小信号情形下的四波混频过程,还可以应用于出现参量饱和现象的场合,为进一步设计光纤 2R 再生器件提供了重要依据.

**关键词:**高非线性光纤;非线性系数;四波混频;泵浦消耗

**中图分类号:**TN2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2012)05-0536-5

## 0 引言

随着高速光纤通信的发展,光纤非线性效应,如自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross-Phase Modulation, XPM)、四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)等,日益引起人们的关注.一方面,光纤非线性效应会对通信系统性能造成一定的劣化<sup>[1]</sup>,另一方面人们也可以利用非线性效应实现光波长转换、光信号再生等光子信息处理功能<sup>[2]</sup>.光纤非线性效应的强弱用光纤非线性系数表示.在实验室开展研究工作时,如验证磁光四波混频理论和设计四波混频光门时都需要知道光纤的非线性系数.为此,能够准确测量光纤的非线性系数是很有必要的.目前,测量光纤非线性系数的主要方法有:自相位调制法<sup>[3]</sup>,交叉相位调制法<sup>[4]</sup>,四波混频法<sup>[5]</sup>和调制不稳定法<sup>[6]</sup>等.对于自相位调制和交叉相位调制法,通常是基于短脉冲且需要准确测定短脉冲的脉冲宽度和峰值功率,另外还需要一个特定的系数来校正偏振态对非线性效应强度的影响.这两种方法实现起来比较复杂.四波混频法较之前两种方法实现起来相对简单,但是已报道的基于四波混频过程中的参量放大测量非线性系数的方法局限于小信号的情况且忽略了泵浦消耗的影响<sup>[7]</sup>.

本文对基于四波混频的光纤非线性测量方法进行改进,测量公式中考虑了泵浦消耗和光纤损耗的影响.它不但适用于小信号情形下(忽略了泵浦消耗

的影响)的四波混频过程,还可以应用于出现参量饱和现象的场合,如光纤参量振荡器(Fiber Optical Parametric Oscillator, FOPO)和四波混频光门等.采用这种改进的方法,对实验室中所用的高非线性光纤进行了测量,其非线性系数为  $12.842 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ ,为下一步实验验证磁光四波混频理论提供了重要参量.

## 1 高非线性光纤的特征参量

获取光纤特征参量的信息是非常重要的.因为在利用高非线性光纤研究非线性效应时,这些参量不仅能够影响非线性效应的强弱,还可以在选取工作波长时提供参考.高非线性光纤的特征参量通常包括光纤长度  $L$ 、损耗系数  $\alpha$ 、非线性系数  $\gamma$ 、色散  $D$  以及色散斜率  $S$  等.实验室中已有的高非线性光纤是长飞光纤光缆有限公司所生产,型号为 NL\_1550\_Zero.表 1 是厂家给出的参考波长在 1 550 nm 处的部分参量,图 1 是光纤的色散曲线.但厂家并未给出光纤的非线性系数  $\gamma$ .为了进一步展开磁光四

表 1 光纤供应商提供的部分参量

Table 1 Parameters of the optical fiber

Parameters of fiber	Value
Reference wavelength $\lambda_r/\text{nm}$	1 550
Loss coefficient $\alpha/(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	0.936
Dispersion $D/(\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1})$	-0.094
Dispersion slop $S/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$	0.021 5
Length of fiber $L/\text{km}$	0.505

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB301703)和新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-08-0092)资助

**第一作者:**李智(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信. Email: lizhi19890205@126.com

**责任作者/导师(通讯作者):**武保剑(1970-),男,教授,博导,主要研究方向为光通信. Email: bjwu@uestc.edu.cn

**收稿日期:**2011-12-05; **修回日期:**2012-01-11

波混频以及全光 2R 再生方面的理论和实验工作,准确地测量非线性系数显得尤为重要.本文修正了小信号四波混频的测量公式,计及了泵浦消耗和光纤损耗的影响,改进了传统的基于四波混频的光纤非线性系数测量方法.

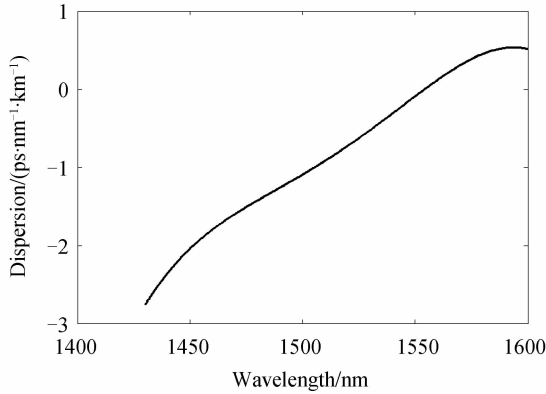


图 1 光纤的色散曲线  
Fig. 1 Dispersion curve

## 2 理论基础

当泵浦光和探测光为准连续波和线偏振光时,考虑泵浦消耗和光纤损耗的简并四波混频 (Degenerate Four-wave Mixing, DFWM),可以用耦合波方程来描述<sup>[8]</sup>

$$\frac{dA_P}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_P = i\gamma\{(|A_P|^2 + 2|A_S|^2 + 2|A_I|^2)A_P + 2A_S A_I A_P^* e^{i\Delta\beta z}\} \quad (1)$$

$$\frac{dA_S}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_S = i\gamma\{(|A_S|^2 + 2|A_P|^2 + 2|A_I|^2)A_S + A_P^2 A_I^* e^{-i\Delta\beta z}\} \quad (2)$$

$$\frac{dA_I}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_I = i\gamma\{(|A_I|^2 + 2|A_P|^2 + 2|A_S|^2)A_I + A_P^2 A_S^* e^{-i\Delta\beta z}\} \quad (3)$$

式中  $z, \alpha, \gamma$  分别为光纤长度、损耗系数和非线性系数.  $A_i (i=P, S, I)$  为泵浦光、探测光和闲频光的波的复振幅.  $\Delta\beta = \beta_S + \beta_I - 2\beta_P$  为参与三波耦合的线性波矢失配. 式(2)和(3)还可以统一表示为

$$\frac{dA_l}{dz} + \frac{\alpha}{2}A_l = i\gamma\{(|A_l|^2 + 2|A_P|^2 + 2|A_k|^2)A_l + A_P^2 A_k^* e^{-i\Delta\beta z}\} \quad (4)$$

$l=S$  时  $k=I, l=I$  时  $k=S$ . 由式(1)和(4)可得

$$\frac{dA_P}{dz} A_P^* + \frac{\alpha}{2}P_P = i\gamma[P_P(2P_0 - P_P) + 2P_P \sqrt{P_S P_I} e^{i\theta}] \quad (5)$$

$$\frac{dA_l}{dz} A_l^* + \frac{\alpha}{2}P_l = i\gamma[P_l(2P_0 - P_l) + P_l \sqrt{P_S P_I} e^{-i\theta}] \quad (6)$$

其中,  $\theta = \Delta\beta z + \theta_S + \theta_I - 2\theta_P, P_0 = P_P + P_S + P_I$ .

由式(5)和(6)可得到

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dP_P}{dz} + \alpha P_P = -\frac{2}{\gamma} \left( \frac{dP_S}{dz} + \alpha P_S \right) = -4P_P \sqrt{P_S P_I} \sin \theta \quad (7)$$

令  $P_{P0}, P_{S0}$  和  $P_{I0}$  为泵浦光、探测光和闲频光的初始光功率,  $x$  为信号光的增量. 于是, 可将  $P_P, P_S, P_I$  分别表示为:  $P_P = (P_{P0} - 2x)e^{-\alpha z}, P_S = (P_{S0} + x)e^{-\alpha z}$  和  $P_I = (P_{I0} + x)e^{-\alpha z}$ . 则有

$$\frac{d\theta}{\gamma dz} = \frac{\Delta\beta}{\gamma} + 2P_P - P_S - P_I + P_P \sqrt{P_S P_I} (P_S^{-1} + P_I^{-1} - 4P_P^{-1}) \cos \theta \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{\gamma dz} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{dz} = -2P_P \sqrt{P_S P_I} e^{\alpha z} \frac{d \cos \theta}{dx} \quad (9)$$

$$\frac{dP_S}{dx} = \frac{dP_I}{dx} = e^{-\alpha z} \quad (10)$$

联立式(8)到(10)可得

$$\left( \frac{\Delta\beta}{\gamma} + \Delta P_0 \right) x - 3x^2 e^{-\alpha z} + 2e^{\alpha z} P_P \sqrt{P_S P_I} \cos \theta =$$

$$2P_{P0} \sqrt{P_{S0} P_{I0}} \cos (\theta_{S0} + \theta_{I0} - 2\theta_{P0})$$

式中  $\Delta P_0 = 2P_{P0} - P_{S0} - P_{I0}$ . 消去  $\theta$  可得到

$$\frac{dx}{dz} = 2\gamma \sqrt{h(x, z)} \quad (11)$$

其中

$$h(x, z) = (P_{P0} - 2x)^2 (P_{S0} + x) (P_{I0} + x) e^{-2\alpha z} - 0.25 \left[ \left( \frac{\Delta\beta}{\gamma} + \Delta P_0 e^{-\alpha z} \right) x - 3x^2 e^{-\alpha z} \right]^2$$

$\Delta\beta$  可由式(12)确定<sup>[9]</sup>

$$\Delta\beta = -2D\pi c \lambda_p^2 \times (1/\lambda_s - 1/\lambda_p)^2 - \lambda_p^4 \pi c (D + \lambda_p S_D) (1/\lambda_s - 1/\lambda_p)^4 \quad (12)$$

其中  $D$  和  $S_D$  为泵浦波长处的色散和色散斜率. 这样以来, 当泵浦光、探测光的波长及功率一定, 在知道光纤的长度、色散以及损耗的情况下就可以求出光纤的非线性系数.

## 3 理论结果分析

Optisystem 作为一款光通信系统设计软件, 在其提供的光纤模型中, 各个参量可以由用户根据需要来设定, 且光纤模型中的四波混频过程考虑了泵浦消耗的影响<sup>[10]</sup>. 根据计算时所需各个参量的值, 设定泵浦光和探测光的波长分别为 1 550.9 nm 和 1 549.36 nm, 泵浦光的光功率为 16 dBm, 探测光功率变化范围为 0 至 15 dBm, 非线性系数  $\gamma$  取  $10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ , 光纤长度  $L$  为 1.5 km, 损耗系数  $\alpha$  为 1.2 dB/km, 色散及色散斜率的设定按图 1 计算. 利用 Matlab 对式(11)进行数值求解, 当  $P_{S0}$  取不同的值时, 可以得到不同的  $x$  值. 由以上所述的推导过程, 可知输出的闲频光功率  $P_I$  可表示为  $P_I =$

$(P_{10} + x)e^{-ax}$ . 从而可以得到闲频光功率与探测光功率的关系曲线. 在仿真软件 Optisystem 中采用相同的参量设置, 搭建仿真系统, 如图 2.

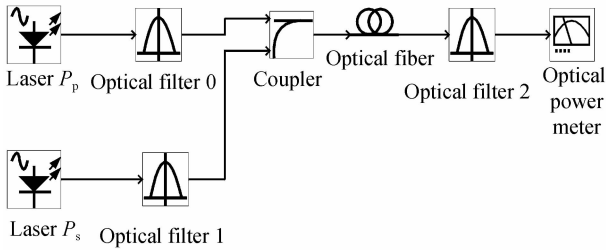


图 2 Optisystem 仿真系统  
Fig. 2 Optisystem simulation system

图 2 中, Laser  $P_p$  是泵浦光源, Laser  $P_s$  是探测光源. 使探测光源的功率从 0 dBm 扫描至 15 dBm, 用光功率计检测输出的闲频光功率, 同样可以得到闲频光功率和探测光功率的关系曲线. 两种方法的计算结果如图 3 所示 ( $\gamma = 10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ ), 可以看出, 当计及泵浦消耗、有光纤损耗时 Matlab 数值计算结果与 Optisystem 仿真结果十分吻合. 图 3 还给出了不计光纤损耗时有无泵浦消耗之间的差异<sup>[11]</sup>. 显然, 在研究 FWM 的过程中考虑泵浦消耗是很有必要的.

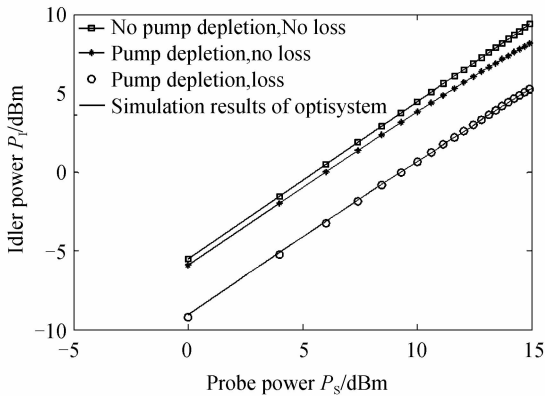


图 3 Matlab 数值计算与 Optisystem 仿真结果比较图  
Fig. 3 Comparison of Matlab numerical results and Optisystem simulation data

图 4 给出了闲频光功率对非线性系数  $\gamma$  的依赖

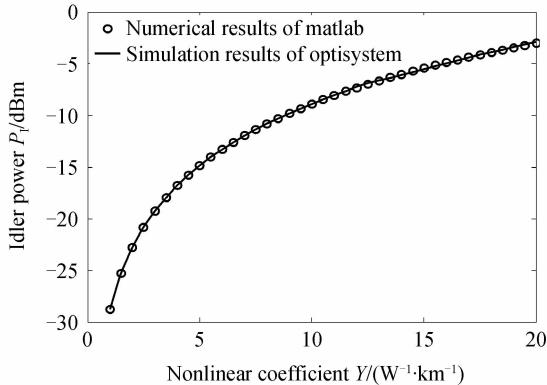


图 4 闲频光功率  $P_1$  随光纤非线性系数  $\gamma$  的变化曲线  
Fig. 4 Idler power versus nonlinear coefficient

关系, 其中探测光功率  $P_s$  取定为 0 dBm, 其他参量保持不变. 由图 4 可以看出, 闲频光功率  $P_1$  随非线性系数  $\gamma$  的增大而增大且变化率越来越小. 从以上的论述中可以知道, 利用式 (11) 作为测量公式来标定光纤非线性系数是可行且可靠的. 只需要在实验中测得闲频光的功率再经过简单的数值计算就可以求出非线性系数  $\gamma$ .

### 4 实验装置与测量结果

图 5 为实验的框图. 其中 WDM Tx 为波分复用光发射机, EDFA 为掺铒光纤放大器, HP-EDFA 为高功率掺铒光纤放大器, PC<sub>1</sub>/PC<sub>2</sub> 为偏振控制器, VOA 为可调衰减器, M<sub>1</sub>/M<sub>2</sub>/M<sub>3</sub> 为检测点, Mux 和 De-Mux 分别为复用器和解复用器, HNLFF 为高非线性光纤, W<sub>1</sub>/W<sub>2</sub> 为光纤的熔接点, OPM 为光功率计. 实验中采用的光源是 8 个通道的光发射机, 相邻通道频率间隔为 200 GHz, 选取通道 CH<sub>33</sub> 和 CH<sub>35</sub> 作为泵浦光和探测光 (对应的波长分别为 1 550.9 nm 和 1 549.36 nm). 泵浦光经过高功率放大器 (High-Power Erbium-Doped Fiber Amplifier, HP-EDFA) 和偏振控制器 2 (Polarization Controller 2, PC<sub>2</sub>) 后与经过光放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)、偏振控制器 1 (Polarization Controller 1, PC<sub>1</sub>) 和可调衰减器 (Variable Optical Attenuator, VOA) 的探测光通过复用器 (Multiplexer, Mux) 耦合进高非线性光纤 (High Nonlinear Fiber, HNLFF), 在光纤的输出端经过解复用器 (Demultiplexer, De-Mux) 滤出闲频光, 然后用光功率计 (Optical Power Meter, OPM) 测量闲频光的功率. 需要说明的是, 实验中采用的 Mux 和 De-Mux 的 8 个端口的中心波长与光发射机 8 个通道的中心波长一一对应, 当选取通道 CH<sub>33</sub> 和 CH<sub>35</sub> 为泵浦光和探测光时, 可以认为 CH<sub>31</sub> 为闲频光所对应的通道端口, 所以检测 CH<sub>31</sub> 的输出光功率作为闲频光的功率值.

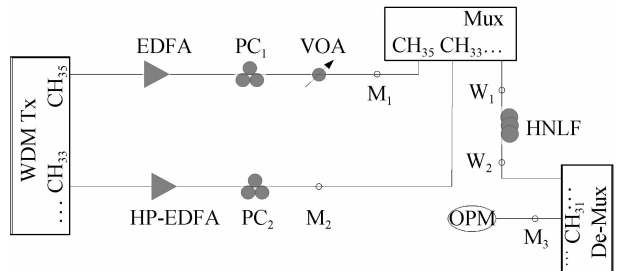


图 5 基于 FWM 测量光纤非线性系数的实验框图  
Fig. 5 Block diagram of experiment

在测量泵浦光的光功率时, 关闭通道 CH<sub>35</sub>, 在检测点 M<sub>2</sub> 处测得的光功率为 18.48 dBm, 在高非

线性光纤输出端测得光功率为 15.196 dBm. 二者之差为复用器 Mux 通道 CH<sub>33</sub> 的插入损耗(1.61 dB), 与厂商所提供光纤损耗(0.47 dB), 以及焊接点 W<sub>1</sub>/W<sub>2</sub> 总损耗(1.2 dB)之和, 因此受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)效应的影响可以被忽略. 经计算, 则实际进入光纤的泵浦光功率为 16.27 dBm. 然后开启通道 CH<sub>35</sub>, 调节可调衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA) 的电压以改变输入的探测光功率. 记录衰减器上的电压值用  $V$  来表示, 同时记录检测点 M<sub>3</sub> 处的光功率值用  $P_3$  来表示. 最后测量检测点 M<sub>1</sub> 处不同的  $V$  值所对应的光功率值用  $P_1$  来表示. 记录的实验数据如表 2.

表 2 实验数据

Table 2 Experimental data

$V/V$	$P_1/\text{dBm}$	$P_3/\text{dBm}$
4.675	11.92	-4
5.608	11.74	-4.22
6.152	11.55	-4.39
6.51	11.37	-4.59
6.871	11.13	-4.83
7.142	10.94	-5.02
7.334	10.76	-5.2
7.551	10.56	-5.42
7.725	10.37	-5.62
7.896	10.17	-5.84
8.037	9.98	-6.03
8.387	9.46	-6.53
8.668	8.98	-7.02
8.937	8.45	-7.55
9.133	8.02	-8.01
9.335	7.53	-8.51
9.54	6.99	-9.04
9.861	6.05	-10.01
10.03	5.48	-10.56
10.169	5.01	-11.03
10.304	4.49	-11.54
10.436	3.98	-12.05
10.54	3.55	-12.5
10.664	3.03	-13.05
10.879	2.04	-14.04
11.073	1.08	-15

由实验框图 5 分析可知,  $P_1$  减去 Mux 通道 CH<sub>35</sub> 的插入损耗 1.61 dB 再减去焊接点 W<sub>1</sub> 的损耗 0.6 dB 才是实际进入光纤的探测光的光功率, 记为  $P_s$ ; 同样  $P_3$  加上 De-Mux 通道 CH<sub>31</sub> 的插入损耗 0.86 dB 再加上焊接点 W<sub>2</sub> 的损耗 0.6 dB 才是光纤输出端闲频光的光功率, 记为  $P_1$  (注: 实验中用到的 Mux/De-Mux 各个通道端口的插入损耗均可测得). 图 6 中实点“·”所标注的是由实验得到的闲频

光的光功率  $P_1$  随探测光功率  $P_s$  的变化曲线.

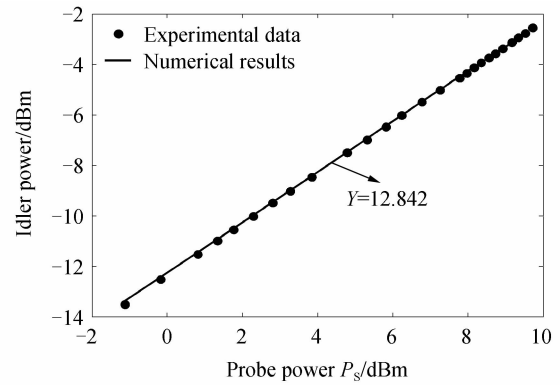


图 6 闲频光功率  $P_1$  功率随输入探测光功率  $P_s$  的变化曲线  
Fig. 6 Idler power  $P_1$  versus probe power  $P_s$

由已得的实验数据, 经过数值计算可以得出光纤的非线性系数  $\gamma$ . 具体方法如下: 先使  $\gamma$  取一初始值, 然后对式(11)进行数值求解, 使探测光初始光功率  $P_{s0}$  等于实验数据  $P_s$ , 这样经过计算就会得到一系列的闲频光功率值记为  $P_{1i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为实验数据的总个数), 令:  $e = \sum_{i=1}^n |P_{1i}' - P_{1i}| / n$ , 其中  $P_{1i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为实验数据. 则  $e$  即为数值计算结果与实验数据的平均误差. 显然, 当非线性系数  $\gamma$  改变时,  $e$  也会改变. 当  $e$  达到最小值时, 对应的  $\gamma$  值为: 12.842  $\text{W}^{-1}/\text{km}$ , 即为测量得到的光纤非线性系数, 如图 6 中直线所示, 它与实验数据吻合得很好.

## 5 结论

本文改进了传统的基于四波混频测量光纤非线性系数的方法, 测量公式考虑了在简并四波混频过程中泵浦消耗和光纤的损耗的影响, 使该方法适用性广、测量更加准确. 另外, 该方法对实验测量装置要求不高, 使其也具有实现简单、测量快速的优点. 利用此方法, 本文测量了实验室中一捆高非线性光纤光线的等效非线性系数, 结果为  $\gamma=12.842 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ , 为下一步实验验证磁光四波混频理论和全光 2R 再生器件的设计提供了重要参量.

### 参考文献

- [1] 刘增基, 周洋溢, 胡辽林, 等. 光纤通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 34.
- [2] SHAN N S M, MATSUMOTO M. 2R regeneration of time-interleaved multiwavelength signals based on higher order four-wave mixing in a fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(1): 27-29.
- [3] MOTAGHIAN NEZAM S M, McGEEHAN J E, GHOLIZADEH R, et al. Measuring the nonlinear coefficient of a fiber span using optical and RF clock tone monitoring[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, San Francisco, California, 2004, **2**: 3.
- [4] PRIGENT L, HAMAIDE J P. Measurement of fiber nonlinear Kerr coefficient by four-wave mixing[J]. *IEEE*

- Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(9): 1092-1095.
- [5] JAWORSKI M. Nonlinear coefficient measurement in nonzero dispersion shifted fiber based on FWM method [C]. *Transparent Optical Networks*, 2002. Proceedings of the 2002 4th International Conference on, 2002, **1**: 237-240.
- [6] MAZZALI C, GROSZ D F, FRAGNITO H L. Simple method for measuring dispersion and nonlinear coefficient near the zero-dispersion wavelength of optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(2): 251-253.
- [7] WANG Qing, WANG Yan, JIANG Qiao-feng, *et al.* Nonlinear coefficient and dispersion parameters measurement utilizing optical parametric amplification[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(1): 75-78.  
王青, 王燕, 蒋俏峰, 等. 利用参量放大效应测量光纤的非线性系数和色散参量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 75-78.
- [8] HANSRYD J, ANDREKSON P A, WESTUND M. Fiber based on optical parametric amplifiers and their applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(3): 506-520.
- [9] MARHIC M E. Fiber optical parametric amplifiers, oscillators and related devices [M]. New York: Cambridge University Press, 2008; 359-360.
- [10] OPTIWAVE. Optical communication system design software, Optisystem 6.0 Tutorials-volume 1. 2007; 241-247.
- [11] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, transl. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010; 289-290.  
阿加瓦尔 G P. 非线性光纤光学 [M]. 贾东方, 余震虹, 译. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2010; 289-290.

## Measurement Method of Fiber Nonlinear Coefficient Based on Four Wave Mixing

LI Zhi, WU Bao-jian, WEN Feng, AN Jun-ge

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communication (Ministry of Education), School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Pump depletion was not taken into account in the four-wave-mixing-based measurement technique for fiber nonlinear coefficient, which made the results inaccurate. To solve this, the elliptical equation with pump depletion and fiber loss was derived based on the theory of degenerate four-wave mixing. The nonlinear coefficient of the tested fiber could be obtained by setting the parameters in numerical calculation and utilizing simple mathematical method. The necessity of considering pump depletion and fiber loss was analyzed. The numerical results were consistent with the Optisystem simulation data. The improved method proposed in the can be applied to the small signal case, but also to the process of parametric saturation. This technique provided an important parameter for further designing the fiber-based  $2R$  regenerators.

**Key words:** Highly nonlinear fiber; Nonlinear coefficient; Four wave mixing; Pump depletion