

半导体光放大器用于相位补偿的实现

金 韬

黄德修

(浙江大学信息与电子工程系 杭州 310027) (华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

摘要 行波半导体光放大器的相位补偿作用削弱了啁啾光脉冲在光纤中传输时由于色散引起的展宽. 本文讨论了初始光脉冲形状和光放大器饱和度对相位补偿的影响, 解释了实验中观察到的相位补偿光脉冲光谱的多峰结构现象.

PACC: 4255P, 4260F, 4260H

1 引言

在高速率、长距离的光纤通信系统中, 光源啁啾和光纤色散始终是限制传输距离和数据容量的主要原因之一. 传统的包括光-电-光转换和再生的中继器虽然能对微弱光信号进行放大和整形, 但设备复杂, 而且转换速率受到限制. 行波半导体光放大器正是弥补了传统中继器的缺陷^[1,2].

行波半导体光放大器的相位补偿特性已在文献[2]中进行了详细的理论分析研究, 本文从实验上研究了光放大器相位补偿的实现, 并依据相位补偿光脉冲在光纤中的演变情况来判断光放大器相位补偿的效果.

2 理论模型

在直接调制的半导体激光器中, 频率啁啾主要由载流子浓度调制引起, 它可表示为^[3]

$$\Delta\nu_{LD}(\tau) = \frac{\alpha_{LD}}{4\pi} \left(\frac{1}{P_{LD}} \frac{dP_{LD}}{d\tau} \right) \quad (1)$$

式中 α_{LD} 是激光器的线宽增强因子; P_{LD} 是激光器的输出功率.

当激光器出射的啁啾光脉冲经过工作在饱和状态下的行波半导体光放大器传输后, 输出光脉冲不但在能量上得到了放大, 而且同时附加上了相应的频率啁啾^[2], 这一附加的啁啾可能部分补偿、甚至完全抵消激光器的啁啾. 光放大器输出光脉冲的光场可描述为^[2]

$$u_{LSO}(\tau) = \sqrt{P_{LD}(\tau)} \exp[1/2h(\tau)] \exp(i\varphi) \quad (2)$$

其中

金 韬 男, 1968 年生, 博士后, 从事光波导有源和无源器件的研究
1996 年 4 月 14 日收到初稿, 1996 年 6 月 15 日收到修改稿

$$\varphi = 2\pi\nu_0\tau + \varphi_{LD} + \varphi_{SOA} \quad (3)$$

$$\varphi_{LD} = - \int \Delta\nu_{LD}(\tau)d\tau \quad (4)$$

$$\varphi_{SOA} = - 1/2\alpha_{SOA}h(\tau) \quad (5)$$

式中 α_{SOA} 是光放大器的线宽增强因子; ν_0 是激光器中心频率; φ 表示光场相位, φ_{LD} 和 φ_{SOA} 分别是由激光器和光放大器的频率啁啾所导致的附加相位; $h(\tau)$ 是光放大器的积分增益, 它满足下面的微分方程^[2]

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{\ln G_0 - h}{\tau_c} - \frac{P_{LD}(\tau)}{E_{sat}} [\exp(h) - 1] \quad (6)$$

式中 G_0 、 τ_c 和 E_{sat} 分别是光放大器的小信号增益、载流子寿命以及饱和能量.

将经光放大器相位补偿后的光脉冲注入到光纤中(光功率的大小不足以使光纤产生强烈的非线性现象), 假设光纤是线性色散介质, 损耗为零, 只考虑群速度色散对光脉冲传输的影响, 于是传输光场 $u(z, \tau)$ 满足以下的线性微分方程^[4]

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta'' \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \quad (7)$$

式中 β'' 是光纤传播常数 β 关于角频率 ω 的二阶导数.

采用傅里叶方法求解微分方程(7), 可得

$$u(z, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u(z, \omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad (8)$$

其中

$$u(z, \omega) = u(0, \omega) \exp(i \frac{1}{2} \beta'' \omega^2 z) \quad (9)$$

$$u(0, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_{LSO}(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (10)$$

这样, 由(8)式就可描述相位补偿光脉冲在光纤中传输时的演变情况.

3 数值计算结果及其讨论

首先考虑激光器输出的光脉冲是高斯形的($m=1$), 其归一化功率可以表示为

$$P_{LD}(\tau) = \frac{E_{in}}{T_0} \frac{m}{\Gamma(1/2m)} \exp[-(\tau/T_0)^{2m}] \quad (11)$$

式中 E_{in} 和 T_0 分别是入射光脉冲的能量和宽度; $\Gamma(x)$ 是伽马(Gamma)函数; m 是正整数.

将直接调制的半导体激光器出射的光脉冲经光放大器相位补偿后, 初始光脉冲的啁啾得到了不同程度的补偿, 放大光脉冲在光纤中的传输特性得到了明显的改善, 如图 1 所示(参数选择分别为 $G_0=30\text{dB}$, $\alpha_{LD}=3$, $\alpha_{SOA}=5$, $T_0=\tau_c$, $E_{in}/E_{sat}=0.5$, $\beta''=-20\text{ps}^2/\text{km}$). 曲线 1 和 2 分别是光放大器的输入和输出光脉冲. 曲线 3 和 4 分别对应于 $z/L_D=0.5$ 和 1 两种情况, 其中虚线是无相位补偿光脉冲的演变情况. 其中 L_D 是色散长度, $L_D=T_0^2/|\beta''|$. 由图可见, 与没有经过相位补偿的情况相比, 光放大器的相位补偿作用明显延缓了光脉冲在光纤中传输时由于色散导致的展宽.

直接调制的激光器输出光脉冲的形状往往偏离高斯形, 它们具有较陡的前后沿, 理论上可以用超高斯形($m>1$)来加以描述^[3]. 我们在实验中发现, 经光放大器相位补偿后的光脉冲的光谱与初始时的相比虽然得到了明显的压窄, 但出现了多峰结构(见图 2). 实验中选用

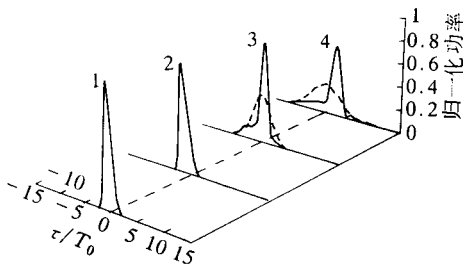


图 1 高斯近似下,相位补偿光脉冲在光纤中的演变

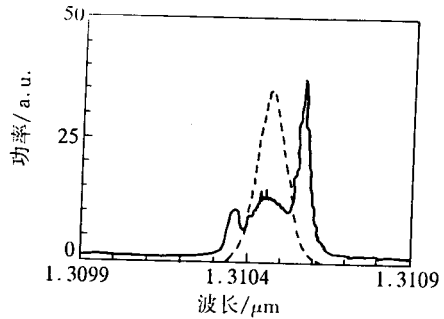


图 2 相位补偿光脉冲的主模光谱 (虚线是初始光脉冲的主模光谱) 光放大器的入射光功率大约为-10dBm.

的光源是武汉电信器件公司提供的 MQW LMW-13S 型多量子阱半导体激光器,其中心波长约为 1.31 μ m,在室温(约 25 $^{\circ}$ C)、无致冷情况下工作时的阈值电流约为 14.5 mA;行波半导体光放大器是 InGaAsP/InP 掩埋异质结型,端面残留反射率小于 10 $^{-4}$.激光器采用正弦调制,直流偏置电流为 18.0mA,微波注入功率为 13 dBm,调制频率 600 MHz,光放大器注入电流为 50.0 mA,其入射光功率大约为-10 dBm.

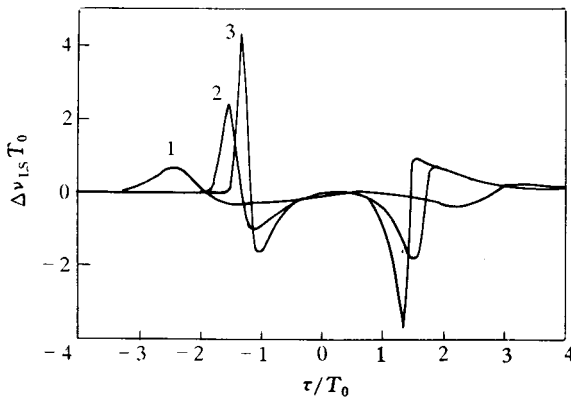


图 3 不同 m 值的相位补偿光脉冲的剩余啁啾量 曲线 1、2 和 3 分别对应于 m=1、2 和 3.

剩余频率啁啾量.图中显示,当光放大器工作在相同状态时,m 值越大,即入射光脉冲的前后沿越陡,啁啾的剩余量就越大,预示着光放大器输出光脉冲的相位波动就越剧烈.由(8)~(9)式可见,光脉冲在光纤中的传输特性与其初始相位有关,相位补偿光脉冲光谱的多峰结构正是由光放大器附加的过量非线性啁啾引起的相位波动导致的.相位的剧烈波动影响到相位补偿光脉冲在光纤中的演变,由图 4 可见,传输光脉冲出现了明显的多峰结构,这样不但起不到预期的目的,反而恶化了光脉冲的传输特性.不过,传输光脉冲的多峰结构可

相位补偿过程中光放大器所附加啁啾的特性与入射光脉冲的形状密切相关^[5],前后沿较陡的超高斯形入射光脉冲使光放大器的附加啁啾出现强烈的非线性,从而导致经相位补偿后的光脉冲保留有相当量的非线性啁啾.图 3 是不同 m 值的光脉冲经相位补偿后的

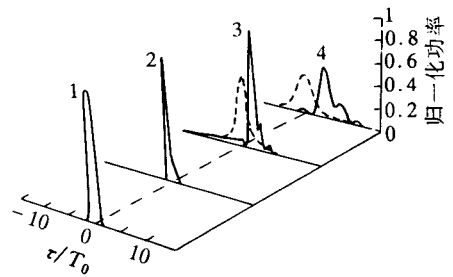


图 4 超高斯近似下,相位补偿光脉冲在光纤中的演变 m=2,其它参数同图 1.

以通过减小光放大器的饱和度来加以抑制,将图 4 中的饱和度 E_{in}/E_{sat} 从 0.5 减小到 0.05, 于是传输光脉冲就演变成了图 5 的形状, 其中的多峰结构得到了明显的抑制. 其原理是通过减小光放大器的饱和度, 达到减弱其增益饱和的幅度^[6], 抑制相位波动的目的. 在实验中, 我们将光放大器的入射光功率从 -10 dBm 减小到 -12 dBm, 同样观察到了相位补偿光脉冲光谱多峰结构受到明显抑制的现象(见图 6). 其实, 光放大器输出光脉冲光谱结构的畸变是由干涉现象引起的, 它是非线性介质中的自相位调制效应所共有的特性^[7]. 实际上, 在光脉冲轮廓上两个不同点的瞬时频率是相同的, 依赖与这两个点上光场的相位, 两个光场干涉加强或削弱, 从而导致了光脉冲光谱的多峰结构. 减小光放大器的饱和度, 削弱了其自相位调制效应, 也就抑制了光脉冲光谱的多峰结构.

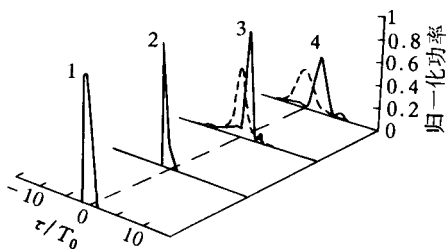


图 5 超高斯近似下, 相位补偿光脉冲在光纤中的演变
 $E_{in}/E_{sat}=0.05$, 其它参数同图 4.

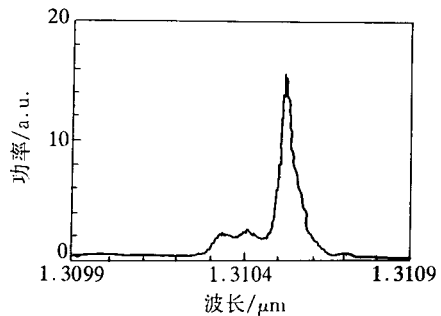


图 6 相位补偿光脉冲的主模光谱
光放大器的入射光功率大约为 -12 dBm, 其它参数同图 2.

综上所述, 光放大器饱和度的大小显著影响着相位补偿的效果. 选择光放大器的饱和度过小, 则不能充分补偿初始光脉冲的啁啾; 饱和度过大, 则会由于相位补偿过程引入的大量非线性啁啾而使光脉冲在光纤中传输时发生严重的畸变.

4 结论

本文解释了实验中观察到的相位补偿光脉冲光谱的多峰结构现象, 讨论了初始光脉冲形状和光放大器饱和度对相位补偿效果的影响. 理论和实验研究表明, 通过合适选择光放大器的饱和度, 使光放大器提供适当量的反向啁啾, 就能使经相位补偿后的光脉冲在光纤中的传输特性得到明显的改善.

致谢 感谢邮电部武汉邮电科学研究所的许远忠工程师给予的帮助.

参 考 文 献

- [1] A. Olsson, G. P. Agrawal and K. W. Wecht, *Electron. Lett.*, 1989, **25**(9): 603.
- [2] 金韬, 黄德修, 丘军林, *半导体学报*, 1995, **16**(9): 649.
- [3] P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-Wavelength Semiconductor Laser*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986, chap. 6.
- [4] P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Boston, MA: Academic, 1989, chap. 2.
- [5] 金韬, 黄德修, 丘军林, *激光技术*, 1995, **19**(2): 110.
- [6] 金韬, 黄德修, 丘军林, *半导体技术*, 1995, **2**: 19.
- [7] Y. R. Shen, *Principles of Nonlinear Optics*, New York: Wiley, 1984, 325.

Implementation of Phase Compensation Using Semiconductor Optical Amplifiers

Jin Tao

(Department of Informational and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Received 14 April 1996, revised manuscript received 15 June 1996

Abstract Phase compensation using traveling-wave semiconductor optical amplifiers (TW-SOAs) can minimize the chirped pulse broadening along fiber transmission as a result of optical dispersion. The effect of initial pulse shape and SOA saturation degree on phase compensation is discussed. The multippeak spectrum structure phenomena observed in our experiments are explained successfully.

PACC: 4255P, 4260F, 4260H