

文章编号: 0253-2239(2009)11-2973-04

大啁啾光纤布拉格光栅的脉冲响应特性研究

车雅良 雒开彬 杜廷龙

(西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘要 脉冲堆积技术是高功率激光系统中产生任意种子脉冲的方案之一。该方案利用大啁啾光纤布拉格光栅的宽带特性来展宽宽带短脉冲,以满足脉冲堆积组件的需求。利用传输矩阵法模拟了大啁啾宽带光纤布拉格光栅的反射谱、时延曲线等特性。研究发现,光纤光栅的啁啾因子决定了色散量以及带宽的大小,但增加色散量的代价是降低了光纤光栅的带宽;光栅长度越长,反射带宽明显增加,但色散量变化不大。研究结果对高功率前端系统的设计具有一定的指导意义。

关键词 大啁啾光纤布拉格光栅; 传输矩阵法; 啁啾因子; 反射谱; 色散

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.2973

Studies on the Pulse response Characters of Large Chirped Fiber Bragg Grating

Che Yaliang Luo Kaibin Du Tinglong

(Xi'an Communication Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China)

Abstract The pulse-stacking technology is one of the schemes of generating arbitrary seed pulse in the high power laser system which is used to spread the broadband short pulse to satisfy the need of the pulse-stacking components due to the wideband character of the large chirped fiber Bragg grating (LCBG). The reflect spectrum and the time delay of LCBG were simulated through the transmission matrix method. As a result, the dispersion and bandwidth depend on the chirp factor of LCBG, but the cost to increase the dispersion is the reduced bandwidth. The results also show that the bandwidth would be increased remarkably with longer LCBG, but at the same time the dispersion was invariable. These results are significant for designing the front-end of the high power laser system.

Key words large chirped fiber Bragg grating; transmission matrix method; chirped factor; reflect spectrum; dispersion

1 引言

惯性约束聚变(ICF)前端系统作为高功率激光聚变驱动器的“种子脉冲”^[1,2],其主要功能是为后续系统提供一个或数个波长为 1053 nm,具有适当脉冲宽度或脉冲形状,并具有一定能量、光谱带宽、高信噪比和高光束质量的激光脉冲。因此,精确时间脉冲整形是 ICF 前端系统中非常重要的一部分。

2 啁啾光纤布拉格光栅

图 1 所示是一种全光纤的脉冲整形激光器系统^[3],该整形系统采用掺镱锁模光纤激光器产生中心波长为 1053 nm,带宽为 10 nm,脉宽为 20 ps 的锁模脉冲序列,经波导选单器获得 1~10 Hz 重复频率的脉冲,经脉冲展宽器得到 ns 级线性啁啾脉冲,然后通

过窄带滤波得到百皮秒,带宽为 1.2 nm 的子脉冲,经脉冲堆积器得到脉冲 2~3 ns,带宽 1.2 nm 的任意整形脉冲。系统中利用大啁啾光纤布拉格光栅(LCBG)的色散及宽带特性来展宽锁模脉冲。

啁啾光纤光栅是指光纤的纤芯折射率变化幅度或者折射率变化的周期沿光纤轴向逐渐变化的一种光纤光栅^[4]。其谐振波长沿轴向渐变,在轴向不同位置可以反射不同波长的入射光。将光敏光纤放置在不同样式的模板下用紫外光曝光,在光纤中形成所需的折射率扰动产生啁啾光纤光栅。由曝光形成的有效折射率 n_{eff} 变化可以用下式表示^[5]

$$\delta n_{\text{eff}} = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + s \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

(1) 式中, s 为折射率调制的条纹可见度, Λ 为光栅周期, $\varphi(z)$ 描述光栅啁啾, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 表示直流有效折射率变

收稿日期: 2008-09-05; 收到修改稿日期: 2008-10-29

作者简介: 车雅良(1979—),女,硕士,讲师,主要从事高功率超短脉冲技术方面的研究。E-mail: danche_breathe@163.com

化(即一个光栅周期内平均有效折射率变化)。

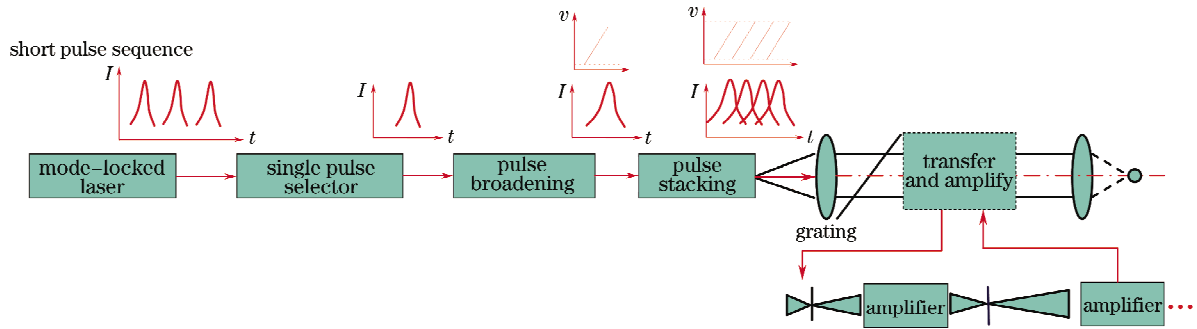


图 1 全光纤脉冲整形系统

Fig. 1 System of all-fiber pulse shaping

啁啾光纤光栅展宽脉冲原理如下:初始脉冲输入光栅,若光栅周期大的一端在前,则脉冲“红”移频率分量在光栅前端反射,而脉冲的“蓝移”频率分量在后端反射,在“红”移和“蓝”移分量间产生时延,从而使得反射输出脉冲被展宽。

2.1 光纤光栅的光谱响应函数

耦合模理论常用来定量分析布拉格光栅的光谱特性。光纤布拉格光栅是一种反射型光栅,光栅中的模式属于反向模式的耦合,前向波和后向波表示为^[6]

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\delta R(z) + ikS(z), \\ \frac{dS}{dz} = -i\delta S(z) - ik^* R(z), \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} R(z) &= A(z)\exp(i\delta z - \phi/2), \\ S(z) &= B(z)\exp(-i\delta z + \phi/2), \end{aligned}$$

$A(z), B(z)$ 分别为光纤光栅中前向和后向传播模的复振幅; δ 为直流自耦合系数,定义为

$$\delta = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz},$$

k 为交流耦合系数,对于单模反射光栅,

$$k = k^* = \pi s \overline{\delta n_{\text{eff}}}/\lambda.$$

δ 为光栅失谐参量,

$$\delta(\omega) = \beta(\omega) - \beta_B = \beta(\omega) - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right),$$

光纤布拉格光栅波长 λ_B 为光纤布拉格光栅反射回来的入射光在自由空间中的中心波长, $\lambda_B(z) = 2 n_{\text{eff}} \Lambda(z)$; $\sigma = 2\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}/\lambda$, $d\phi/dz$ 是光栅周期啁啾引

起的耦合项,定义为 $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} = -\frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz}$, $\frac{d\lambda_B}{dz}$ 是随光栅位置而变化的设计波长的变化率,单位为 nm/cm;啁啾也常用另一无量纲常数 F 标定,

$$F = -4\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{W_{1/2}}{\lambda_B} \right)^2 \frac{d\lambda_B}{dz},$$

$W_{1/2}$ 为光栅折射率剖面的半峰全宽。在本文中,啁啾因子定义为单位距离中光栅布拉格波长的改变量。

对于啁啾光纤光栅,(2)式无解析解,采用传输矩阵理论^[7]进行数值求解,把整个光栅看成是由 M 段均匀的小光栅级联而成,如图 2 所示。

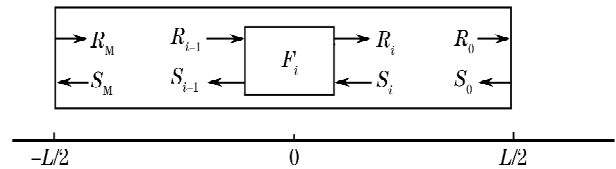


图 2 传输矩阵法求解非均匀光栅示意图

Fig. 2 Transfer matrix method to solve non-uniform fiber grating

假定经过第 i 段光栅前后的前向波和后向波的光场振幅分别为 R_{i-1}, S_{i-1} 和 R_i, S_i , 传输矩阵为 F_i , 则

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

那么经过整个光栅后的光场为

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F_M F_{M-1} \cdots F_i \cdots F_1 \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中
$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) & \cosh(\gamma \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh(\gamma \Delta z) \end{bmatrix}, \quad \gamma = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}, \quad (5)$$

边界条件为: $R_0 = R(L/2) = 1, S_0 = S(L/2) = 0$, 需计算 $R_M = R(-L/2), S_M = S(-L/2)$ 。

通过传输矩阵法可得到啁啾光栅的反射系数、反射谱、时延、色散等。

1) 反射系数(光谱响应函数):

$$\rho = \frac{S(-L/2)}{R(-L/2)} = |\rho| \exp(i\theta). \quad (6)$$

2) 光纤光栅的反射谱

$$r = |\rho|^2. \quad (7)$$

3) 光纤光栅的反射时延

反射光的群时延与群色散由(7)式中的幅度反射系数 ρ 决定, 其相位为 θ , 对频率 ω 展开为泰勒函数, 其一阶微商 $d\theta/d\omega$ 即可被看作时间延迟, 因此布

拉格光纤光栅的反射时延为

$$\tau = \frac{d\theta}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\theta}{d\lambda}. \quad (8)$$

4) 光纤光栅色散用 D 表示, 单位为 ps/nm, 可表示为单位波长下的时延改变, 即

$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\theta}{d\lambda^2} = \frac{2\tau}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\theta}{d\lambda^2}. \quad (9)$$

2.2 数值模拟

对啁啾光纤光栅的特性进行数值模拟时, 采用的参数为光栅长度 $L = 30$ mm; 中心波长 $\lambda_B = 1053$ nm; 折射率调制深度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.0001$; 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$ 。啁啾因子、光栅长度对光纤光栅的时延曲线和反射谱的影响如图 3, 图 4 所示。

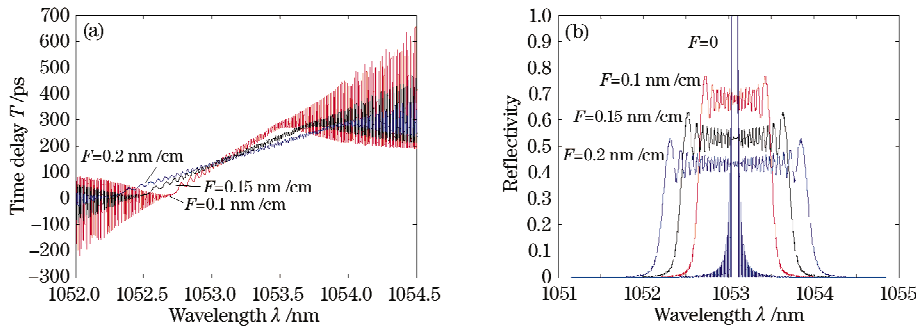


图 3 不同啁啾因子的光纤光栅的时延曲线(a)和反射谱(b)

Fig. 3 Time delay and reflection spectra for Bragg grating with different chirp factors

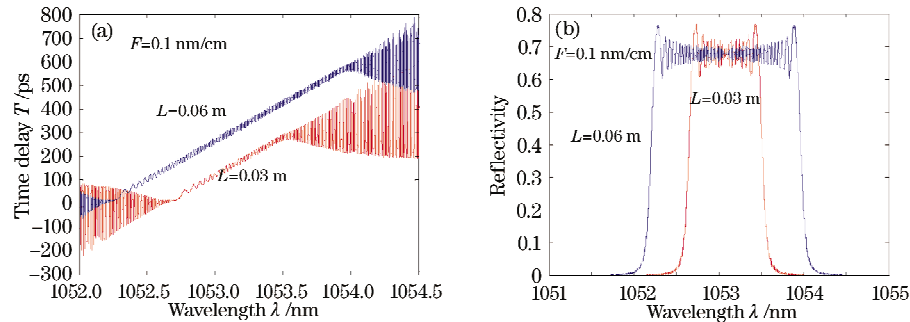


图 4 不同长度的光纤光栅的时延曲线(a)和反射谱(b)

Fig. 4 Time delay and reflection spectra for Bragg grating with different lengths

如图 3 所示, 随着啁啾量增大, 光纤光栅的反射谱带宽增加, 峰值反射率降低, 时延曲线呈现越来越好的线性度, 但斜率减小, 其色散量也随之减小。光纤光栅的啁啾因子决定了色散量以及带宽的大小, 但二者不可兼得, 增加色散量的代价是降低了光纤光栅的带宽, 因此在实际应用时要根据实际情况选取啁啾因子。

改变光纤光栅长度, 其反射谱与时延特性也随之变化。如图 4 所示, 可以看出, 长度越长, 反射带宽明显增加, 反射率变化不大, 但时延曲线斜率几乎

不变, 因此色散量变化也不大。因此, 若想通过改变光纤光栅长度来改变脉冲的展宽量, 效果不显著。

2.3 啁啾光纤光栅对入射脉冲的展宽

根据前端系统实际需要数值模拟脉冲展宽情况。当入射脉宽 20 ps, 带宽 10 nm 的宽带啁啾高斯脉冲时, 由于脉冲带宽很宽, 因此要将其展宽至 1 ns, 不需要光栅提供较大的色散量, 但必须保证有足够宽的带宽。由前面的分析可知, 只有选用啁啾因子较大的光纤光栅才能获得较宽的带宽。

设计啁啾光纤光栅参量如下: 光纤光栅的反射

谱边界色散行为差,一般需要光纤光栅的带宽为入射脉冲带宽的2倍,因此,需要带宽为30 nm的啾啾光纤光栅。对于折射率调制深度为 $\delta n_{\text{eff}} = 0.0001$;

有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 1.45$,啾啾因子 $F = 0.3 \text{ nm/cm}$ 的啾啾光纤光栅,取长度30 cm,数值模拟发现其带宽大约为30 nm,脉冲展宽情况如图5所示。

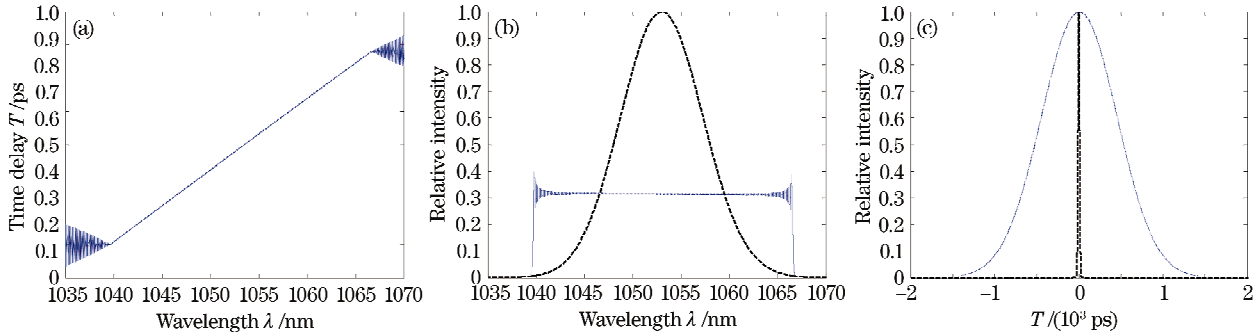


图5 啾啾光纤光栅的时延曲线(a),反射谱(b)以及对10 nm,20 ps脉冲的展宽(c)

Fig. 5 Time delay (a), reflection spectra (b) for chirped fiber Bragg grating and the pulse-spreading (c)

此啾啾光纤光栅的色散量大约为100 ps/nm,展宽后脉冲宽度大约为1 ns[图5(c)]。数值模拟中,若展宽后脉冲出现强度调制,经过分析发现,这是由于传输矩阵法本身造成的,因为啾啾光纤光栅的周期或者布拉格波长是随光栅位置 z 连续变化的,而传输矩阵法是将光栅看作若干段均匀子光栅的串联,每段之间的布拉格波长会出现跳变,当计算精度不够,即分段数太少时,均匀子光栅的反射谱宽小于相邻两段布拉格波长之差,造成总反射谱分裂。因此在实际模拟计算时,当光栅长度增加时,分段数也要相应增加,这样才会更加精确的反映啾啾光纤光栅的特性。但这种分段数是不能无限制扩大的,必须保证^[8]

$$M \ll 2n_{\text{eff}}L/\lambda_B. \quad (10)$$

3 结 论

用传输矩阵法模拟了大啾啾宽带光纤布拉格光栅的反射谱、时延曲线等特性。研究发现,光纤光栅的啾啾因子决定了色散量以及带宽的大小,但二者不可兼得,增加色散量的代价是降低了光纤光栅的带宽,因此应用时要根据实际情况选取啾啾因子。改变光纤光栅长度,其反射谱与时延特性也随之变化,长度越长,反射带宽明显增加,反射率变化不大,

但时延曲线斜率几乎不变,因此色散量变化也不大。因此,若想通过改变光纤光栅长度来改变脉冲的展宽量,效果不显著。

参 考 文 献

- 1 Wang Tao, Fang Dianyan. Pulse shaping design of high power laser amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(2): 139~142
- 王 韬, 范滇元. 高功率激光放大器脉冲的整形设计[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(2): 139~142
- 2 A. Okishev, M. D. Skeldon, S. A. Letzring *et al.*. The pulse-shaping system for the 60-beam, 30-kJ OMEGA laser [C]. *SPIE*, 1996, 2770: 10~18
- 3 Zhang Rui, Zhang Xiaoming, Su Jingqin *et al.*. Temporal beam smoothing technique using chirped pulse stacking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1512~1516
- 张 锐, 张小民, 粟敬钦 等. 采用啾啾脉冲堆积的时间束平滑技术[J]. *光学学报*, 2006, 26(10): 1512~1516
- 4 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 1987, 12(10): 847~849
- 5 V. Mizrahi, J. E. Sipe. Optical properties of photosensitive fiber phase gratings [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1993, 10(11): 1513~1517
- 6 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, 9(9): 919~933
- 7 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(8): 1277~1294
- 8 P. A. Govind. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. USA: Elsevier Science, 2005. 39~57