

啾啾体布拉格光栅的脉冲响应特性

戴慧芳^{1,2,3}, 陈鹏^{1,2,3}, 赵靖寅^{1,2,3}, 孙勇^{1,2,3}, 徐姣^{1,2,3}, 孔钊宇^{1,3}, 晋云霞^{1,3*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 基于矩阵法, 构建超短脉冲经啾啾体布拉格光栅(CVBG)衍射的频域和时域响应分析模型。针对百飞秒(fs)级光纤啾啾脉冲放大(FCPA)系统对于 CVBG 的带宽要求, 系统研究衍射带宽对 CVBG 的脉冲展宽及压缩效应的影响及宽带 CVBG 对于不同啾啾参数输入脉冲的脉冲响应特性。研究表明: CVBG 的衍射带宽随其啾啾率和厚度增大而线性增大; 当 CVBG 的衍射带宽小于入射脉冲的频谱宽度时, 频谱成分的剪切会导致展宽脉冲的变形并使压缩脉冲相对于入射脉冲而展宽; 为实现 100 fs 脉冲的展宽-压缩对易性, 须保证 CVBG 衍射带宽不小于 60 nm。设计中单块厚度为 40 mm 的宽带 CVBG 先展宽再压缩, 得到频谱宽度为 16.64 nm 的线性啾啾脉冲, 输出脉冲均无限接近傅里叶变换受限(FTL)脉冲且衍射效率高达 84%, 这为百 fs 级 CVBG 脉冲压缩器的实现提供了理论参考及指导。

关键词 光栅; 脉冲压缩; 飞秒光纤激光器; 矩阵法

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1005002

Impulse Response Characteristics of Chirped Volume Bragg Gratings

Dai Huifang^{1,2,3}, Chen Peng^{1,2,3}, Zhao Jingyin^{1,2,3}, Sun Yong^{1,2,3}, Xu Jiao^{1,2,3},
Kong Fanyu^{1,3}, Jin Yunxia^{1,3*}

¹Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract In this work, the frequency domain and time domain response analysis model of ultrashort pulses via chirped volume Bragg grating (CVBG) is constructed based on the matrix method. Aiming at the bandwidth requirement of CVBG for the hundred-femtosecond (fs) fiber chirped pulse amplification (FCPA) system, we systematically study the influence of the diffraction bandwidth on the pulse stretching and compression effect of CVBG and the impulse response characteristics of the broadband CVBG to incident pulse with different chirp parameters. The results show that the diffraction bandwidth of CVBG increases linearly with the increasing chirp rate and thickness. When the diffraction bandwidth of CVBG is smaller than that of the incident pulse, the shearing of the spectral components will cause distortion of the stretched pulse and broadening of the compressed pulse with respect to the incident pulse. To achieve stretching-compression reciprocity of the one-hundred-femtosecond pulse, it is necessary to ensure the diffraction bandwidth of CVBG no less than 60 nm. As designed, a broadband CVBG with 40 mm thickness is stretched first and then compressed, and linear chirp pulses with a spectral width of 16.64 nm are obtained. All of the output pulses are infinitely close to the Fourier transform constrained (FTL) pulse and the diffraction efficiency is as high as 84%, which provides a theoretical reference for the implementation of the fs CVBG pulse compressor.

Key words gratings; pulse compression; femtosecond fiber lasers; matrix approach

OCIS codes 050.2770; 050.1950; 320.5520; 140.7090

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(11604352, 61875212)、上海市科学技术委员会(16JC1420600)

* E-mail: yxjin@siom.ac.cn

1 引 言

高功率飞秒(fs)脉冲光纤激光器以其脉宽短、峰值功率高的特点,并结合光纤结构损耗低、结构紧凑、稳定性好的优势,被广泛应用于激光冷加工^[1]。光纤啁啾脉冲放大(FCPA)是当前研制高功率超短脉冲光纤激光系统的主流和关键技术^[2-5],其最终输出主要取决于最后一级的脉冲压缩器件。现常用于啁啾脉冲放大(CPA)系统中压缩脉冲的器件,衍射光栅对^[6-8]和色散镜组^[7-10]虽然可以提供足够大的带宽、效率和抗损伤阈值,但它们占用空间大且对光路极为敏感,因而并不适用于对系统尺寸和环境稳定性有着高要求的工业级高功率飞秒光纤激光器。相比之下,啁啾体布拉格光栅(CVBG)^[11]尺寸小巧、环境稳定性好,且可以单片集成在光路里,能同时实现脉冲的展宽与压缩,因此被广泛地作为脉冲压缩器应用到 FCPA 系统中^[12-15]。

CVBG 实现脉冲展宽或压缩的本质是色散作用,其色散调制来源于其光栅周期随空间位置变化而变化(啁啾)的特性。然而受衍射带宽的限制, CVBG 的压缩脉宽一直以来难以突破百 fs,目前文献报道的 CVBG 所能实现的最小输出脉宽为 208 fs^[15]。为实现百 fs 级甚至更窄脉宽输出的 CVBG 脉冲压缩器,有必要从理论上研究和分析衍射带宽等参数对 CVBG 脉冲响应特性的影响,为宽带 CVBG 的设计及制备提供指导。目前已有不少关于 CVBG 的理论研究,美国中佛罗里达大学 Kaim 等^[16](CVBG 主要研究团队)于 2014 年发表综述,系统阐述利用耦合波理论和光谱分解思想求解 CVBG 脉冲展宽及压缩特性的分析方法和数学模型;国内苏州大学 Feng 等^[17]于 2015 年用 F 矩阵法分析 CVBG 的衍射特性,但这些都侧重于对 CVBG 光学特性的计算和推导,而结合输入脉冲的 CVBG 衍射特性及脉冲响应特性的系统性研究则较少。本文基于 F 矩阵法^[18]和光谱傅里叶变换理论,进一步简化 CVBG 的脉冲展宽及压缩分析模型,同时考虑 CVBG 结构特性和输入脉冲参数的影响,系统地研究和分析 CVBG 的脉冲响应特性。

2 基本原理

2.1 啁啾体布拉格光栅衍射特性分析

本文仅研究线性纵向啁啾的反射式体布拉格光栅,其光栅周期沿着光入射方向线性变化,不同波长的入射光分别在满足布拉格条件的不同位置处反射

形成色散,如图 1 所示。光栅周期可表示为

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \left(z - \frac{d}{2}\right)C, 0 \leq z \leq d, \quad (1)$$

式中: d 为 CVBG 沿入射光方向的总厚度; z 为沿入射光方向的位置深度; Λ_0 为 CVBG 中心处的光栅周期; C 为光栅周期的变化速率(啁啾率)。当啁啾率为零时 CVBG 退化为均匀的体布拉格光栅(VBG)。F 矩阵法^[17]就是基于这种思想,忽略光栅周期的局域变化,将复杂结构的 CVBG 分解为一系列不同光栅周期的基元 VBG。根据耦合波理论^[19]计算每个基元 VBG 的输入输出特性并用一个矩阵来表征(F 矩阵),最后累乘所有基元 VBG 的 F 矩阵即可得到 CVBG 的传输矩阵,并通过该矩阵求得衍射特性。

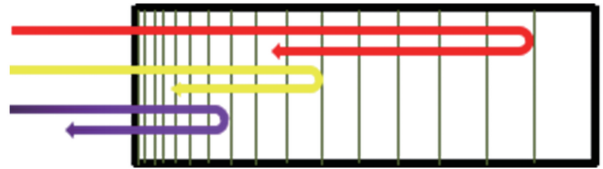


图 1 啁啾体布拉格光栅示意图

Fig. 1 Schematic of chirped volume Bragg grating

假设把 CVBG 划分为 N 个厚度均为 L 的 VBG,则第 m ($m=1, 2, \dots, N$) 个基元 VBG 的特征参数可表示为

$$\Lambda_m = \Lambda_0 + Cd \left(m - \frac{N}{2}\right) / N. \quad (2)$$

$$n_m(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_m} \cdot z\right), \quad (3)$$

$$L_m = d/N = L, \quad (4)$$

式中: Λ_m 、 n_m 和 L_m 分别是第 m 个 VBG 的光栅周期、有效折射率分布和光栅厚度; n_0 和 Δn 分别是光栅的平均折射率和折射率调制幅度。忽略材料的吸收效应,这些基元 VBG 的传输特性可表示为^[18]

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} E_i(0) \\ E_r(0) \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} E_i(L) \\ E_r(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_i(L) \\ E_r(L) \end{bmatrix} \\ f_{11} = [\cosh(\gamma L) + i\Delta\beta L \sinh(\gamma L) / (\gamma L)] \cdot \exp(-i\beta_B L) \\ f_{12} = -\kappa L \sinh(\gamma L) \exp[i(\beta_B L + \phi)] / (\gamma L) \\ f_{21} = -\kappa L \sinh(\gamma L) \exp[i(\beta_B L + \phi)] / (\gamma L) \\ f_{22} = [\cosh(\gamma L) - i\Delta\beta L \sinh(\gamma L) / (\gamma L)] \cdot \exp(-i\beta_B L) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $E_i(0)$ 、 $E_r(0)$ 、 $E_i(L)$ 、 $E_r(L)$ 分别为基元 VBG 前后端面处照明光波和衍射光波的电场幅度;

f_{11} 、 f_{12} 、 f_{21} 和 f_{22} 为 \mathbf{F} 矩阵的四个矩阵元； $\kappa = \pi\Delta n/\lambda$ 为两束耦合波的耦合系数，其中 λ 是入射波长； $\beta_B = 2\pi n_0/(2n_0\Lambda) = \pi/\Lambda$ 为基元 VBG 的布拉格频率； $\Delta\beta = \beta - \beta_B = 2\pi n_0/\lambda - \pi/\Lambda$ 为入射光频率 β 和 VBG 布拉格频率的差值，即布拉格失配参量； $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}$ 为一中间参量； ϕ 为光栅相位。根据边界条件，相邻的第 $(m-1)$ 和第 m 个 VBG 之间的相位、布拉格频率及厚度应满足

$$\phi_m = \phi_{m-1} + 2(\beta_B)_{m-1}L_{m-1}。 \quad (6)$$

则由 N 个基元 VBG 组成的 CVBG 的传输矩阵为

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_1\mathbf{F}_2\cdots\mathbf{F}_N = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}。 \quad (7)$$

结合电场边界条件：光栅入射端面的入射电场幅度和透射端面的反射电场幅度分别为 $E_i(0) = 1$ ， $E_r(d) = 0$ ，可以求得 CVBG 的反射系数为

$$r_G = \frac{E_r(0)}{E_i(0)} = \frac{F_{21}}{F_{11}}， \quad (8)$$

根据反射系数求解反射效率 $R = (F_{21}/F_{11})^2$ ，相位角 $\phi = \arg(F_{21}/F_{11})$ 和群延时 $\tau = \frac{d\phi}{d\omega} = \frac{-\lambda^2}{2\pi c} \cdot \frac{d\phi}{d\lambda}$ ，其中， ω 为入射光的角频率， c 为真空中光速。

2.2 啁啾体布拉格光栅脉冲响应特性分析

根据频谱变换思想，对于任意的输入脉冲时域信号 $\epsilon_{in}(t)$ ，可直接将其傅里叶变换到频域 $E_{in}(\omega) = \mathcal{F}[\epsilon_{in}(t)]$ ，那么经 CVBG 反射后输出脉冲的频域表达式为

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) \cdot r_G(\omega)， \quad (9)$$

再对其做傅里叶逆变换即可得到输出脉冲时域信号 $\epsilon_{out}(t) = \mathcal{F}^{-1}[E_{out}(\omega)]$ 。

仿真分析以高斯型的线性啁啾脉冲为例，其时域和频域表达式为^[20]

$$\begin{cases} \epsilon(t) = A \exp(-\Gamma t^2) \exp[i(\omega_0 t + W t^2)] \\ \Delta\tau = \sqrt{2 \ln 2 / \Gamma} \\ E(\omega) = A \sqrt{\frac{\pi}{\Gamma - iW}} \exp\left[\frac{-(\Gamma + iW)(\omega - \omega_0)^2}{4(\Gamma^2 + W^2)}\right]， \\ \Delta\nu = \frac{\sqrt{2 \ln 2 (\Gamma + W^2 / \Gamma)}}{\pi} \end{cases} \quad (10)$$

式中： A 和 ω_0 分别为脉冲的振幅和中心频率； t 为传输时间； $\Delta\tau$ 为单个脉冲的持续时间，用参数 Γ 表征； $\Delta\nu$ 为脉冲的频谱宽度，由瞬时频率随时间的变化速度（即啁啾系数） W 和脉宽的表征系数 Γ 共同决定。高斯型脉冲的脉宽和带宽满足

$$K = \Delta\tau \cdot \Delta\nu = \frac{2 \ln 2}{\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{W}{\Gamma}\right)^2} \geq 0.441。 \quad (11)$$

当啁啾系数 W 为零时，脉冲的脉宽与带宽乘积有最小值 $K = 0.441$ ，称为傅里叶变换受限 (FTL) 脉冲。输入输出脉冲带宽不变的情况下，输出脉冲的脉宽 $\Delta\tau_{out} = K_{out}/\Delta\nu_{in}$ 随啁啾系数降低而减小。脉冲压缩即是通过引入色散元件并不断降低脉冲的啁啾来实现的，当输出 FTL 脉冲时最大压缩倍率为

$$\eta_{max} = \sqrt{1 + \left(\frac{W}{\Gamma}\right)^2}。$$

3 模拟与分析

3.1 啁啾体布拉格光栅的衍射特性

结合布拉格条件 $\lambda = 2n_0\Lambda$ 可求得 CVBG 的衍射带宽为 $B_\lambda = 2Cdn_0$ ，这表明在光栅记录材料确定的情况下（即 n_0 不变），可以通过增大啁啾率或光栅厚度来增大其衍射带宽。图 2 是 CVBG 的衍射光谱曲线随光栅厚度和啁啾率的变化关系，CVBG 特征参数为 $\Lambda_0 = 354.67 \text{ nm}$ ， $n_0 = 1.5$ ， $\Delta n = 0.001$ ，图 2(a) 中 $C = 4 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，图 2(b) 中 $d = 30 \text{ mm}$ 。图 2(a) 表明 CVBG 的衍射带宽随光栅厚度增加而线性增大且当光栅厚度大于 10 mm 时衍射效率基本不受光栅厚度影响（不考虑材料的吸收效应）。图 2(b) 表明随啁啾率增大，CVBG 的衍射光谱变宽，但是衍射效率明显下降（见插图）。综合考虑，在制备工艺允许范围内直接通过增大光栅厚度来增大衍射带宽是实现宽带高效率 CVBG 的最佳途径。

3.2 啁啾体布拉格光栅的脉冲展宽及压缩响应特性

为研究 CVBG 的衍射带宽对其脉冲响应特性的影响，采用不同厚度的 CVBG 同时作为展宽器和压缩器，对 100 fs 脉宽的高斯型 FTL 脉冲的展宽和压缩效应进行仿真。输入脉冲的中心波长为 1064 nm ，根据 (11) 式计算其带宽 (FWHM) 为 16.64 nm ，CVBG 的啁啾率为 $4 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，厚度为 $20 \sim 60 \text{ mm}$ （接近现有制备工艺条件允许范围^[11]），其他结构参数同 3.1 节。图 3 分别为在不同厚度下 CVBG 的衍射光谱曲线和群延时曲线。图 3(a) 中峰曲线为输入脉冲的光谱强度分布，可以看到随着光栅厚度增大，CVBG 的衍射频谱逐渐从远窄于输入脉冲范围到接近于完全覆盖输入脉冲范围，其衍射效率基本不变。图 3(b) 表明光栅厚度仅改变 CVBG 的总群延时，而对群延时色散（群延迟曲线的斜率）没有影响，也就是说 CVBG 的色散强弱与厚

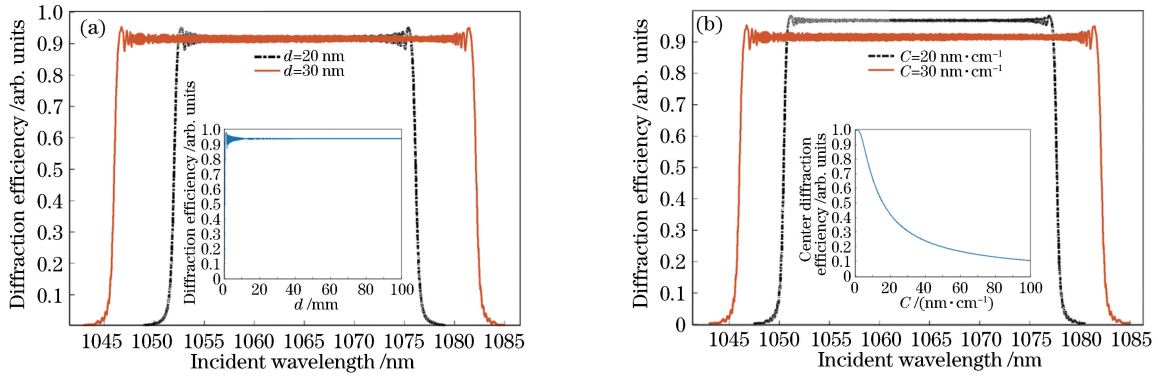


图 2 CVBG 的衍射特性。(a)不同厚度下 CVBG 的衍射光谱曲线,插图为中心衍射效率随厚度的变化;
(b)不同啁啾率的 CVBG 的衍射光谱曲线,插图为中心衍射效率随啁啾率的变化

Fig. 2 Diffraction characteristics of CVBG. (a) Diffraction spectra curves of CVBG with different thicknesses, inset is that central diffraction efficiency as a function of thickness; (b) diffraction spectra curves of CVBG with different chirp rates, inset is that central diffraction efficiency as a function of the chirp rate

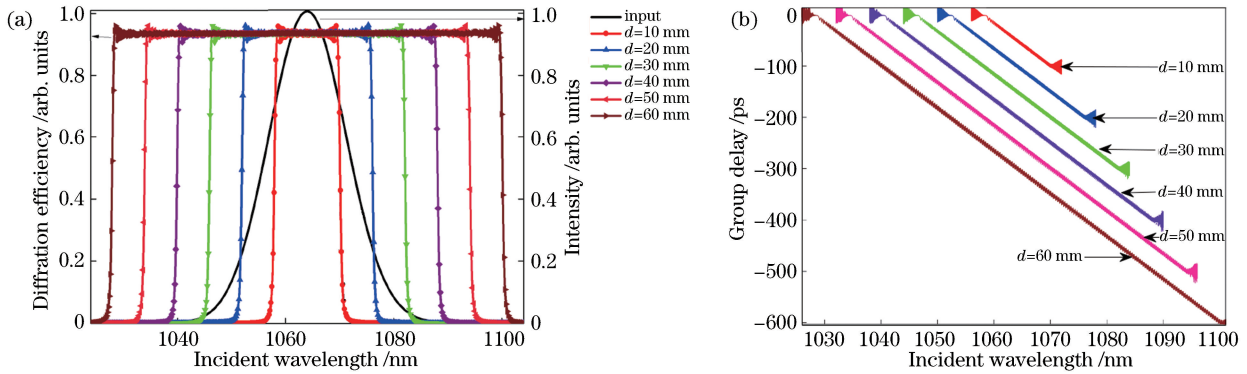


图 3 不同厚度下 CVBG 的衍射特性和色散特性。(a)不同厚度下 CVBG 的衍射光谱曲线(左)和输入脉冲的光谱强度曲线(右);(b)不同厚度下 CVBG 的群延时曲线

Fig. 3 Diffraction characteristics and dispersion characteristics of CVBG with different thicknesses. (a) Diffraction spectra curves of CVBG with different thicknesses (left) and spectral intensity curves of input pulse (right); (b) group delay curves of CVBG with different thicknesses

度无关。根据几何光学推导,CVBG 反射带来的群延时总量为 $t_{\text{delay}} = 2n_0 d/c$,而群延时色散为 $D_{\text{group}} = 1/(cC)$,只和啁啾率有关,与上述仿真结果相符。

图 4 为输入 FTL 脉冲经 CVBG 展宽后的时域强度分布。脉冲的展宽量和图 3(b)的群延时曲线一一对应,例如厚度为 10 mm 的 CVBG 所提供的总群延时为 100 ps,可以将输入脉冲展宽至 100 ps,且各展宽脉冲的峰值强度几乎相同。图中反映衍射带宽(光栅厚度)对 CVBG 脉冲展宽效应的影响主要表现为两点:第一,输出脉冲首尾两端的陡峭下降沿的高度随 CVBG 衍射带宽的增大而减小(见图 4 插图);第二,输出脉冲的强度振荡随 CVBG 衍射带宽的增大逐渐减缓,包络越来越趋近于高斯函数。当 CVBG 的衍射带宽较窄时,输入脉冲相对于 CVBG 反射谱带之外的低频和高频成分会被剪切

掉,但由于边界反射效应,被剪切的小部分频谱能量仍表现在反射光中^[21]。尽管这种边界反射光能量很低,但是展宽脉冲本身的强度同样很弱,因而在图 4 中依然可以看到脉冲前后两侧的陡峭下降沿,前沿和后沿分别为 CVBG 前后两个表面的边界反射。增大 CVBG 的衍射带宽,也就是输入脉冲被剪切掉的频谱能量减小,则边界反射能量也会随之减小,所以展宽脉冲前后沿的陡峰高度也同步降低。展宽脉冲的强度振荡源于其高低频谱成分的缺失,因此包络曲线会随着 CVBG 衍射带宽逐渐覆盖输入脉冲而慢慢趋近于高斯函数。

图 5(a)是图 4 的展宽脉冲分别再经 CVBG 压缩后的输出信号,其中最高的实线为初始的 FTL 输入脉冲。压缩脉冲的包络曲线均接近标准高斯函数,但是高低频谱成分的剪切导致脉冲强度和宽度

有所区别, CVBG 的衍射带宽越大, 压缩脉冲脉宽越小且强度越大; 当 CVBG 的衍射带宽逐渐覆盖输入脉冲的频谱之后, 压缩脉冲会越来越趋近于一个压缩极限: 输出脉宽等于输入脉宽且强度趋近于输入脉冲强度乘以 CVBG 两次衍射的效率(约 87.4%)。

这一点在图 5(b)中可以更直观地体现, 当 CVBG 的衍射带宽增大到 60 nm 之后, 压缩脉冲的脉宽(FWHM)趋于平稳值 100 fs, 和输入 FTL 脉冲相等, 且衍射效率几乎不变。

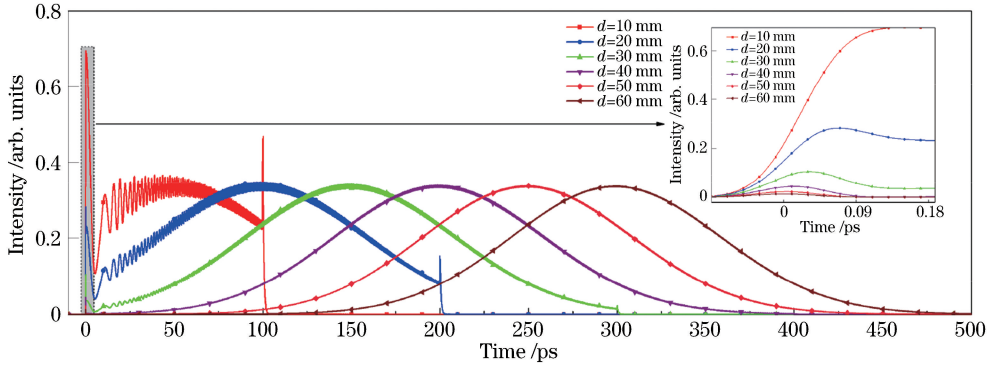


图 4 不同厚度的 CVBG 的脉冲展宽响应曲线

Fig. 4 Pulse stretching response curves of CVBG with different thicknesses

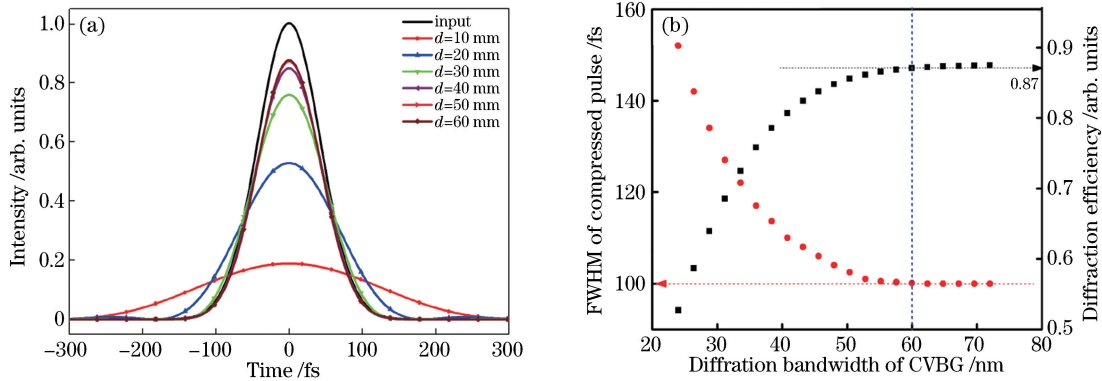


图 5 CVBG 的脉冲压缩响应特性。(a)不同厚度下 CVBG 的脉冲压缩响应曲线;

(b) CVBG 脉冲压缩特性随其衍射带宽的变化

Fig. 5 Pulse compression response characteristics of CVBG. (a) Pulse compression response curves of CVBG with different thicknesses; (b) pulse compression characteristics of CVBG as a function of the diffraction bandwidth

3.3 宽带啁啾体布拉格光栅对线性啁啾脉冲的响应特性

材料特性等产生的色散调制, 导致现实情况中激光器输出的脉冲通常是一个啁啾脉冲。为进一步探索 CVBG 在 FCPA 系统中的作用机制, 分析同一块宽带 CVBG(仿真厚度设为 $d=40$ mm, 衍射带宽约 48 nm)对啁啾系数不同但光谱带宽均为 16.64 nm 的啁啾脉冲的响应特性。图 6 为输入啁啾脉冲的频谱强度曲线和宽带 CVBG 的衍射效率曲线, 4 种脉冲频谱强度分布完全相同且基本被 CVBG 响应频谱完全覆盖。

图 7(a)和(b)分别为输入啁啾脉冲的时域强度分布曲线和频谱相位曲线。线性啁啾脉冲的频谱相位是关于频率的二次曲线, 其宽度和顶点分别取决

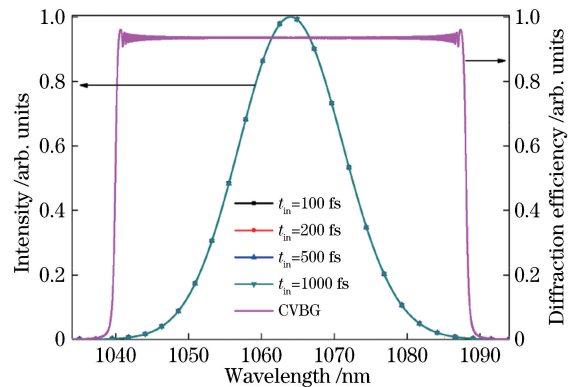


图 6 4 种啁啾脉冲的频谱强度曲线(左)和宽带 CVBG 的衍射效率曲线(右)

Fig. 6 Spectral intensity curves of four chirped pulses (left) and diffraction efficiency curve of CVBG (right)

于脉冲的频谱宽度和啁啾参数。为简便起见用脉冲宽度表征其啁啾量,根据(11)式,频谱带宽相同的情况下脉宽越大的脉冲啁啾也越大,也就是频谱相位变化范围更大。图 7(b)中当脉宽为 100 fs(无限趋近 FTL 脉冲)时频谱相位接近水平直线,而当脉宽为 1 ps 时频谱相位变化增大至近 7000 rad。图 7(c)和(d)分别为输入脉冲经 CVBG 展宽再压缩后的时域强度分布曲线和频谱相位曲线。可以发现

4 个输出脉冲的时域强度分布完全相同,脉宽约 100 fs,峰值强度约 84%,略小于压缩极限效率 87.4%,这可归因于极少量的频谱成分被剪切。图 7(d)中 4 个输出脉冲的频谱相位曲线几乎一致,且在靠近 CVBG 响应带宽区域呈水平直线,这说明 CVBG 在实现脉冲展宽和压缩的同时,还能在很大程度上平滑输入脉冲的相位啁啾,使得输出脉冲更趋近标准的 FTL 脉冲。

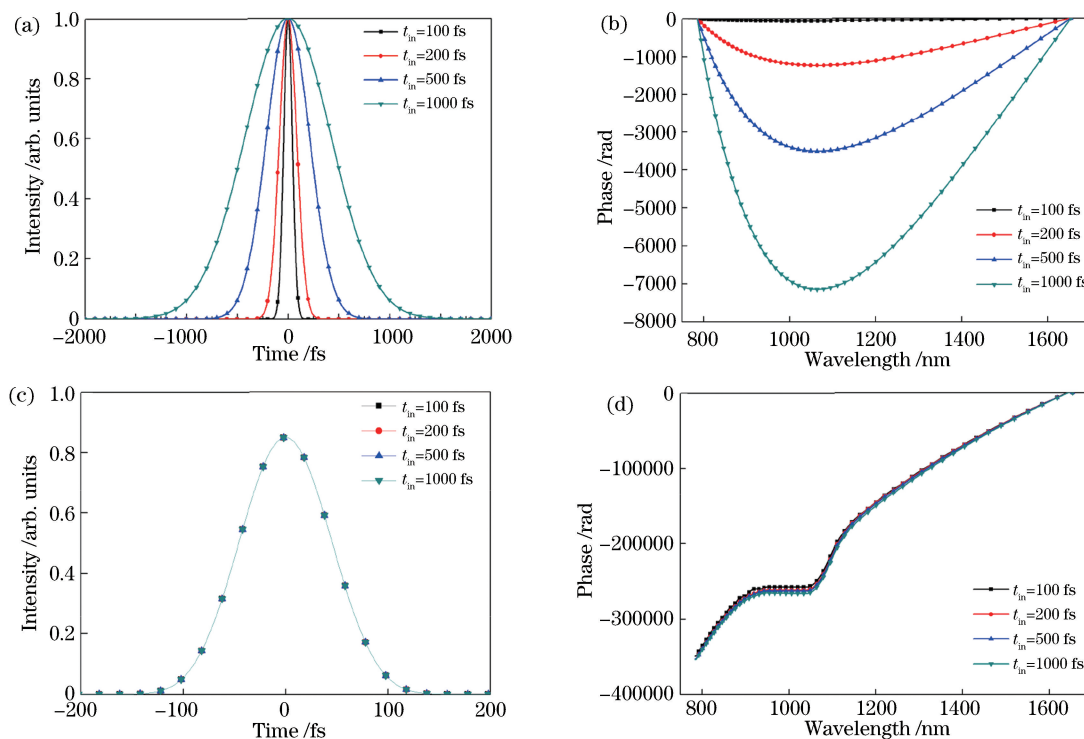


图 7 宽带 CVBG 对线性啁啾脉冲的响应特性。(a)输入脉冲的时域强度分布曲线;(b)输入脉冲的频谱相位曲线;(c)输出脉冲的时域强度分布曲线;(d)输出脉冲的频谱相位曲线

Fig. 7 Response characteristics of broadband CVBG to linear chirped pulses. (a) Time domain intensity distribution curves of input pulses; (b) spectral phase curves of input pulses; (c) time domain intensity distribution curves of output pulses; (d) spectral phase curves of output pulses

4 结 论

在不考虑材料吸收效应的条件下,CVBG 的衍射带宽、总群延时与光栅厚度成正比,衍射效率、色散强弱与光栅厚度无关,固定其他参数不变增大光栅厚度可实现宽带高效率 CVBG。CVBG 的衍射带宽对其脉冲响应特性的影响主要源于其对输入脉冲频谱成分的剪切,对于百 fs 的 CVBG 脉冲压缩器,需要超 60 nm 的衍射带宽才能实现良好的脉冲展宽-压缩对易性。另外,这种宽带 CVBG 还能在一定程度上弥补输入脉冲自身的啁啾效应,线性啁啾脉冲经展宽和压缩后几乎趋近于 FTL 脉冲,这种特性更有利于其在 FCPA 系统中的应用。下一步工

作将制备宽带 CVBG 并应用到 FCPA 系统中验证其脉冲展宽和压缩性能。

参 考 文 献

- [1] Huang H, Yang L M, Liu J. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser [J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051513.
- [2] Röser F, Eidam T, Rothhardt J, *et al.* Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. Optics Letters, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [3] Klenke A, Hädrich S, Eidam T, *et al.* 22 GW peak-power fiber chirped-pulse-amplification system [J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6875-6878.

- [4] Sun R Y, Tan F Z, Jin D C, *et al.* 1 μm femtosecond fiber chirped pulse amplification system based on dispersion wave [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101001.
孙若愚, 谭方舟, 金东臣, 等. 基于色散波的 1 μm 飞秒光纤啁啾脉冲放大系统 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101001.
- [5] Hao J Y, Liu B W, Song H Y, *et al.* Femtosecond fiber amplification system based on third-order dispersion compensation technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051404.
郝静宇, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于三阶色散补偿的光纤飞秒激光放大系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051404.
- [6] Chen H, Guan H Y, Zeng L J, *et al.* Fabrication of broadband, high-efficiency, metal-multilayer-dielectric gratings [J]. Optics Communications, 2014, 329: 103-108.
- [7] Chen J M, Huang H P, Zhang Y B, *et al.* Reducing electric-field-enhancement in metal-dielectric grating by designing grating with asymmetric ridge [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 5228.
- [8] Fedulova E, Fritsch K, Brons J, *et al.* Highly-dispersive mirrors reach new levels of dispersion [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13788-13793.
- [9] Chen Y, Wang Y Z, Wang L J, *et al.* High dispersive mirrors for erbium-doped fiber chirped pulse amplification system [J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19835-19840.
- [10] Liu J, Wang Y Z, Zhao R R, *et al.* Low vibration and high dispersion mirror pair in femtosecond pulsed Ti : sapphire laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1003001.
刘加, 王胭脂, 赵睿睿, 等. 飞秒脉冲钛宝石激光器中的低振荡高色散镜对 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1003001.
- [11] Glebov L, Smirnov V, Rotari E, *et al.* Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses [J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051514.
- [12] Rever M, Huang S H, Yabus C, *et al.* 200 fs, 50 W fiber-CPA system based on chirped-volume-Bragg-gratings [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics 2009, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D. C.: OSA, 2009: CMBB2.
- [13] Sims R A, Kadwani P, Shah L, *et al.* Chirped pulse amplification in Tm doped fiber using a chirped Bragg grating [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8601: 86012P.
- [14] Sun R Y, Jin D C, Tan F Z, *et al.* High-power all-fiber femtosecond chirped pulse amplification based on dispersive wave and chirped-volume Bragg grating [J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22806-22812.
- [15] Bartulevicius T, Frankinas S, Michailovas A, *et al.* Compact fiber CPA system based on a CFBG stretcher and CVBG compressor with matched dispersion profile [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19856-19862.
- [16] Kaim S, Mokhov S, Zeldovich B Y, *et al.* Stretching and compressing of short laser pulses by chirped volume Bragg gratings: analytic and numerical modeling [J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051509.
- [17] Feng J S, Zhang X, Wu D S, *et al.* Diffraction in chirped volume Bragg gratings [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(s1): s10901.
- [18] Yamada M, Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach [J]. Applied Optics, 1987, 26(16): 3474-3478.
- [19] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [20] Zhang Z G. Femtosecond laser technology [M]. Beijing: Science Press, 2011: 15-28.
张志刚. 飞秒激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 15-28.
- [21] Feng J S. Spectral responses and dispersion properties of chirped volume Bragg gratings [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 32-39.
封建胜. 啁啾体布拉格光栅的频谱响应与色散特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 32-39.