

色散位移光纤中的四波混频现象 的实验研究*

余建军¹⁾ 郑学彦¹⁾ 管克俭¹⁾ 杨伯君²⁾

1), 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100088

2), 北京邮电大学基础科学部, 北京 100088

摘 要 采用不同波长和类型的光源作为入射光信号, 对色散位移光纤中的四波混频进行了实验研究。实验比较了不同色散位移光纤链组合时产生的四波混频信号的大小, 研究表明, 为了减小四波混频, 应该在每一放大器间距内将零色散点波长距信号光波长较远的光纤铺在最接近掺铒光纤放大器处, 而零色散点波长距信号光波长较近的光纤应该远离掺铒光纤放大器。对实验中的各种现象进行了理论分析, 提出了一些减小四波混频的有益建议, 实验结果和理论分析基本一致。

关键词 波分复用, 四波混频, 色散位移光纤, 位相匹配。

1 引 言

众所周知, 波分复用(WDM)是提高光纤通信系统容量的一种行之有效的方式。系统中普遍采用掺铒光纤放大器作为功率、中继和前置放大器, 这为波分复用的长距离传输提供了有利条件。但是在低色散光纤传输线路中引进掺铒光纤放大器后在一定物理条件下会产生非线性效应。其中四波混频(FWM)是一种影响较大的非线性效应^[1], 它产生的混频信号将会造成传输系统性能的恶化^[2~6]。本文对波分复用中出现的四波混频现象进行了实验研究, 得到了几个有益的结论, 对色散位移波分复用具有一定的指导作用。

2 实验装置和实验结果

实验装置如图 1 所示。分布反馈(DFB)激光器 1、2 和 3 分别称为光源 1、2 和 3。其中心波长分别为 $1.5550 \mu\text{m}$ 、 $1.5541 \mu\text{m}$ 和 $1.5536 \mu\text{m}$, 频谱半宽度分别为 0.20 nm 、 0.12 nm 和 0.08 nm , 输出平均功率分别为 1.00 mW 、 1.00 mW 和 0.04 mW , 其中光源 3 输出功率较小是因为它经过了一个 F-P 腔处理。光源 4 为掺铒光纤放大器 A 的自发辐射信号经过一个带宽为 0.06 nm 的可调滤波器后产生的信号。其产生的光谱如图 2 所示, 可以看到这几个峰值幅度基本相等, 但是在每一中心波长处的功率也比分布反馈激光器 3 的中心波长处的功率小。各峰值之间的距离为 3.3 nm 。调节滤波器的控制电路, 可以改变峰值的中心波长。掺铒光纤

* 邮电部重点资助和国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-09-29; 收到修改稿日期: 1998-02-12

放大器 A 饱和输出平均光功率为 5 dBm, 噪声系数小于 6 dB。此掺铒光纤放大器在波长为 1.554 μm 到 1.556 μm 的输出功率平坦。掺铒光纤放大器 B 饱和输出平均光功率 16 dBm, 噪声系数小于 6 dB。色散位移光纤(DSF)由七段构成, 光纤长度、零色散点和在 1.550 μm 处色散分别为 1) $L = 11.2 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.552 \mu\text{m}$, $D = -0.12 \text{ ps/nm/km}$; 2) $L = 11.7 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.535 \mu\text{m}$, $D = 1.08 \text{ ps/nm/km}$; 3) $L = 11.3 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.538 \mu\text{m}$, $D = 0.99 \text{ ps/nm/km}$; 4) $L = 9.1 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.530 \mu\text{m}$, $D = 1.18 \text{ ps/nm/km}$; 5) $L = 8.7 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.525 \mu\text{m}$, $D = 1.46 \text{ ps/nm/km}$; 6) $L = 8.2 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.529 \mu\text{m}$, $D = 1.20 \text{ ps/nm/km}$; 7) $L = 4.5 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1.596 \mu\text{m}$, $D = -4.00 \text{ ps/nm/km}$ 。光纤总长为 64.7 km。实验中的这七段光纤分以下三种方式组合: 方式 1: 1) \rightarrow 2) \rightarrow 3) \rightarrow 4) \rightarrow 5) \rightarrow 6) \rightarrow 7), 方式 2: 2) \rightarrow 3) \rightarrow 4) \rightarrow 5) \rightarrow 6) \rightarrow 7) \rightarrow 1), 方式 3: 7) \rightarrow 2) \rightarrow 3) \rightarrow 4) \rightarrow 5) \rightarrow 6) \rightarrow 1)。光纤的平均损耗为 0.28 dB/km, 所有光纤有效截面积为 56 μm^2 , 光纤有效折射率系数 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。耦合器分光比均为 1:1。在实验中未使用任何偏振控制器。如果使用偏振控制器, 四波混频现象将更明显, 但不加偏振控制器更接近实际情况。

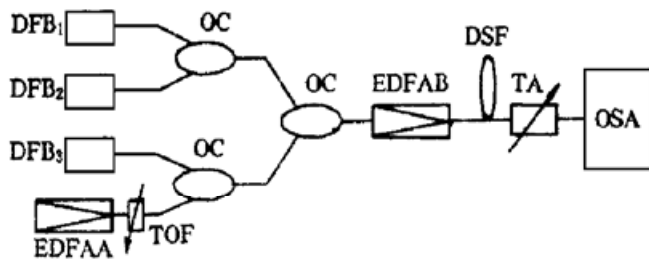


Fig. 1 The experimental setup. DFB LD: distributed feed-back laser diode, OC: optical coupler, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, DSF: dispersion shifted fiber, TA: tunable attenuation, OSA: optical spectrum analyzer

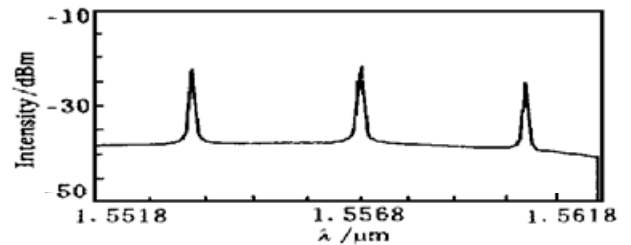


Fig. 2 The spectrum of optical source 4

2.1 实验 1

采用分布反馈激光器 3 和光源 4 作为光源, 经过 1:1 的耦合器后经掺铒光纤放大器 B 放大, 保持掺铒光纤放大器 B 的最大输出功率不变, 经过方式 1、2 和 3 的光纤传输后测得的光谱分别示于图 3(a)、(b)、(c)。可以看到, 在方式 1 的情况下产生的四波混频信号最大, 在方式 3 的情况下产生的四波混频信号最小。实验采用的七段光纤中, 只有第一段光纤的零色散波长 1.5520 μm 距两信号光波长最近。文献[2]指出: 四波混频的产生与信号光的中心波长和光纤的零色散波长的距离有关, 距离越小, 则产生的四波混频信号越大, 文献[6]指出大约每相差 1 nm 产生的四波混频光改变 1 dB。在方式 1 中, 当具有较大能量的信号光进入光纤 1 后产生较大的四波混频信号, 当然在以后的光纤中也要产生一部分四波混频信号, 但是由于它们的零色散点波长距信号光波长较远, 而且光信号能量由于光纤的损耗而逐渐减小, 因此在以后的光纤中产生的四波混频信号较小。在方式 2 和 3 中的第一段光纤的零色散波长距离信号光波长较远, 而能够产生较大的四波混频信号的光纤段 1 放在最后, 而此时的光信号较小, 因此产生的四波混频信号较小。因此在波分复用传输信号过程中如果光纤的色散不同, 为了减小四波混频信号, 应该将这些光纤进行合理的搭配, 应该在每一放大间距内将零色散波长距信号光波长较远的光纤铺在最接近掺铒光纤放大器处, 而零色散点波长距信号光波长

较近的光纤应该远离掺铒光纤放大器。从图 3 所示的光谱中可以看到一个四波混频信号，而在两信号光另外一边的四波混频信号不明显，这似乎与文献[4]中的图 4(a) 或文献[2]中的图 1(b) 不同，文献[2]中产生的四波混频信号在接近光纤零色散波长那边，而文献[4]中的图 4(a) 两边产生的四波混频信号相等。但本实验中的结论却不是这样。在以后的实验中还能看到这一现象，因此，有必要对这一结果作解释。现分以下两种情况讨论。

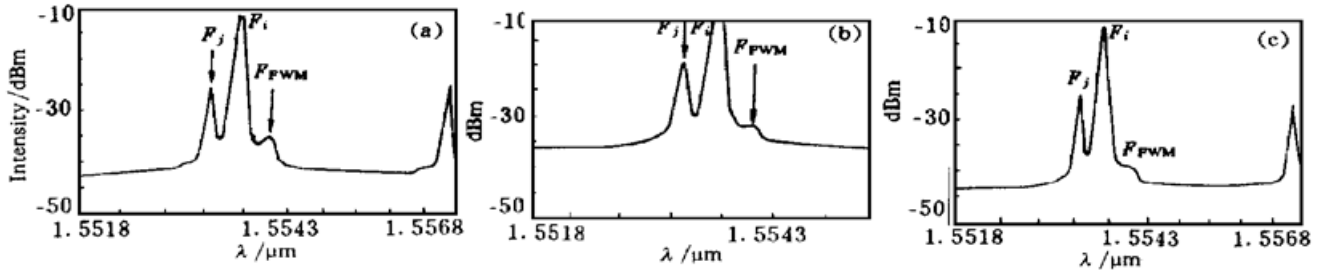


Fig. 3 The spectra transmitted in the fibers of different types. (a) Type 1, (b) Type 2, (c) Type 3

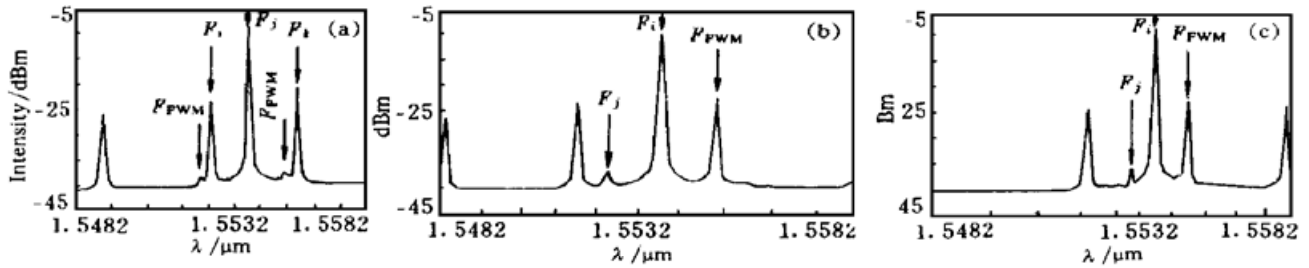


Fig. 4 The mixing spectrum of source 3 and source 4 with different conditions. (a) Three photons, (b) Two photons with short separation, (c) Two photons with long separation

1) 情况 1: 中心波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的信号光简并, 即中心波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的信号光称为 f_i , 将中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的光信号称为 f_j , 那么按照文献[2], 此时的相位失配量 $\Delta\beta_1$ 、混频光功率 P_1 和四波混频的有效效率 η_1 分别表示为

$$\Delta\beta_1 = -9.8 \times 10^{-10} \frac{\pi\lambda^4}{c^2} \left(\frac{dD_c}{d\lambda} \right), \quad P_1 \propto P_i^2 P_j \exp(-\alpha L) \eta_1 \quad (1)$$

$$\eta_1 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_1^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta_1 L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (2)$$

式中 D_c 为光纤的色散, λ 为光波长, c 为真空中光速, α 为光纤的损耗系数, L 为传输距离。此式中的 P_i 是中心波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的光功率, P_j 为中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的光功率。

2) 情况 2: 中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的信号光简并, 即中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的信号光称为 f_i , 将波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的光信号称为 f_j , 此时的相位失配量 $\Delta\beta_2$, 混频光功率 P_2 和四波混频的有效效率 η_2 分别表示为

$$\Delta\beta_2 = -1 \times 10^{-9} \frac{\pi\lambda^4}{c^2} \left(\frac{dD_c}{d\lambda} \right), \quad P_2 \propto P_i^2 P_j \exp(-\alpha L) \eta_2 \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_2^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta_2 L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\} \quad (4)$$

此时 P_i 是中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的光功率, P_j 为中心波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的光功率。比较这两种情况发现, 尽管第一种情况下的四波混频位相更匹配 ($|\Delta\beta_1| < |\Delta\beta_2|$), 但是匹配角相差很小, 而中心波长为 $1.5530 \mu\text{m}$ 的光信号要比中心波长为 $1.5536 \mu\text{m}$ 的光信号小得多, 大约要小 15 dB, 因此 $P_1 < P_2$, 即由第二种情况产生的四波混频信号要远大于第一种情况产生的四

波混频信号。

在以上的实验中固定光源 4, 使其产生的光信号中心波长不变, 现在调节光源 4 的可调滤波器, 使中心波长发生改变, 经过光纤段 1 和光纤段 2 后(以下实验采用的光纤与此相同)测量到如图 4(a)、(b)、(c)所示的光谱, 当光源 4 产生的信号中的两个光信号关于光源 3 的信号光(光源 3 和光源 4 有关的两个光信号)对称时, 可以观察到两个大小一样的四波混频光, 这两个四波混频光可能是这三个信号光混频的结果。比较图 4(b)与图 4(c)发现光源 4 和光源 3 的中心波长距离越小产生的四波混频光越大, 这可以用(1)式或(3)式来解释, 因为入纤的两信号光中心波长距离越小, $|\Delta\beta|$ 越小, 从而四波混频光越大。

2.2 实验 2

采用分布反馈激光器 1 和分布反馈激光器 3 作为光源。在实验 1 中得到的四波混频光信号较小, 这与光源 4 的每一个信号光功率较小有关, 如果将光源 4 换成光源 1, 可以看到此时的四波混频光信号已经相当大, 其光谱如图 5 所示。此时能够看到两个四波混频光信号, 但是其中一个较大, 另外一个较小, 这与光源 3 信号相对较小有关。这说明, 在波分复用的系统中能通过减小某些信号光的幅度来减小混频信号的强度。因为在光纤零色散点附近的信号影响最大, 如果将此四波混频信号的幅度适当减小, 色散引起的性能恶化程度较小, 因此尽管入纤功率较小, 此信道的信噪比也不会明显低于其它信道。

2.3 实验 3

分析中心波长接近的多个信号光传输情况。将分布反馈激光器 2 和分布反馈激光器 3 经过 1:1 的耦合器后, 再经过 1:1 的耦合器与分布反馈激光器 1 相耦合。从图 6 可以看到有许多混频光产生。按照文献[4]中的图 4(b), 三个不同中心波长的信号光应该产生 9 个四波混频光, 在本实验中这几个四波混频信号的中心波长经过计算分别是 (F_1 、 F_2 、 F_3 分别代表分布反馈激光器 3、分布反馈激光器 2 和分布反馈激光器 1 的中心波长):

$$\begin{aligned} F_{331} &= 1.5564 \mu\text{m}, & F_{332} &= 1.5559 \mu\text{m}, & F_{321} &= F_{231} = 1.5555 \mu\text{m}, \\ F_{221} &= 1.5546 \mu\text{m}, & F_{132} &= F_{312} = 1.5545 \mu\text{m}, & F_{223} &= 1.5532 \mu\text{m}, \\ F_{112} &= 1.5531 \mu\text{m}, & F_{123} &= F_{213} = 1.5527 \mu\text{m}, & F_{113} &= 1.5522 \mu\text{m} \end{aligned}$$

由于光谱仪的精细度为 0.1 nm, 而 F_{132} 和 F_{221} 以及 F_{223} 和 F_{112} 相距太近, 因此 F_{132} 和 F_{221} 以及 F_{223} 和 F_{112} 不能分辨。从图 6 可以看到实验结果与计算基本一致。比较这几个四波混频信号的大小, 发现在中心波长为 1.5540 μm 的右边产生的几个混频光信号较大, 这与激光器 1 和激光器 2 产生的信号较大有关。

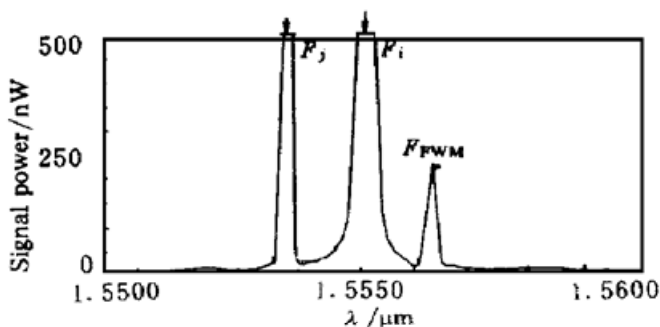


Fig.5 The mixing spectrum with optical signal of DFB₁ and optical signal of DFB₃

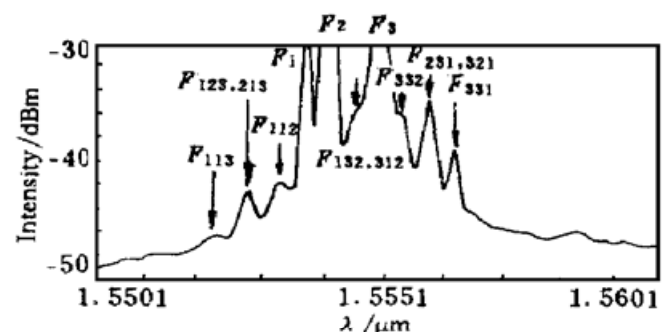


Fig.6 The mixing spectrum of DFB₁, DFB₂ and DFB₃

结 论 采用不同波长和类型的光源作为入射光信号,对色散位移光纤中的四波混频现象进行了实验研究和分析,得到了以下结论:

1) 为了减小色散位移光纤中的四波混频现象,有必要对不同色散的光纤链进行合理的搭配,色散位移光纤的零色散点离信号光越近,此光纤铺设时离放大器的输出越远越好。

2) 当信号光幅度相差较大时,产生的四波混频光的大小和位置与这些信号光的大小有关,一般产生的四波混频光与小信号光关于大信号光对称。

3) 当信号光较强,而且中心波长接近并与色散位移光纤的零色散点波长接近时将会产生许多频率不同的混频光。因此为了减小四波混频现象,各信号光之间的波长间距越大越好,但是由于掺铒光纤放大器的增益带宽有限,而且增益不平坦,增大波长间距将使总信道数目的减小以及不同信道放大性能的变坏。可见它们之间存在着矛盾。

参 考 文 献

- [1] R. H. Stolen, Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(7) : 1062~ 1072
- [2] Kyo Inoue, Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region. *IEEE, J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11) : 1553~ 1560
- [3] R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, F. Forghieri, *et al.*, Four-photon mixing and high-speed WDM systems. *IEEE, J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5) : 841~ 849
- [4] Hidenori Taga, Long distance transmission experiments using the WDM technology. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6) : 1287~ 1298
- [5] F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(5) : 754~ 756
- [6] Eric Saint Georges, Experimental study of four-wave mixing on dispersion shifted fiber and low dispersion fibers with a dense multiwavelength source. *OFC'97*, Washington, D. C.: *Opt. Soc. of Am.*, 1997, **2** : 67~ 49

The Experimental Research on Four-Wave Mixing in WDM System

Yu Jianjun¹⁾ Zheng Xueyan¹⁾ Guan Kejian¹⁾ Yang Bojun²⁾

1), *The School of Telecommunications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088*

2), *The Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088*

(Received 29 September 1997; revised 12 February 1998)

Abstract Employing optical sources with different wavelength as the input optical signals of WDM system, the phenomenon of four-wave mixing in the experiment is analyzed. The amplitudes of four-wave mixing in different optical fiber chains are compared. In order to decrease the four wave mixing effect, the fiber with zero dispersion wave close to the signal optical pulse should be put far away Er-doped fiber amplifier in each amplifier spacing. The experimental phenomena are theoretically analyzed.

Key words wavelength division multiplexing, four-wave mixing, dispersion shifted fiber, phase matching.