

信号光的调制对基于光纤光参量放大光脉冲源的改善*

江 阳^{1)†} 于晋龙¹⁾ 胡 浩¹⁾ 张爱旭¹⁾ 张立台¹⁾ 王文睿¹⁾ 杨恩泽¹⁾

1) 天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 贵州大学理学院, 贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵阳 550025)

(2007 年 7 月 4 日收到, 2007 年 9 月 14 日收到修改稿)

在理论上从四波混频的强度耦合方程出发, 给出了基于光纤光参量放大(FOPA)光脉冲的光场表达式, 并进一步分析了信号光被相位调制或强度调制后, 光脉冲的频率啁啾和强度演化. 结论指出: 若信号光被强度调制, 对所生成脉冲宽度无明显的影响, 但可以提高消光比; 若信号光被相位调制, 所生成的脉冲具有更大的线性正啁啾, 可以在相同的抽运功率条件下得到比无相位调制时更窄的脉冲. 实验上给出了 10 GHz 工作速率下的结果, 其结果与理论分析符合得很好. 通过信号光的相位调制, 在 0.5 W 平均抽运功率条件下得到了消光比 22 dB, 脉宽为 5.2 ps 的变换极限脉冲, 与无调制情况相比脉宽减小了 2 ps.

关键词: 光纤参量放大, 四波混频, 光脉冲源, 频率啁啾

PACC: 4265K, 4281W

1. 引 言

光纤光参量放大(FOPA)是光纤通信中一类具有广泛应用的非线性过程^[1], 它除了用于光信号放大^[2]外, 还可以用于光时分复用(OTDM)系统的解复用^[3], 全光取样^[4], 波长变换^[5], 全光信号再生^[6]等. 而基于 FOPA 的光脉冲源由于在波长上大范围可调, 并可以生成用于波分复用系统(WDM)的多波长光脉冲, 使其具有很好的应用潜力, 也成为近年来的一个研究热点^[7-13]. Clausen 等^[8]采用工作在增益开关条件下的分布反馈激光器(GS-DFB)作为抽运光, 得到了重复频率 10 GHz 的脉冲并用于 160 km 的传输实验和 40 Gb/s 的复用/解复用实验. Hansryd 等^[7]利用正弦强度调制的抽运光直接获得了重复频率 40 GHz 的脉冲输出. 此后 Toroumidis 等利用正弦强度调制的抽运光所产生的脉冲用于 160 Gb/s 信号传输的实验^[9]. 在这些方案中, 信号光为连续(CW)光, 而抽运光为脉冲或正弦型强度调制光. 通过四波混频过程中信号增益成指数形式的特点, 可以在信号光

波长上生成一个占空比更小的脉冲, 并且所生成的脉冲带有线性啁啾, 可以通过色散介质的作用压窄. 为了适应更高速光通信系统的要求, 可以通过增加抽运光的功率以得到更窄的脉冲. 但是, 这除了对光放大器提出更高要求外还具有实际困难. 我们知道当抽运功率达到一定程度时, 放大的自发辐射(ASE)噪声会使信号光的增益饱和, 降低所得到脉冲的光信噪比(OSNR). 因此在不提高抽运功率的条件下获得更高质量的光脉冲是一项有意义的工作.

本文通过理论分析和实验, 研究了利用正弦型强度调制光作为抽运光产生脉冲的方案中, 当信号光被同频正弦信号强度调制或相位调制时对所生成脉冲的影响. 在理论上推导出信号光被相位或强度调制后所得脉冲的光场表达式. 通过分析光场的振幅和频率啁啾得出: 若信号光被强度调制, 对最终的脉冲宽度没有明显的影响, 但可以提高消光比; 若信号光被相位调制, 所生成的脉冲具有更大的线性啁啾, 通过色散介质压窄可以在相同的抽运功率条件下得到比无相位调制时更窄的脉冲. 最后演示了 10 GHz 频率条件下的实验, 得到与理论分析相同的结

* 国家自然科学基金(批准号: 60736035), 天津市应用基础研究计划项目(批准号: 06YFJMJC01400), 贵州省国际科技合作重点项目计划(批准号: 黔科合外 G 字(2007)400112 号)资助的课题.

† E-mail: jiangyang415@hotmail.com

果,获得变换极限的脉冲输出.

2. 理论分析

在单抽运条件下的光纤参量放大过程中,当抽运功率远大于信号功率并假设在参量过程中抽运功率没有损耗时,我们有信号场 $A_s(z)$ 和闲频场 $A_i(z)$ 的线性耦合方程^[1,4,15]

$$\frac{dA_s}{dz} = 2i\gamma [P_p A_s + P_p e^{-i\theta} A_i^*], \quad (1)$$

$$\frac{dA_i^*}{dz} = -2i\gamma [P_p A_i^* + P_p e^{i\theta} A_s],$$

式中 P_p 表示抽运功率, γ 为非线性系数. θ 定义为

$$\theta = [\Delta k - 3\gamma P_p]z,$$

其中 $\Delta k = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p)$. $\omega_s, \omega_i, \omega_p$ 分别表示信号光,闲频光与抽运光的角频率, $\beta(\omega_s), \beta(\omega_i), \beta(\omega_p)$ 为相应的色散.

引入 $A_s = B_s \exp[2i\gamma P_p z]; A_i = B_i \exp[2i\gamma P_p z]$,

(1) 式可写为

$$\frac{dB_s}{dz} = 2i\gamma P_p \exp[-i\kappa z] B_i^*, \quad (2)$$

$$\frac{dB_i^*}{dz} = -2i\gamma P_p \exp[i\kappa z] B_s,$$

式中的 κ 为相位失配量,定义为 $\kappa = \Delta k + \gamma P_p$. 方程

(2) 有如下通解:

$$B_s(z) = [ae^{gz} + be^{-gz}]e^{-i\kappa z/2}, \quad (3)$$

$$B_i^*(z) = [ce^{gz} + de^{-gz}]e^{i\kappa z/2},$$

其中 a, b, c, d 可由边界条件决定, g 为参量增益并有 $g = \sqrt{(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2}$. 在初始信号光为连续光条件下,可以得到信号光场的最终表达式

$$A_s(z) = \left[\sqrt{P_s} \cosh(gz) + i \frac{\kappa}{2g} \sqrt{P_s} \sinh(gz) \right] \times e^{-i\kappa z/2} \cdot e^{(2i\gamma P_p z)}, \quad (4)$$

这里的 P_s 为信号光功率. 进而有信号光增益

$$G = P_s(z)/P_s(0) = 1 + (\gamma P_p/g)^2 \sinh^2(gz).$$

若相位严格匹配 ($\kappa = 0$) 且 $gz \gg 1$, 最大增益可近似写为

$$G \approx \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p z). \quad (5)$$

注意到,当 FOPA 用作于脉冲源时,抽运光被一频率为 f 的正弦信号作强度调制, P_p 可表示为

$$P_p = P_p(t) = P_0(1 + \sin 2\pi ft), \quad (6)$$

这里的 P_0 为抽运光的平均功率. 因此有

$$G \approx \frac{1}{4} \exp[2\gamma P_0(1 + \sin 2\pi ft)z]. \quad (7)$$

图 1 给出了由 (6) 式和 (7) 式所决定的抽运功率与增益的关系. 从 (7) 式和图 1, 可以看出, 抽运功率越大, 增益越大 (非饱和情况下) 且所生成的脉冲宽度越小, 脉冲形状与高斯脉冲接近. 脉冲的消光比 (基座抑制比) 为

$$ER = (P_s G_{\max})/P_s \approx \frac{1}{4} \exp[4\gamma P_0 z].$$

下面考虑当信号光被调制后的情况.

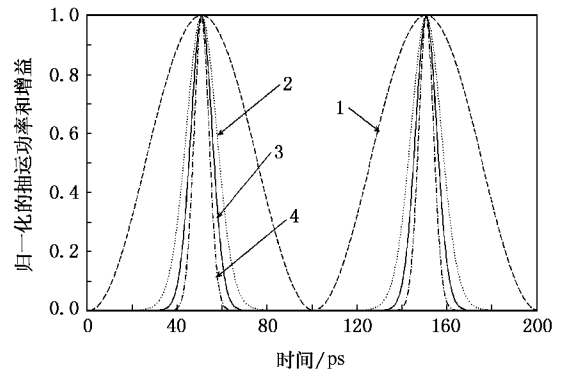


图 1 抽运功率与增益 (由 (6) 式和 (7) 式计算的归一化功率和增益. 计算中假设调制频率为 10 GHz, 非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 光纤长 500 m. 1 为抽运光功率变化曲线, 2—4 为抽运光功率分别为 0.5, 1 和 2 W 的增益曲线)

1) 若注入的信号光被同频信号相位调制, 四波混频过程后所得到的信号光光场为^[16]

$$A_s(z, t) = \left[\sqrt{P_s} \cosh(gz) + i \frac{\kappa}{2g} \sqrt{P_s} \sinh(gz) \right] \times e^{-i\kappa z/2} \cdot e^{(2i\gamma P_p(t)z)} \cdot e^{-[\omega_s t - \Delta\theta \sin(2\pi ft + \Delta\varphi)]}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为抽运光与信号光调制信号之间的相位差, $\Delta\theta$ 为相位调制的调制指数. 由此可以得出信号光光场的瞬时频率^[17]

$$\begin{aligned} \nu(t) &= -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \\ &= -\frac{3}{2} \gamma P_0 z f \cos 2\pi ft + \frac{\omega_s}{2\pi} \\ &\quad - \Delta\theta \cdot f \cos(2\pi ft + \Delta\varphi), \end{aligned} \quad (9)$$

频率啁啾为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu}{\partial t} &= 3\gamma P_0 z \pi f^2 \sin 2\pi ft \\ &\quad + \Delta\theta \cdot 2\pi f^2 \sin(2\pi ft + \Delta\varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

当调节 $\Delta\varphi$ 使得 $\Delta\varphi = 2m\pi$ (m 为整数) 时, 频率啁啾可取到极值

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{\pm \max} = (3\gamma P_0 z + 2\Delta\theta)\pi f^2 \sin 2\pi ft, \quad (11)$$

且在 $ft = n/2 + 1/4$ 和 $ft = n/2 + 3/4$ (n 取整数) 附近, 频率啁啾近似于线性变化. 由上式可以看出, 增加抽运光功率或加大相位调制指数都是获得更大啁啾的有效方法. 图 2 给出了抽运功率, 信号增益与信号光瞬时频率的关系(此时认为 $\Delta\varphi = 2m\pi$). 我们注意到, 当 $ft = n/2 + 1/4$ 时, 信号光有最大正啁啾并同时得到最大增益, 谱宽由四波混频和相位调制的和决定. 而当 $ft = n/2 + 3/4$ 时, 信号光有最大负啁啾而增益接近于零. 因此, 当信号光通过一定长度的负色散介质(例如标准普通单模光纤(SSMF))后, 光脉冲将被压窄. 而负啁啾部分几乎没有获得增益, 将保持其注入时的功率, 形成脉冲的基底. 最终所得脉冲消光比与连续信号光情况相同. 对闲频光也可以采用类似的分析方法, 但是需要注意到闲频光相位与信号光相位共轭, 因此所得闲频光的频率啁啾与强度关系与信号光不相同. 此外在实验中往往在抽运光上加了相位调制以抑制受激布里渊散射, 这会对闲频光产生双倍的相位扰动, 在时域上体现为闲频光脉冲的抖动.

2) 当信号光被同频信号强度调制时, 四波混频后所得到的信号光光场为

$$A_s(z, t) = [\sqrt{P_s(t)} \cos(kz) + i \frac{\kappa}{2g} \sqrt{P_s(t)} \sin(kz)] \times e^{-\kappa z/2} \cdot e^{(2i\gamma P_p(t)z)}, \quad (12)$$

$P_s(t)$ 为注入的信号光功率, 仍可表示为 $P_s(t) = P_0 [1 + \sin(2\pi ft + \Delta\varphi)]$, 其中 P_0 为注入的信号光的平均功率. 当 $\Delta\varphi = 2m\pi$ 时, 信号光光场的振幅变化与增益变化同步. 在前面推导的前提条件下, 信号光的功率变化不引起增益的变化, 因此此时所得到的频率啁啾与连续光时的情况相同. 从时域上看, 此时消光比为

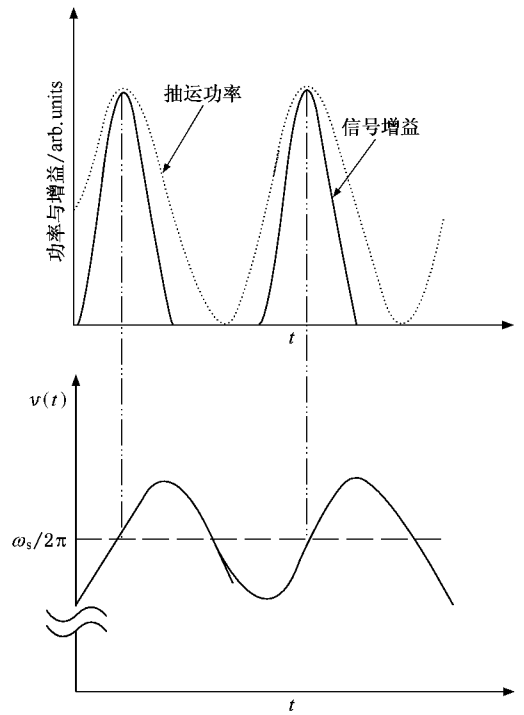


图 2 抽运功率, 信号增益与信号光瞬时频率的关系

$$ER = 2P_{s0} G_{\max} / I_0 = \infty.$$

实际情况下, 光强度调制信号都有一定的直流偏置, 因而不会出现无穷大的消光比, 但是仍然可以相信此时脉冲的消光比得到了一定的改善, 其程度由信号光的调制深度决定. 对闲频光而言, 任何情况下所生成脉冲的消光比始终为 ∞ .

3. 实 验

图 3 给出了实验原理图. 两台可调谐分布反馈半导体激光器(DFB-Laser)作为抽运与信号光源. 频率分别为 100 MHz, 300 MHz, 900 MHz 和 2700 MHz

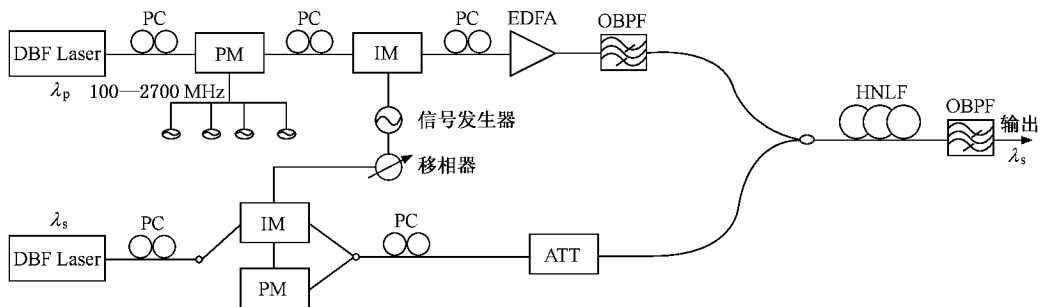


图 3 实验原理图(DFB Laser 为分布反馈激光器; PC 为偏振控制器; PM 为相位调制器; IM 为强度调制器; OBPF 为光带通滤波器; ATT 为衰减器; HNLF 为高非线性光纤)

的四个正弦信号混合后对抽运光进行相位调制以抑制受激布里渊散射(SBS),然后再由一个频率为 10 GHz 的正弦信号对其进行强度调制.大功率掺铒光纤放大器(EDFA)将抽运光放大后通过一个带宽为 2 nm 的光带通滤波器(OBPF)滤除 ASE 噪声并与信号光耦合后注入高非线性光纤(HNLF).实验中使用的 HNLF 长为 700 m,非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$,零色散波长在 1539 nm.信号光经由一个 LiNbO_3 相位调制器(或马赫-曾德结构的 LiNbO_3 强度调制器)调制.

移相器用以调节抽运光与信号光调制信号间的相差.系统输出端使用一个带宽为 2 nm 的 OBPF 滤出信号光后进行分析.

在实验中,抽运光与信号光波长分别为 1547 nm 和 1559 nm,光谱图如图 4(a)所示.在功率为 1 W 的直流光抽运条件下 FOPA 的开关增益曲线由图 4(b)给出.为了比较信号光被调制前后对生成脉冲的影响,我们先分析了信号光无调制(连续光)时的情况.调节抽运光平均功率为 0.5 W,信号光功率为 1.9 dBm,

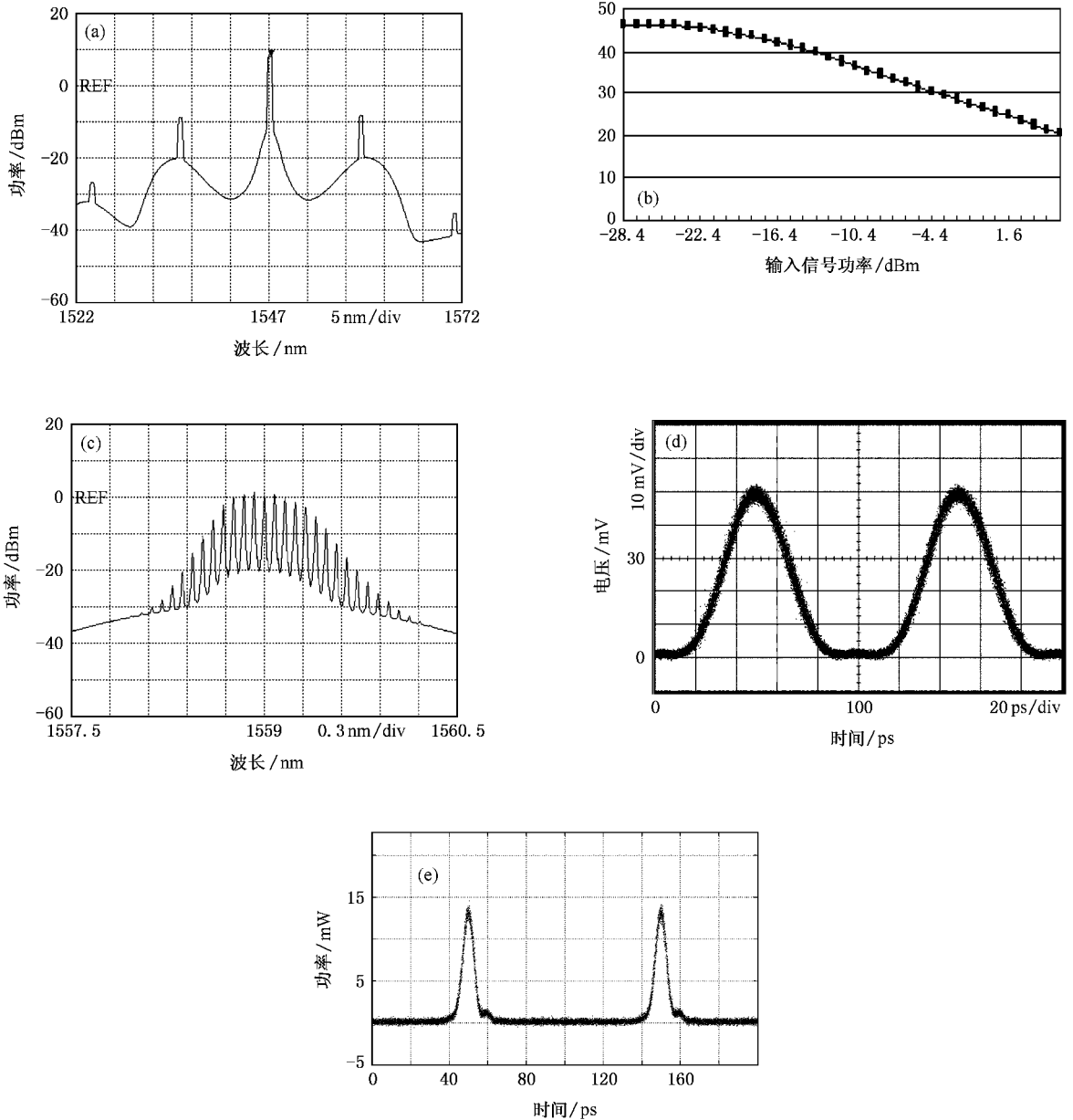


图 4 实验中 FOPA 的增益谱和增益曲线以及信号光为连续光时所生成光脉冲的频域和时域结果($\lambda_p = 1547 \text{ nm}$, $\lambda_s = 1559 \text{ nm}$) (a) 直流抽运功率为 1 W, 连续信号光功率为 -28 dBm 时的 FOPA 光谱, 分辨率为 1 nm. (b) 在直流抽运功率为 1 W 时, 所测信号光的开关增益曲线. (c) 连续信号光条件下 FOPA 输出脉冲的光谱, 光谱分辨率为 0.05 nm, $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.5 \text{ nm}$. (d) 光电探测器接收后示波器上显示的波形, 脉冲宽度为 34 ps. (e) 被 2.6 km SSMF 压窄后的脉冲在高速光取样系统中显示的波形, 脉冲宽度为 7.2 ps

得到 FOPA 输出的信号光光谱的半极大全宽 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.5 \text{ nm}$ (见图 4(c)). 光信号经由一个带宽 45 GHz 的光电探测器接收后在带宽 50 GHz 采样示波器上测得脉冲宽度为 34 ps (图 4(d)). 将该光脉冲通过 2.6 km 的 SSMF (色散: 17 ps/nm/km) 压窄后输入带宽为 500 GHz 的高速光采样系统进行分析, 测得脉冲宽度为 7.2 ps (图 4(e)), 消光比为 22 dB. 此时可计算出时间带宽积为 $\Delta\nu \cdot \Delta T = 0.45$, 几乎为我们假设的高斯型脉冲的傅里叶变换极限.

考虑信号光被相位调制的情况. 在 15.5 dBm 电调制信号驱动下, $V_{\pi} = 3.5 \text{ V}$ 的相位调制器具有约为 1π 的调制指数, 相位调制光的光谱宽为 0.27 nm, 见图 5(a). 保持抽运光与信号光功率与前一情况相同, 调节移相器, 在 FOPA 输出端的信号光光谱宽度可从反相时的 0.24 nm (图 5(b)) 到同相时的 0.7 nm (图 5(c)) 之间变化. 这个结果与理论分析中的 (9) 式符合得很好. 在同相情况下, 信号光通过

1.9 km 的 SSMF 压窄后测得脉宽为 5.2 ps (图 5(d)). 时间带宽积为 $\Delta\nu \cdot \Delta T = 0.45$, 仍然是接近变换极限的脉冲. 若把抽运光平均功率提高到 1 W 时, 信号光光谱宽增加到 1 nm (通过 OBPF 后实为 0.9 nm), 被 1.2 km 的 SSMF 压窄后可得到脉宽为 4.2 ps 的接近变换极限的脉冲, 但此时 OSNR 已有一定程度恶化, 时域上看脉冲底部噪声也较大.

当把信号光一路的相位调制器换为强度调制器后, 仍在抽运功率 0.5 W, 信号光平均功率为 1.9 dBm 的条件下, 光脉冲光谱宽度变为 0.57 nm, 这个结果与 (11) 式给出的结果基本是相符的. 这里的光谱有轻微展宽, 是由于在 (11) 式中我们没有考虑正弦强度调制产生的边带对光谱宽度的影响. 改变抽运光与信号光的相位差, 光谱和时域中脉冲信号的对称性被破坏. 由于连续信号光情况下对消光比的测量已达到测试系统的极限, 所以此时消光比的改善情况无法由测量结果给出.

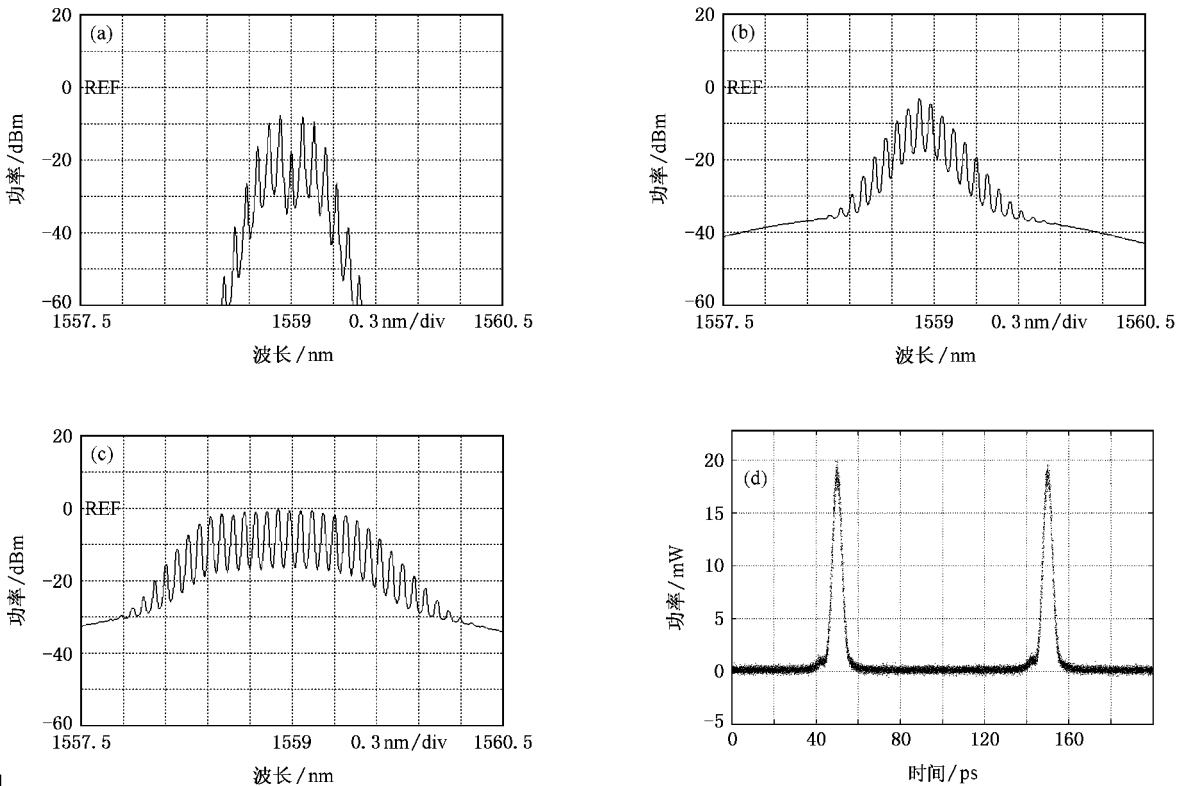


图 5 信号光相位调制以及所产生光脉冲的频域和时域结果(光谱分辨率为 0.05 nm) (a) 信号光相位调之后的光谱 ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.27 \text{ nm}$). (b) 信号光相位调制信号与抽运光强度调制信号反相时所得光脉冲的光谱 ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.24 \text{ nm}$). (c) 信号光相位调制信号与抽运光强度调制信号同相时所得光脉冲的光谱 ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.4 \text{ nm}$). (d) 被 1.9 km SSMF 压窄后的脉冲在高速光取样系统中显示的波形

4. 结 论

在理论上分析了基于光纤光参量放大光脉冲源的光场特性,并给出了当信号光被相位或强度调制后所得脉冲的光场表达式.分析指出对信号光强度调制有利于提高光脉冲的消光比,而相位调制有利于获得更小的脉冲宽度的结论.通过实验,我们验证了理论分析的结果并在 0.5 W 平均抽运功率条件下得到了重复频率为 10 GHz,消光比 22 dB,脉宽为 5.2 ps 的变换极限脉冲.该研究完善了这一类脉冲

源的性能,可以利用相位调制在不提高抽运功率条件下获得更小的脉宽并保持 OSNR;或利用相位调制平衡多波长脉冲产生方式下各路由于增益不同而不能获得相同脉宽的问题;也可以同时使用强度和相位调制以获得质量更好的光脉冲.

感谢在瑞典 Chalmers University of Technology 的 MC2 实验室访问期间 Prof. Peter A. Andrekson 和 Dr. Henrik Sunnerud 的热心指导和在实验上提供的帮助.感谢 MC2 实验室对该实验的支持.

- [1] Hansryd J, Andrekson P A, Westlund M, Li J, Hedekvist P O 2002 *IEEE J. Sel. Top. In Quantum Electron.* **8** 506
- [2] Yang F S, Marhic M E, Kazovsky L G 1996 *IEE Electron. Lett.* **32** 2336
- [3] Hedekvist P O, Andrekson P A 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 732
- [4] Westlund M, Sunnerud H, Karlsson M, Andrekson P A 2005 *IEEE J. Lightwave Technol.* **23** 1088
- [5] McKerracher R W, Blows J L, de Sterke C M 2004 *Opt. Express.* **12** 2810
- [6] Radic S, McKinstrie C J, Jopson R M, Centanni J C, Chraplyvy A R 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 957
- [7] Hansryd J, Andrekson P A 2001 *IEE Electron. Lett.* **37** 584
- [8] Clausen A T, Oxenløwe L, Peucheret C, Poulsen H N, Jeppesen P, Knudsen S N, Grüner-Nielsen L 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 70
- [9] Torounidis T, Westlund M, Sunnerud H, Bengt-Erik Olsson, Peter A, Andrekson 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 312
- [10] Torounidis T, Sunnerud H, Per Olof Hedekvist, Andrekson P A 2002 *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC)*
- [11] Zhao W, Liu H J, Wang Y S, Wang H Y, Cheng Z, Chen G F 2005 *Chin. Phys.* **14** 359
- [12] Jiang Y L, Zhao B Z, Liang X Y, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z, Hu X P, Zhu S N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2709 (in Chinese) [姜永亮、赵保真、梁晓燕、冷雨欣、李儒新、徐至展、胡小鹏、祝世宁 2007 物理学报 **56** 2709]
- [13] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Y S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 105 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵卫、王屹山 2004 物理学报 **53** 105]
- [14] Torounidis T, Karlsson M, Andrekson P A 2005 *IEEE J. Lightwave Technol.* **23** 4067
- [15] Agrawal G P 1995 *Nonlinear Fiber Optics* 2nd ed (San Diego, CA, USA :Academic Press)
- [16] Tetsuro Kobayashi, Hiroshi Yao, Kazuhiko Amano, Yasushi Fukushima, Akihiro Morimoto, Tadasi Sueta 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 382
- [17] Jiang Y, Yu J L, Hu H, Wang W R, Wang Y T, Yang E Z 2007 *Opt. Eng.* **46** 090502

The improvement of fiber parametric amplifier pulse source via modulation of signal light^{*}

Jiang Yang^{1,2)†} Yu Jin-Long¹⁾ Hu Hao¹⁾ Zhang Ai-Xu¹⁾
Zhang Li-Tai¹⁾ Wang Wen-Rui¹⁾ Yang En-Ze¹⁾

¹ *School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of*

Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

² *Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University, Guiyang 550025, China)*

(Received 4 July 2007; revised manuscript received 14 September 2007)

Abstract

Starting from the four-wave mixing coupled equations, we obtain the optical field expression of a fiber optical parametric amplifier (FOPA) pulse source. Furthermore, we analyze the evolution of pulse frequency chirp and amplitude when the signal light is phase or intensity modulated. It is concluded that the pulse width has no significant improvement but the extinction ratio is improved when the signal light is intensity modulated; however, when the signal light is phase modulated, the pulse has enhanced positive linear frequency chirp, which means that we may obtain shorter pulse than that of the FOPA based pulse source which has the same pump power but without phase modulation on signal light. Finally, the experimental results of 10 GHz operation demonstrated the validity of our theoretical analysis. Using the FOPA pulse source with 0.5 W average pump power and phase modulated signal light, the transform limited pulse is obtained which has 22 dB extinction ratio and 5.2 ps pulse width, which is 2 ps narrower than that without modulation.

Keywords: fiber optical parametric amplifier, four-wave mixing, optical pulse source, frequency chirp

PACC: 4265K, 4281W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736035), the Applied Basic Research Programs Foundation of Tianjin China (Grant No. 06YFJMJC01400) and Funds for International Cooperation Foundation of Guizhou Province, China (Grant No. (2007)400112).

[†] E-mail: jiangyang415@hotmail.com