

利用频谱分割法实现光纤中四波混频 全光波长变换的实验研究*

郑学彦 余建军 管克俭 叶培大

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

提要 报道了一种新的全光波长变换的方法: 利用频谱分割光纤放大器的自发辐射噪声的方法获得连续可调非相干光源, 在色散位移光纤中, 实现了基于非相干光与相干光之间四波混频机理的全光波长变换。用这种方法实现了对 5 Gbit/s 归零码光信号的波长变换, 最高变换效率为 -24 dB, 四波混频光的波长最大变换范围约为 3.4 nm。

关键词 四波混频, 波长变换, 频谱分割

1 引 言

全光波长变换(AOWC)是实现全光波分复用(WDM)网络的关键器件之一, 它可以实现波长的再利用, 解决光交叉连接(OXC)中的波长竞争问题, 使网络通道层的调度与管理更加灵活^[1]。AOWC可以用光触发多电极的DFB-LD或DBR-LD来实现^[2,3]。也可以用半导体光放大器的非线性效应: 交叉增益调制(XGM)^[4]、交叉相位调制(XPM)^[5]和四波混频(FWM)^[6]来实现。但这些技术存在一些很难克服的缺点, 即对信号光的调制方式和调制速率有限制(SOA中的FWM除外), 即不能实现对信号的透明转换。

实现AOWC的另一种方法是利用光纤中的四波混频, 其优点是实现对任意调制方式和任意速率的信号进行透明转换。传统的方法^[7]是利用两束(其中一束光的波长可调)或多束相干光源来实现的。但在实际的全光波长变换中若在每个节点设置多个连续可调的光源是不经济的, 也不易监控, 另外用全相干光实现FWM的效率也较低。文献[8]报道了利用对掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射噪声(ASE)进行频谱分割(加入可调谐滤波器)来作WDM系统廉价光源的方法。文献[9]报道了用此法实现的非相干光的FWM的实验结果。利用这种方法实现的可调谐光源简单、廉价, 所以在波分复用网络中越来越受到重视。但至今还未见利用这种方法对非相干光与相干光之间进行AOWC的报道。

本文报道了利用可调谐F-P腔滤波器对EDFA的ASE噪声进行频谱分割获得的连续可调非相干光源作探测光, 分别用连续相干光和加5 Gbit/s归零码调制的相干光作泵浦光, 在色散位移光纤的零色散点附近实现基于FWM的AOWC的实验结果。对转换信号效率和转

* 邮电部资助项目。

换信号波长的理论与实验值进行了比较。并且与利用相干光和非相干光实现的波长变换效率进行了比较。另外, 实验中还观察到转换信号频谱反转的现象。

2 理论分析

图 1 (a) 所示为两束相干光入射进光纤产生 FWM 后, 在光纤的输出端所观察到的频谱。但对非相干光而言, 因其包含多个频率分量, 所以当两光束入射进光纤后, 在光纤的输出端所观察到的频谱为多个频率共同作用的结果之和, 如图 1 (b) 所示。图 1 (c) 为一束相干光与一束非相干光产生 FWM 的结果。

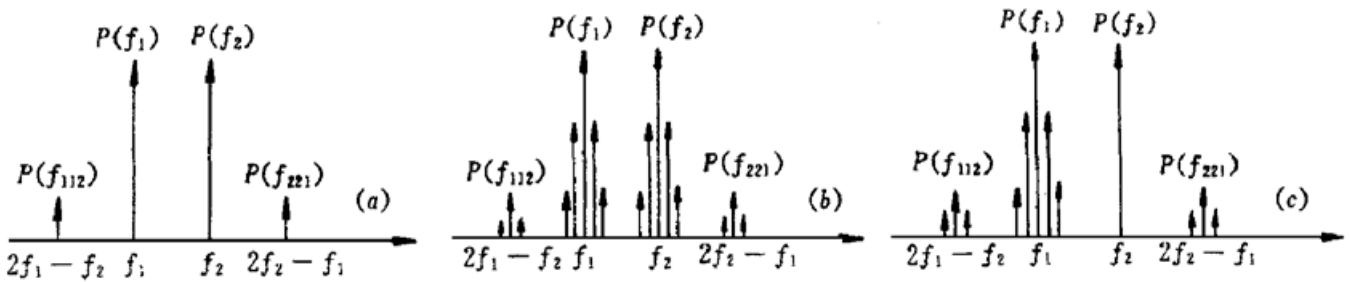


图 1 光纤输出的 FWM 光谱

$P(f)$ 表示信号光、探测光和 FWM 光的功率。(a) 两束相干光产生的 FWM;

(b) 两束非相干光产生的 FWM; (c) 一束相干光和一束非相干光产生的 FWM

Fig. 1 Optical spectrum of the optical fiber output

$P(f)$ is the power of signal light, probe light and FWM light. (a) FWM signals generated by two coherent input signals;

(b) FWM signals generated by two incoherent input signals; (c) FWM signal generated by a coherent and an incoherent signals

FWM 是一个三阶的非线性过程, 对于在光纤中用相干光实现的 FWM, 其 FWM 输出功率可表示为^[7]

$$P_F(L) = \frac{1024\pi^6 f_1^2}{n^2 c^4} (DX)^2 \frac{P_2(0)P_3(0)P_4(0)}{A_{\text{eff}}^2} \exp(-\alpha L) \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha^2} \right]^2 \eta \quad (1)$$

式中 P_2, P_3 和 P_4 分别为频率为 f_2, f_3 和 f_4 的入射光信号功率。 P_F 为由 FWM 所产生的频率为 $f_2 + f_3 - f_4$ 的功率。 n 为光纤的折射率, f_1 为 FWM 产生的新波长, A_{eff} 为光纤有效截面积, c 为真空中光速, α 为光纤损耗系数, L 为光纤长度, D 为简并因子, X 为三阶非线性极化系数。为简单起见, 假设输入光的偏振态是相同的, X 是此条件下的有效值。式中的 η 为转换效率, 它依赖于相位失配因子 $\Delta\beta$, 可表示为

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

对两束光简并的情况相位失配因子为

$$\Delta\beta = -\frac{\lambda^4 \pi}{c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} 2(f_i - f_k)^2 (f_i - f_o) \quad (3)$$

从上式可以看出当 $f_1 = f_0$ 时相位匹配条件自动满足。信号光与泵浦光越接近其效率也越高。

从理论上讲, 非相干光可看作是由许多独立的频率分量组成的, 其频率的复包络呈高斯分布。另外, 每个频率的偏振态是随机的。为简单起见, 我们假设其为线性偏振, 这样三束非相干光产生的 FWM 的功率 $P_F(L)$ 可表示为^[9]

$$P_F(L) = \frac{1024\pi^6}{n^2c^4} (DX)^2 \frac{\exp(-\alpha L)}{A_{\text{eff}}^2} \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} \int f_1^2 \iint \eta(\Delta\beta) P_2(f_2) P_3(f_3) P_4(f_4) df_2 df_3 df_4 \quad (4)$$

式中 $f_1 = f_2 + f_3 - f_4$, 其余各量与前述相同, 只是把相干光的单频功率相乘改成了对非相干光多频的积分。

对相干光与非相干光混合产生的 FWM 功率可表示为

$$P_F(L) = \frac{1024\pi^6}{n^2c^4} (DX)^2 \frac{\exp(-\alpha L)}{A_{\text{eff}}^2} \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]^2}{\alpha^2} P_2(f_2) \int f_1^2 \eta(\Delta\beta) \int P_3(f_3) P_4(f_4) df_3 df_4 \quad (5)$$

式中各项意义与前述相同。根据上述三式可以算出全相干光、全非相干光和相干光与非相干光这三种情况下所产生的 FWM 的效率。

3 实验结果与分析

图 2 为实验装置图。LD 输出的是经 5 Gbit/s 归零码调制的光波长 λ_1 为 1552 nm 的泵浦光。EDFA 输出的 ASE 噪声经带宽为 3 GHz 可调 F-P 腔滤波器后(波长为 λ_2) 与 λ_1 共同入射 EDFA, 放大后再入射进 20 km 的色散位移光纤。在接收端信号经衰减器后用光谱仪观察 FWM 产生的新波长信号。此 EDFA 的小信号增益为 30 dB, 饱和输出功率为 16 dBm。经 EDFA 后, λ_1 的输出功率大约为 16 dBm, λ_2 的输出功率约为 2 dBm。实验所用光纤损耗为 0.2 dB/km, 零色散点约为 $\lambda_0 = 1.549 \mu\text{m}$, $L = 20 \text{ km}$, $dD/d\lambda = 0.07 \text{ ps/km/nm}$, $A_{\text{eff}} = 48 \mu\text{m}^2$, $\chi \approx 6 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{J}$ 。

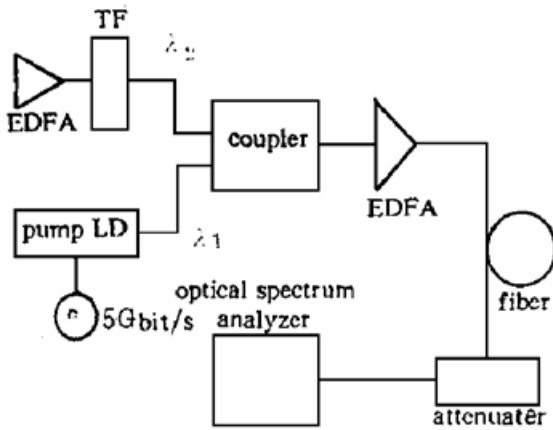


图 2 实验装置图

TF: 可调谐滤波器

Fig. 2 Experimental setup

TF: tunable filter

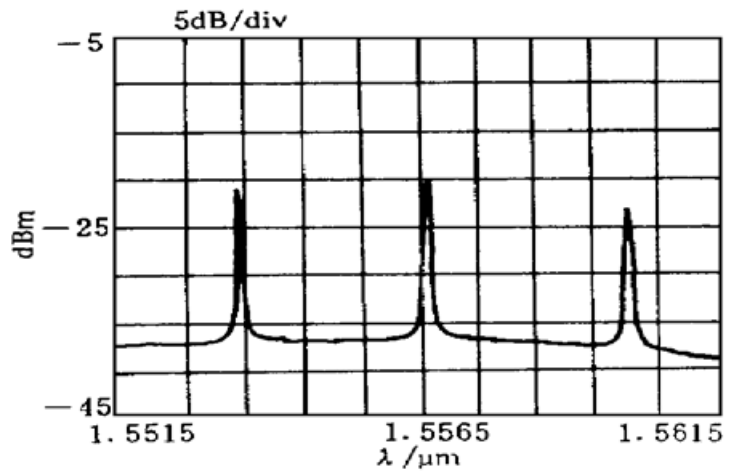


图 3 EDFA 的 ASE 噪声经带宽为 3 GHz 的可调谐 F-P 腔滤波器后的频谱

Fig. 3 The output of incoherent light generated by ASE of EDFA after a tunable F-P filter

图 3 是 EDFA 的 ASE 经带宽为 3 GHz 的可调谐 F-P 腔滤波器后的频谱。图 4 和图 5 分别是非相干光与未加调制的相干光和加 5 Gbit/s 调制时, 经 20 km 的光纤后所观察到的信号光、探测光和新产生的 FWM 光的频谱。FWM 光与信号光波的最大变换间隔 $|\lambda_1 - \lambda_{\text{FWM}}|$ 约为 1.7 nm。在实验中由于滤波器的带宽较窄, 所以非相干光的功率比较小, 只观察到了相干光作泵浦光的情况。这种情况的 FWM 效率与全相干光的情况相似。实验中测得在未加调制情况下, 双光束间距为 22 GHz 时, 产生的 FWM 效率约为 -26 dB。加 5 Gbit/s 的调制后, 两信道间距为 70 GHz 时, FWM 效率约为 -24 dB。加入 5 Gbit/s 的调制信号后, λ_1 的输出下降了约 5

dB, 但 FWM 的效率却提高了约 2 dB, 如图 5 所示。这是由于调制后信号的脉冲宽度很窄(约为 20 ps), 其峰值功率很高(约为 140 mW)造成的。改用长度为 8 km 的光纤, 其 FWM 效率变小, 现象不明显。值得一提的是在实验中未用偏振控制器, 整个实验过程中改变非相干光的偏振方向并未发现 FWM 功率有明显的变化。这说明把 EDFA 的 ASE 看作多个具有随机偏振态的频率之和的假设是正确的。

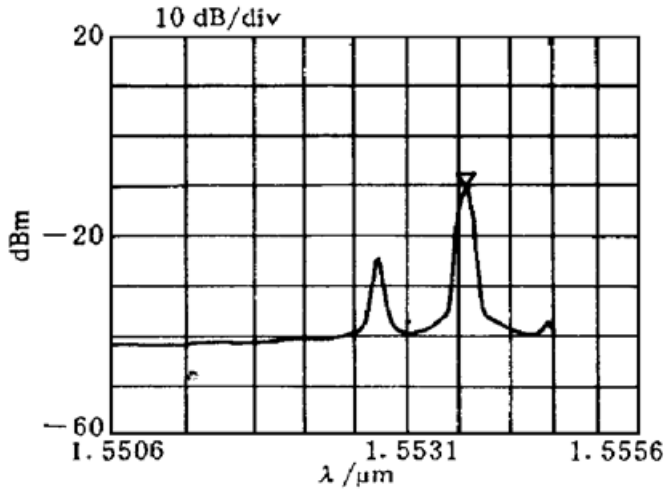


图 4 非相干光与未加调制的相干光在 20 km 色散位移光纤中产生 FWM 的输出频谱

Fig. 4 FWM optical spectrum output after a 20 km dispersion-shifted fiber generated by one coherent light and one incoherent light without modulation

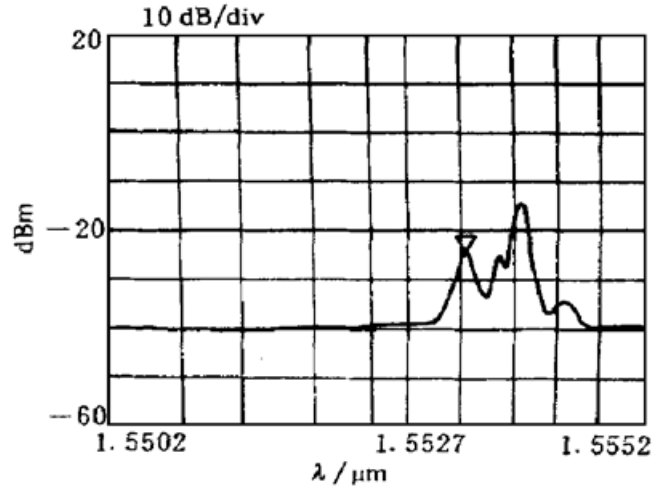


图 5 非相干光与加 5 Gbit/s 调制的相干光在 20 km 色散位移光纤中产生 FWM 的输出频谱

Fig. 5 FWM optical spectrum output after a 20 km dispersion-shifted fiber generated by one coherent light and one incoherent light with 5 Gb/s modulation

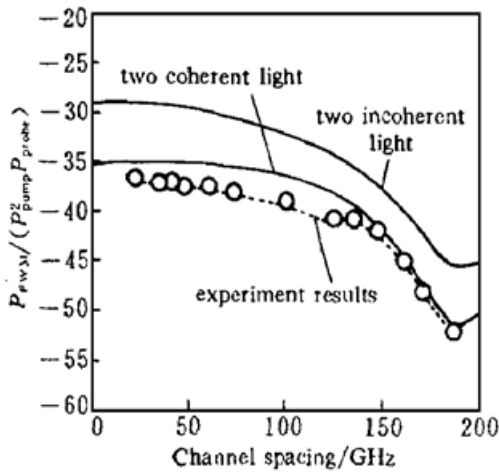


图 6 相干光 FWM 效率与非相干光 FWM 的效率比较。图中上面的和中间的实线分别为非相干光和相干光产生的 FWM 归一化功率理论计算值, 虚线为实验所得相干光与非相干光的 FWM 的归一化效率

Fig. 6 FWM efficiencies of incoherent light sources in comparison with a coherent light source. The top and the middle solid lines represent relative FWM efficiencies generated by two incoherent and two coherent light sources respectively. The dashed line represents the measured data for the FWM power generated by a coherent light and an incoherent light

图 6 是根据公式(1)和(4)的理论计算结果和实验结果比较。图 6 中上面和中间的实线所示分别为全相干光与全非相干光两种情况下, 双光束所产生的 FWM 的效率与信道间距变化曲线。计算结果显示全非相干光的情况比全相干光的情况的效率约高 6 dB。这是因为在两束相干光时, 其简并因子等于 3, 而两束非相干的情况等于 6。对于混合情况, 当 $f_1 = 2f_2 - f_3$ 时, 即相干光作泵浦光, $D = 3$, 与相干光情况相似; 当 $f_1 = 2f_3 - f_2$ 时, 即非相干光作泵浦光, $D = 6$, 与非相干光的情况相似。也就是说混合情况下 FWM 所产生的两束光的功率相差 6 dB。对三光束混频这三种情况的效率基本相同。可以看出实验数据与相干光的情况相似, 这与理论分析的结果也是吻合的。因为非相干光的功率太小, 所以理论上非相干光作泵浦光的高效的 FWM 并未观察到。根据公式(5)计算的实验条件下双光束产生 FWM 的最大效率归一化后

约为-38.2 dB, 而实验中观察到的归一化后的最大效率约为-39 dB。另外, 在实验中我们观察到只有在探测光与信号光的波长很接近时 FWM 的效率才比较高, 而在光纤的零色散点附近调节探测光的波长, FWM 的效率变化并不明显。所观察到的 FWM 效率最大值均在调谐探测光很接近信号光波长的情况下得到的。造成这种理论与实验有差异的原因是由于光纤的零色散点不稳定, 它随长度而变化引起的。这就造成了相位失配因子的变化, 从而导致了转换效率的降低。考虑到这一点, 实验和理论符合得还是比较好的。

在实验中观察到了 5 Gbit/s 的信号经 FWM 后其频谱反转的现象, 文献[10]报道了利用这种方法来增加高速信号传输距离的实验。实验中还观察到非相干光经 20 km 的光纤后的展宽比相干光大些, 这是由于其本身带宽内的 FWM 所造成的, 这也进一步证明了对频谱分割 EDFA 的 ASE 的假设。

从上面的讨论可知: 利用频谱分割 EDFA 的 ASE 噪声的方法实现的基于色散位移光纤中的 FWM 的波变换, 这种方法不需要可调谐 LD, 简单易行, 可以实现对各种信号的透明转换和频谱的反转。在理论上讲当非相干光作泵浦光时 FWM 的效率比全相干方法大约高 6 dB, 是一种很有前途的全光波长变换方法。它的缺点是效率还比较低, 而且体积比较大。对其改进的方法主要有两种: 一种是利用半导体放大器的强非线性来代替色散位移光纤作 FWM 器件^[6]。另一种方法是减小色散位移光纤的纤芯直径, 提高 FWM 的效率和波长变换的范围^[11]。这些方法都已有文献报道, 只要把所使用的相干光源改为本文所述的非相干光源就可以实现 FWM 效率等各方面的较大提高。

参 考 文 献

- 1 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942~ 954
- 2 H. Kawaguchi, K. Magari, H. Yasaka *et al.*. Tunable optical-wavelength conversion using an optically triggerable multielectrode distributed feedback laser diode. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(11): 2153~ 2159
- 3 S. Yamaguchi, K. Kondo, M. Kuno *et al.*. An optical-wavelength conversion laser with tunable range of 30A. in Proc. OFC'88, Jan. 1988, post deadline paper PD 10
- 4 B. Glances, J. M. Wiesenfeld, U. Koren *et al.*. Broadband optical wavelength shifter. in Proc. CLEO'92, Anaheim, CA, 1992, paper CPD27
- 5 T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen *et al.*. All-optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zender configuration. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 53~ 55
- 6 M. C. Tatham, G. Sherlock, L. D. Westbrook. 20-nm optical wavelength conversion using nondegenerate four-wave mixing. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **5**(11): 1303~ 1306
- 7 Kyo Inoue. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1553~ 1561
- 8 J. S. Lee, Y. C. Chung, D. J. DiGiovanni. Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **12**: 1458~ 1461
- 9 Y. S. Jang, Y. C. Chung. Four-wave mixing of spectrum-sliced fiber amplifier light source in a dispersion-shifted fiber. in Tech. Dig., OFC'97 TUN7, 71~ 72
- 10 R. M. Jopson, A. H. Gnauck, R. M. Derosier. 10-Gb/s 360-km transmission over normal-dispersion fiber using mid-system spectral inversion. in Tech. Dig., OFC/IOOC'93, San Jose, CA, 1993, paper PD3, 17~ 20
- 11 Takashi Yamamoto, Masataka Nakazawa. Highly efficient four-wave mixing in an optical fiber with intensity dependent phase matching. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 327~ 329

Experimental Study of All-optical Wavelength Conversion Based on FWM in Optical Fiber Using a Spectrum-sliced Fiber Amplifier Light Source

Zheng Xueyan Yu Jianjun Guan Kejian Ye Peida

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract A novel method of wavelength conversion based on four-wave mixing in a dispersion-shifted fiber using a spectrum-sliced fiber amplifier light source is demonstrated. Utilizing the wavelength region around the zero-dispersion wavelength of a fiber, a coherent light modulated by 5 Gbit/s RZ signal is converted with a conversion efficiency of -24 dB.

Key words four wave mixing, wavelength conversion, spectrum-slicing

全国 MPMH 第七届学术研讨会在唐山市召开

全国数学、物理学、力学、高新技术(MPMH)第七届学术研讨会于1998年7月22日至27日在唐山市召开。

来自全国各地的40余位专家出席了会议。会议共征集录用论文82篇,已由成都科技大学出版社出版发行。本次论文水平较高,能反映出学科发展的主流和前沿问题,40%的论文出自国家和省(部)级基金课题,涌现出一些新思想、新观点、新方法和新理论,反映出相关学科之间的相互沟通、渗透和融合,顺应了学科交叉发展的国际潮流。半数以上的论文出自45岁以下的中青年学者,反映了学科的研究后继有人。大会进行了学术交流,由焦善庆、陈强顺、唐建民等12位教授作了大会专题学术报告。内容涉及高能物理、转动相对论分析力学、激光医学、非线性科学等方面,均受到与会代表的欢迎和好评。

大会认为组建全国数学、物理学、力学、高新技术交叉科学研究会的条件已经成熟。会议期间进行了筹备工作,召开了筹备会议。

(赵梅村)