

色散对高能激光光纤前端 FM-AM 效应的影响*

黄小东¹⁾²⁾ 张小民¹⁾ 王建军^{1)†} 许党朋¹⁾ 张 锐¹⁾ 林宏焕¹⁾ 邓 颖¹⁾ 耿远超¹⁾ 余晓秋¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (山东大学光学工程系, 济南 251000)

(2008 年 4 月 28 日收到; 2009 年 7 月 6 日收到修改稿)

正弦相位调制脉冲可以满足高能激光驱动器对宽带和束匀滑的要求, 在光纤系统中传输后, 由于光纤中群速度色散的作用, 将会产生强度调制, 从而加剧光纤功率放大器中的非线性效应和光谱整形的难度. 通过对 2 GHz, 14.25 GHz 正弦相位调制脉冲经过不同光纤长度传输实验为例, 结合光纤系统中色散对 FM-AM 效应影响的理论分析, 发现 2GHz 相位调制脉冲的实验结果与模拟结果符合较好.

关键词: 相位调制, 光纤, 色散, 强度调制

PACC: 4281, 4281D

1. 引 言

目前, 随着高能激光驱动发展和波导技术的进步, 新的高功率激光驱动器前端系统大都采用了先进的全光纤光波导的全固化系统, 采用该系统具有传输灵活、系统稳定性好、体积小等特点. 为了达到抑制大口径光学元件(倍频晶体)中受激布里渊散射^[1,2]和实现驱动靶丸光斑匀滑(束匀滑技术)^[2]等要求, 这就要求新的全光纤前端系统能够提供能够灵活整形、一定带宽的种子光源. 国家点火装置(NIF)主要技术方案是采用单纵模光纤激光器(DFB Laser)为主光源, 任意波形发生器驱动下的波导幅度调制器产生整形脉冲, 再经过波导正弦相位调制器展宽频谱^[3].

一般情况下, 相位调制器仅仅影响单纵模脉冲的相位, 对其强度并没有影响. 但随着这种相位调制脉冲在光纤系统中传输, 在光纤中多种因素的影响下, 发现最后输出的脉冲出现了强烈的强度调制. 归结其原因主要包括光纤中的群速度色散效应(GVD)^[2], 偏振光纤中偏振态的耦合^[2,4], 以及边带失衡^[5]. 其中群速度色散对 FM-AM(相位调制-幅度调制)效应的影响, 虽有报道^[6-8], 但都没有做过系统阐述, 本文从实验和理论两个方面对群速度色散在 FM-AM 中的作用做了详细论述, 实验结果与模

拟结果符合较好.

2. 相位调制原理

相位调制主要是利用 LiNbO₃ 晶体的电光普克尔效应, 通过在晶体上施加正弦变化的射频信号, 对通过晶体的脉冲进行相位调制. 假设射频信号的圆频率为 Ω , 该调制器的调制深度为 γ , 单纵模高斯脉冲通过相位调制器后的光场为

$$E(t) = E_0 e^{j\omega t} e^{-j\gamma \cos \Omega t}, \quad (1)$$

可以看出, 正弦相位调制器主要在输入信号中引入了一个时间相关的相位项, 即引入了啁啾. 根据啁啾的定义, 横过脉冲的频率变化^[9], 正弦相位调制器引入的啁啾为

$$\delta\omega(t) = \frac{\partial\phi}{\partial t} = \gamma\Omega \sin \Omega t. \quad (2)$$

根据(2)式, 正弦相位调制器引入的啁啾应该为非线性啁啾, 对于中心波长为 1053 nm, 脉宽为 3 ns 单纵模信号, 经过调制频率为 2 GHz, 调制深度为 24 的相位调制器后, 其引入的啁啾如图 1 所示. 这样脉冲的频谱宽度也得到相应的展宽, 相位调制前后频谱如图 2 所示, 对于正弦相位调制器对脉冲频谱的展宽特性已有详细的报道^[5], 频谱的展宽量为 $\Delta\nu$, 则

$$\Delta\nu = \Omega\gamma/\pi. \quad (3)$$

* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

† E-mail: ssamxd@gmail.com

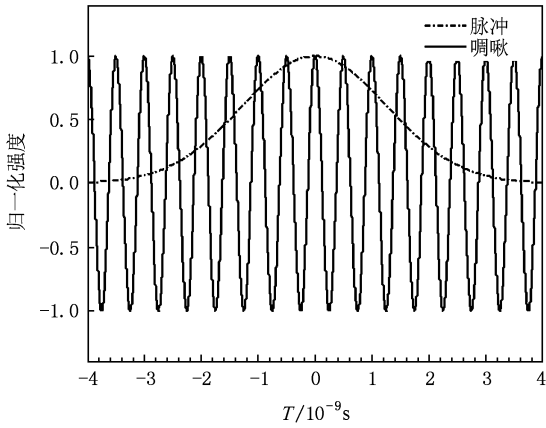


图1 相位调制器引入的啁啾

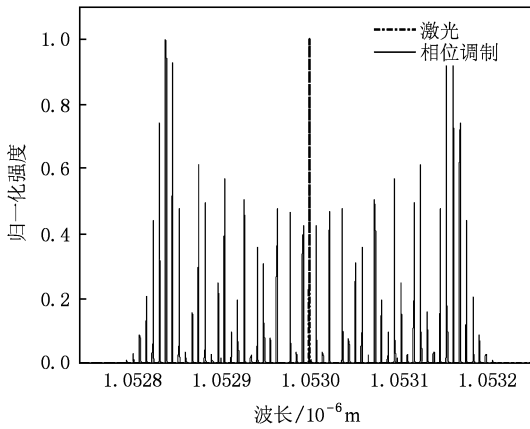


图2 相位调制器对频谱的展宽

3. 光纤中 GVD 对相位调制脉冲的影响

假设进入光纤的高斯型相位调制脉冲表达式为

$$E(t) = E_0 e^{-\frac{t^2}{2t_0^2} + j\omega t} e^{j\phi(t)}. \quad (4)$$

光脉冲在光纤中的传输满足 NLS (非线性薛定谔) 方程^[9], Bochove 等人^[6]和 Petermann^[7]对相位调制脉冲在光纤中的传输特性做了部分研究,但是他们主要基于相位调制噪声 ($\phi \ll 1$) 情况下,对输出波形强度调制影响进行讨论,对于一般正弦相位调制脉冲, $\phi \gg 1$ 时色散对 FM-AM 的影响并不合适. 为了便于理解光纤中 GVD 对相位调制脉冲的影响,假设注入脉冲的相位调制项为线性啁啾,即

$$\phi(t) = \frac{Ct^2}{2t_0^2}. \quad (5)$$

解析求得高斯型线性啁啾脉冲通过光纤传输后光

场变为

$$E(z, t) = \frac{E_0 t_0}{[t_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)]^{1/2}} \times \exp\left\{-\frac{(1 + i2C)t^2}{2[t_0^2 - i\beta_2 z(1 + iC)]}\right\}. \quad (6)$$

因此,传输后的脉冲波形为

$$P(z, t) = \frac{E_0 t_0^2}{\sqrt{(t_0^2 + \beta_2 z C)^2 + (\beta_2 z)^2}} \times \exp\left\{-\frac{t^2 t_0^2}{[(t_0^2 + \beta_2 z C)^2 + (\beta_2 z)^2]}\right\}, \quad (7)$$

其中, C 为由于相位调制引入的啁啾参量. 从(7)式可以看出,当啁啾参量 C 为常数时,传输后的脉冲波形仍然能保持高斯脉冲形状,只不过脉冲的宽度发生了变化. 但是当啁啾参量 C 是时间 t 的函数,即非线性啁啾脉冲(包括正弦相位调制)脉冲的时候,传输后脉冲的波形发生形变,如果 $\beta_2 z C$ 足够大,输出后的波形将会表现为同啁啾参量 C 一样的变化规律. 当输入脉冲为正弦相位调制脉冲时,其相位调制项变为

$$\phi(t) = \gamma \cos(\Omega t). \quad (8)$$

对比(5)式与(8)式,可以得到高斯型正弦相位调制啁啾脉冲的啁啾参量 C ,

$$C(t) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} t_0^2 = -\gamma \Omega^2 t_0^2 \cos \Omega t. \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式可以得到由于色散引起的强度调制为

$$\text{Peak-to-peak AM} \approx 2\beta_2 z \gamma \Omega^2, \quad (10)$$

如果脉冲半高全宽为 3 ns, 相位调制器调制频率 Ω 分别为 2 GHz, 14.25 GHz, 调制深度 γ 为 15, 经过 100 m, 色散常数 β_2 为 15 ps²/km 的光纤传输后的波形如图 3 和图 4 所示. 可以看出,调制深度相同的情况下,调制频率越大, FM-AM 的影响越大, 2 GHz 相位调制脉冲 100 m 传输后的输出波形调制深度不明显, 而 14.25 GHz 相位调制脉冲传输后调制深度为 30%, 而且波形上产生的调制周期为调制频率的倒数.

4. 实验方案及结果

实验装置如图 5 所示. DFB 为中心波长为 1053 nm 的单纵模光纤激光器, AM 为幅度调制器, AWG 为任意波形发生器, PM 为 2 GHz 相位调制器, SMF 为单模光纤.

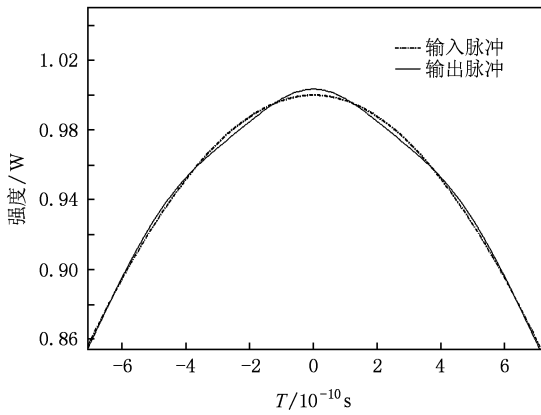


图3 2 GHz 相位调制脉冲传输后波形(局部放大图)

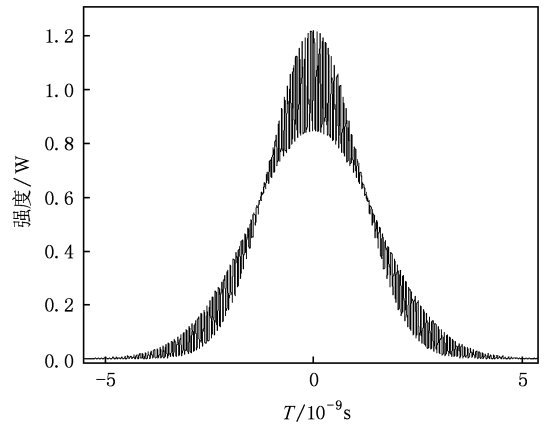


图4 14.25 GHz 相位调制脉冲传输后波形

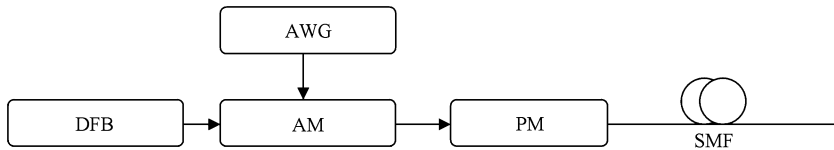


图5 相位调制脉冲传输实验装置图

单纵模光纤激光器输出的激光经过任意波形发生器控制的幅度调制器后变为重复频率 100 kHz,脉宽为 3 ns 的单纵模脉冲序列,然后通过相位调制器后,分别经过 50 m,115 m,1500 m 单模光纤的传输,其中,脉冲的峰值功率为 20 mW,光纤的色

散常数为 $15 \text{ ps}^2/\text{km}$,然后示波器采集到的时间波形如图 6 所示。

可以看出,当脉冲传输 50 m 的时候,脉冲波形并未出现明显的 AM 效应,当光纤长度为 115 m 时,色散对相位调制脉冲的影响已经显现,这时调制深

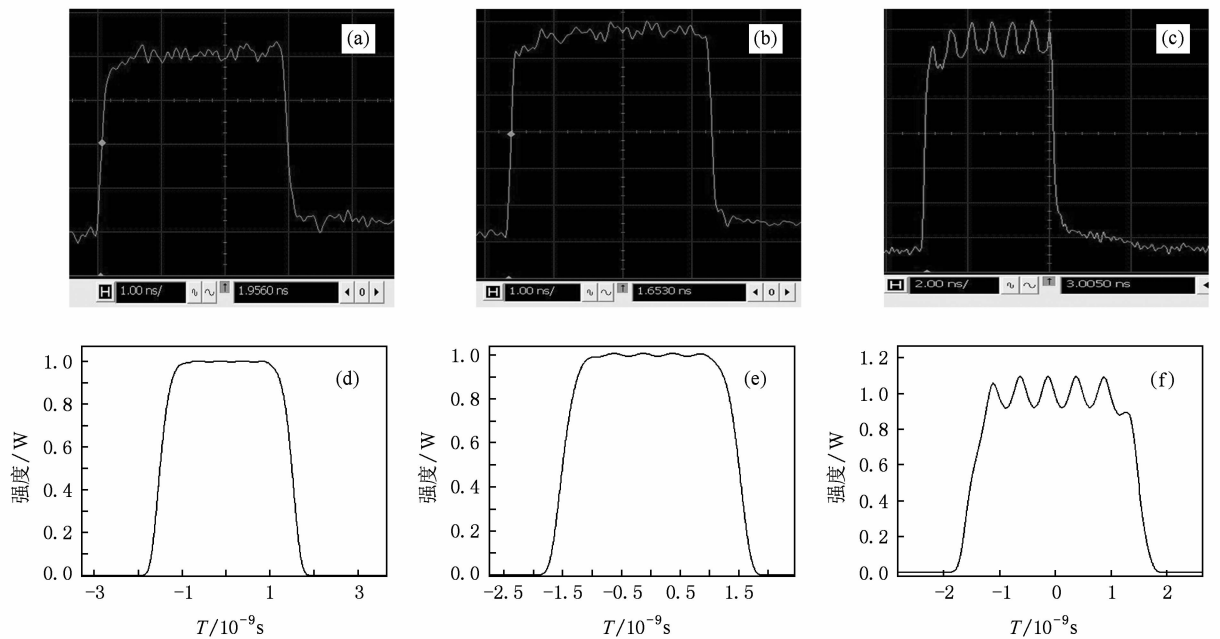


图6 2 GHz 相位调制脉冲经 50 m,115 m,1500 m 光纤传输后波形 (a),(b),(c)为实验测量结果;(d),(e),(f)为模拟结果

度约为 5%, 当光纤长度为 1500 m, 色散作用距离足够长, 调制深度达到了 30%, 实验结果与模拟结果符合较好. 根据前面的讨论可以知道, 当相位调制器工作频率为 14.25 GHz 时, 色散引起的幅度调制将会更加严重, 由美国利夫摩尔实验室给出的公式

$$\text{Peak-to-peak AM} = 2.3 \times 10^{-8} \cdot D \cdot z \cdot \Delta\nu_{\text{bw}} \cdot \nu_{\text{mod}}, \quad (11)$$

其中, $\Delta\nu_{\text{bw}}$ 为 FM 总带宽, ν_{mod} 为调制频率, D 为色散参量, z 为传输距离. 可以得出, 14.25 GHz 相位调制脉冲传输 100 m, 调制深度为 15 (带宽约为 1.5 nm), 其调制深度大约为 40%, 如图 7 所示 (调制深度约为 35%). 根据 (10) 式计算调制深度为 36%, 可以看出本文的推导 (10) 式与利夫摩尔实验室的 (11) 式的结果符合较好, 而由于实验中使用的示波器带宽为 8 GHz (小于相位调制频率), 所以并没有像 2 GHz 相位调制脉冲那样观察到强度调制, 仅仅观察到了脉冲的包络轮廓, 如图 8 所示. 对示波器的

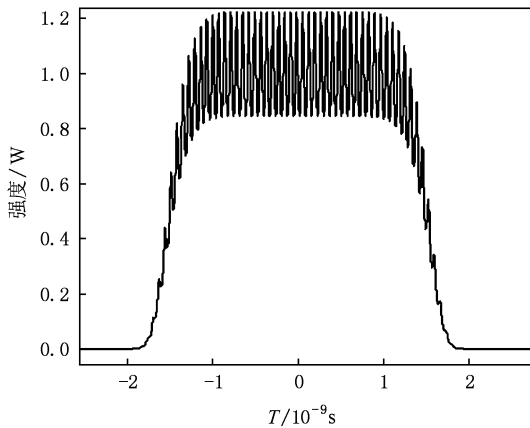


图 7 14.25 GHz 相位调制脉冲 100m 传输模拟结果

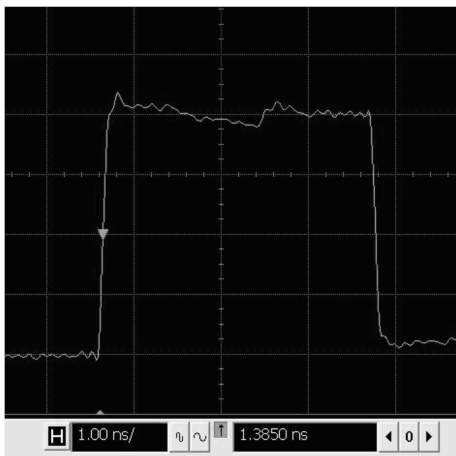


图 8 14.25 GHz 相位调制脉冲 100m 传输实验结果

频率响应进行模拟, 假设测量使用的示波器频率响应曲线为高斯型, 带宽为 8 GHz, 脉冲强度调制谱如图 9 所示, 这样经过示波器测量的结果, 如图 10 所示. 可以看出当考虑到示波器的响应时, 实验结果与模拟结果符合较好. 如果要测量到 14.25 GHz 相位调制脉冲传输后的强度调制, 在以后的实验中应该用带宽更高的示波器监视, 例如 20 GHz.

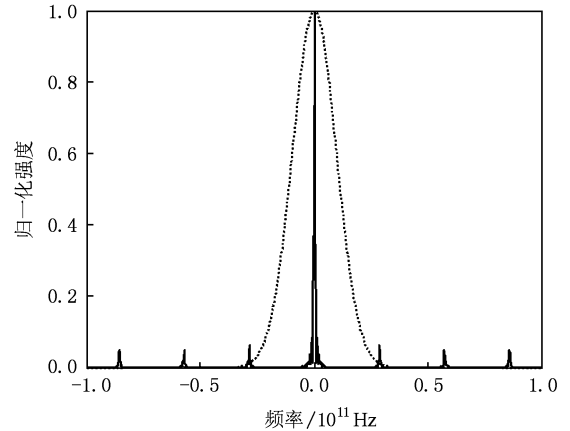


图 9 示波器响应函数 (虚线) 与脉冲强度调制谱 (实线)

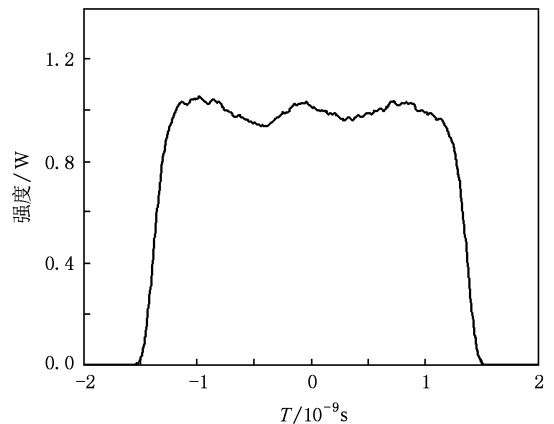


图 10 示波器测量的模拟结果

5. 结 论

由于兼顾高能激光系统中大口径光学元件中横向受激布里渊散射 (Transverse SBS) 的抑制和束匀滑的要求, 一般光纤前端采用调制频率为 14.25 GHz, 调制带宽约为 0.3 nm 的正弦相位调制脉冲作为种子源, 前端光纤系统光纤长度一般不会小于 100 m, 这样由于 GVD 引入的 FM-AM 效应, 根据 (11) 式脉冲传输后的强度调制大约为 10%. 而由于

光纤中的非线性效应(如 SPM)对脉冲的强度变化敏感,这样当脉冲通过最后的光纤功率放大器后,由于输出脉冲功率较高,一般为几千瓦,其中较强的 SPM 效应会加剧对脉冲光谱精密整形的难度.因此必须对进入功放前的脉冲进行色散补偿,一般的色散补偿手段包括三种:色散补偿光纤、光纤布拉格光栅、以及光栅对.其中色散补偿光纤的方法在

光纤通讯领域得到了广泛应用^[10],但针对目前所需波长的色散补偿光纤报道较少.光纤布拉格光栅以及光栅对对色散的补偿可以灵活控制而且技术成熟,这也是目前各高能激光装置光纤系统中主要的色散补偿手段.准确的对相位调制脉冲在光纤中色散作用的分析,对光纤前端系统中色散补偿手段具有重要的指导意义.

-
- [1] Guo S F, Fan WD, Lu Q S, Zhou P, Zeng X W, Deng Sh Y, Cheng X A 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3766 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、周萍、曾学文、邓少永、程湘爱 2004 物理学报 **53** 3766]
- [2] Rothenberg E J, Browning D F, Wilcox R B 2003 *Proc. SPIE* **3492** 51
- [3] Haynam C A, Wegner P J 2007 *Applied Optics* **46** 3276
- [4] Denis Penninckx, Nicolas Beck 2006 *Pho. Tech. Lett.* **18** 856
- [5] Li F, Wang J J, Ji F, Gu Ch 2006 *High Power Laser And Particle Beams* **18** 1818 (in Chinese) [李锋、王建军、纪帆、顾春 2006 强激光与粒子束 **18** 1818]
- [6] Bochove E J, de Carvalho E M, Jose Ellis Ripper Filho 1981 *Opt. Lett.* **6** 58
- [7] Petermann K 1990 *Electron. Lett.* **26** 2097
- [8] Mohammad Reza Salehi, Béatrice Cabon 2004 *J. lightwave Tech.* **22** 1510
- [9] Govind P. Agrawal *Nonlinear Fiber Optics*
- [10] Li S G, Fan WD, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1880 (in Chinese) [李曙光、刘晓东、侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1880]

The effect of dispersion on FM-AM conversion in high power laser front end*

Huang Xiao-Dong¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Min¹⁾ Wang Jian-Jun^{1)†} Xu Dang-Peng¹⁾
Zhang Rui¹⁾ Lin Hong-Huan¹⁾ Deng Ying¹⁾ Geng Yuan-Chao¹⁾ Yu Xiao-Qiu¹⁾
1) (*Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China*)
2) (*Department of Engineering Optics, Shandong University, Jinan 251000, China*)
(Received 28 April 2009; revised manuscript received 6 July 2009)

Abstract

Sinusoidal phase modulated pulse could provide broad bandwidth and high modulation frequency for spectral dispersion method in high power laser driver system. Phase modulation could be converted to intensity modulation due to dispersion during the pulse propagation in the fiber, and the intensity modulation enhances the nonlinear effect in the large-mode-area double-clad fiber amplifier and make the spectral controlling more difficult. 2 GHz and 14.25 GHz phase modulation pulses propagated in fibers with different lengths were measured, and based on the dispersion model in the fiber, theoretical analysis shows good similarity between simulation and experimental results for the 2 GHz phase modulation pulse.

Keywords: phase modulation, fiber, dispersion, intensity modulation

PACC: 4281, 4281D

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

† E-mail: ssamxd@gmail.com